

Дж. Терри

СПРАВОЧНИК
ИНЖЕНЕРА
ХИМИКА

II

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМТЕХ»

Москва 1986

CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK

JOHN H. PERRY

Editor of First, Second and Third Editions

FOURTH EDITION

*Prepared by a Staff of Specialists
under the Editorial Direction of*

ROBERT H. PERRY

Professor of Chemical Engineering,
University of Rochester

CECIL H. CHILTON

Editor-in-chief, Chemical Engineering

SIDNEY D. KIRKPATRICK

Former Editorial Director,
Chemical Engineering and Chemical Week

McGRAW-HILL BOOK COMPANY
New York — Toronto — London — Sydney

1963

ДЖОН Г. ПЕРРИ

СПРАВОЧНИК ИНЖЕНЕРА-ХИМИКА

ТОМ ВТОРОЙ

*Перевод с четвертого английского издания
под общей редакцией*

акад. Н. М. ЖАВОРОНКОВА

и

чл.-корр. АН СССР П. Г. РОМАНКОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»
Ленинградское отделение
1969

Дж. ПЕРРИ. *Справочник инженера-химика*, т. II. Перевод с англ. под ред. акад. Жаворонкова Н. М. и чл.-корр. АН СССР Романкова П. Г. Изд-во «Химия», 1963, стр. 504, рис. 677, табл. 109.

Книга является фундаментальным справочным руководством по процессам и аппаратам химической технологии, обобщающим многолетний инженерный опыт.

Справочник издается в двух томах.

В первом томе приводятся основные данные по гидравлическим, тепловым и массообменным процессам химической технологии, необходимые для расчета и проектирования, а также таблицы и номограммы физико-химических свойств газов, жидкостей, твердых материалов и их смесей.

Во втором томе рассматриваются отдельные процессы, осуществляемые в системах жидкость — газ, жидкость — твердое вещество, газ — твердое вещество, газ — газ, твердое вещество — твердое вещество (перемешивание, фильтрование, центрифугирование, газоочистка и др.), и их оборудование, а также вопросы контроля и автоматизации химических производств.

Справочник предназначен для широкого круга инженерно-технических работников химической, нефтехимической, горнорудной, пищевой и других отраслей промышленности. Он будет полезен также преподавателям, аспирантам и студентам технологических и машиностроительных вузов.

В редактировании второго тома принимали участие: канд. техн. наук Н. Н. ЕГОРОВ (гл. III); докт. техн. наук В. А. ЖУЖИКОВ (гл. II); канд. техн. наук Н. И. ИСАЕВ (гл. II); канд. техн. наук М. И. КУРОЧКИНА (гл. I—IV); канд. техн. наук А. А. МЕДВЕДЕВ (гл. IV); канд. техн. наук Л. А. МУСЯКОВ (гл. V); канд. техн. наук Н. В. ОЗЕРОВА (гл. I); канд. хим. наук И. С. ПАВЛУШЕНКО (гл. II); докт. техн. наук А. Н. ПЛАНОВСКИЙ (гл. I); канд. техн. наук С. А. ПЛЮШКИН (гл. II); чл.-корр. АН СССР П. Г. РОМАНКОВ (гл. II, IV и V); докт. техн. наук В. И. СОКОЛОВ (гл. II); канд. техн. наук Ю. А. ШАХОВ (гл. I); канд. техн. наук И. А. ЩУПЛЯК (гл. III).

Глава первая

СИСТЕМЫ ГАЗ—ЖИДКОСТЬ

А. Теллер (A. J. Teller), Ш. Миллер (Sh. A. Miller),
Э. Шейбел (E. G. Scheibel)

Перевод Ю. В. ТУМАНОВА и В. П. ХАРАХАШ
под редакцией А. Н. ПЛАНОВСКОГО

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Контактирование пара и жидкости	7
Тарельчатые колонны	7
Типы тарелок	7
Пропускная способность тарельчатых колонн	9
Устройство тарелок	11
Сопротивление тарелок	12
Унос	18
Эффективность тарелок	21
Стоимость тарельчатых колонн	31
Расчет оптимальных размеров тарельчатых колонн	31
Насадочные колонны	32
Сопротивление и стабильность работы	32
Захлебывание и подвисяние	33
Опорные тарелки	38
Удерживающая способность насадки	38
Распределение потоков	40
Поверхность межфазового контакта	44
Массопередача в жидкой фазе	47
Массопередача в газовой фазе	49
Абсорбция, сопровождаемая химической реакцией	52
Особенности систем и насадок	53
Абсорбция двуокиси углерода	57
Абсорбция четырехфтористого кремния водой	61
Дистилляция	61
Выбор оптимальных размеров насадочных колонн	64
Стоимость насадочных колонн	65
Аппараты с распылением жидкости	65
Полые распылительные колонны	66
Циклонные распылительные колонны	68
Скрубберы Вентури	68
Инжекционные скрубберы	69
Пленочные колонны	69
Диспергирование фаз	72
Диспергирование жидкости в газе	72
Теория образования капли	73
Брызги, дымы, туманы	74
Распылительные устройства	76
Применение распылительных устройств	82
Диспергирование газа в жидкости	83
Применение газовых дисперсий	83
Теория образования пузырьков и пены	83
Характеристики дисперсной системы	86
Свойства фаз, составляющих дисперсную систему	86
Характеристики дисперсий	86
Методы диспергирования газов	88
Распределители газа	88
Методы выделения и образования газа в жидкости	91
Литература	97
Сепарация	99
Системы жидкость в газе	99
Гравитационные осадители	100
Циклоны	100
Сепараторы ударного действия	101
Электростатический и акустический методы	106
Системы газ в жидкости	107
Разделение неустойчивых систем	107
Разделение пены	107

Массообмен в системах газ—жидкость, используемый для разделения веществ, основан на законах фазового равновесия, причем скорость массопередачи определяется механизмом молекулярной и вихревой диффузии. Аппараты, используемые для проведения массообмена между газом и жидкостью, конструируются таким образом, чтобы создать оптимальные условия для скорости массопередачи между фазами с минимальными затратами энергии и капитальных вложений.

Процессы массопередачи в системах газ — жидкость подразделяются следующим образом:

Дистилляция	Десорбция	Осушка газов
Ректификация	Испарение	Дефлегмация
Абсорбция	Увлажнение	Сушка распылением

Все эти процессы требуют одинаковой трактовки с точки зрения фазового равновесия и кинетики массопередачи. Анализ динамики потоков в массообменных аппаратах также одинаков для многих типов процессов в системах газ—жидкость.

Аппараты, применяемые для приведения в контакт газа и жидкости, характеризуются тремя категориями принципов работы: 1) схемой взаимодействия потоков, (противоток, прямоток, перекрестный ток); 2) общим механизмом переноса (дифференциальный или интегральный) и 3) фазой в турбулентном состоянии (газ или жидкость).

Сочетание этих характеристик в различных типах массообменных аппаратов приведено в табл. I-1.

ТАБЛИЦА I-1

Характеристика систем газ — жидкость

Конструкция аппарата	Преимущественная схема потоков	Общий механизм переноса	Фаза в турбулентном состоянии	Преимущественное применение
Насадочная колонна	Противоток	Дифференциальный	Газ	Абсорбция, ректификация, десорбция, увлажнение и осушка газов
Тарельчатая колонна	Противоток, перекрестный ток	Интегральный	Жидкость	То же
Аппараты с падающей пленкой, смоченной стенкой	Противоток	Дифференциальный	Ни одна из фаз	Абсорбция, ректификация
Распылительный аппарат	Прямоток	Дифференциальный	Газ	Абсорбция, увлажнение, сушка
Теплообменник	Прямоток, противоток	Дифференциальный	Газ	Испарение, дефлегмация
Аппарат с мешалкой	Одна ступень полного смешения	Интегральный	Жидкость	Абсорбция
Аппарат Вентури	Прямоток	Дифференциальный	Газ	Абсорбция

КОНТАКТИРОВАНИЕ ПАРА И ЖИДКОСТИ

ТАРЕЛЬЧАТЫЕ КОЛОННЫ

Типы тарелок

Тарелки, применяемые в колоннах для приведения в контакт жидкости и газа, могут быть с перекрестным

током фаз или противоточными. Первые (рис. I-1, а), имеющие переливные патрубки для жидкости, получили более широкое распространение по сравнению с противоточными (рис. I-1, б) благодаря преимуществу в отношении эффективности и большому диапазону рабочих условий.

Для увеличения стабильности работы и улучшения эффективности массообмена схему движения жидкости по тарелке можно изменить, варьируя расположение

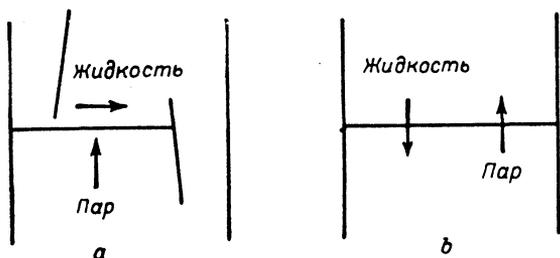


Рис. I-1. Тарелка с перекрестным током (a) и противоточная тарелка (b).

переливных патрубков. При нагрузках по жидкости менее $0,75-1,0 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м длины сливного порога})$ обычно применяется «нормальная» схема движения жидкости с перекрестным током с сегментным сливным патрубком (рис. I-2, a).

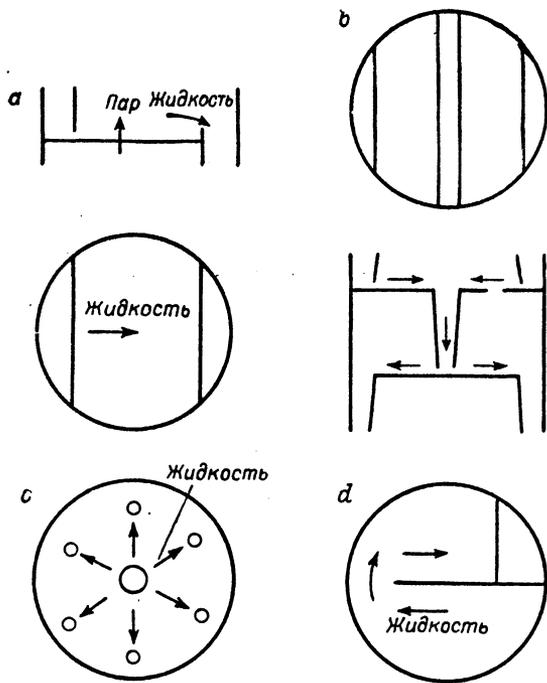


Рис. I-2. Схема взаимодействия потоков пара и жидкости:

a — перекрестный ток; b — разветвленный перекрестный ток; c — радиальное движение жидкости; d — двухфазное движение жидкости.

В тех случаях, когда нагрузка по жидкости превышает $0,75-1,0 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м длины сливного порога})$ в колоннах с умеренной пропускной способностью по пару применяется разветвленная (рис. I-2, b), а иногда радиальная (рис. I-2, c) схема движения с перекрестным током. При схеме движения жидкости с разветвленным перекрестным током доля поперечного сече-

ния колонны, на которой происходит барботаж (т. е. занятая колпачками или отверстиями), значительно меньше, чем при «нормальной» схеме движения с перекрестным током.

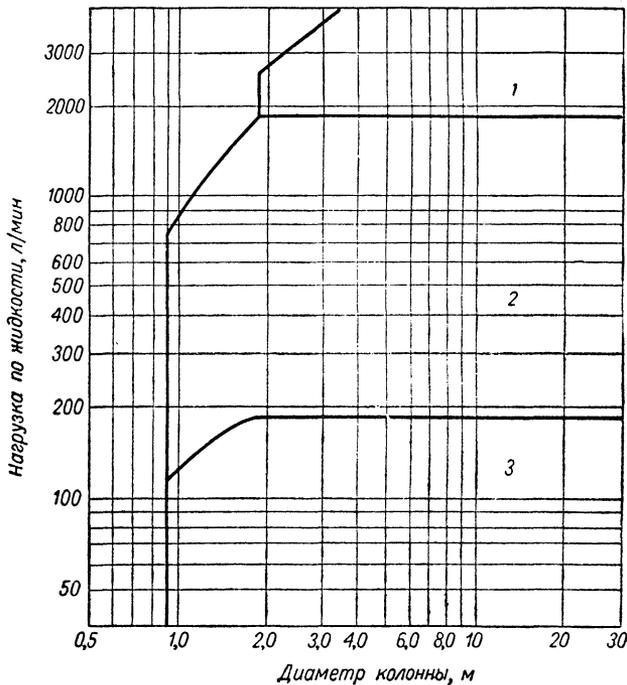


Рис. I-3. Области применения тарелок с различными схемами движения жидкости:

1 — разветвленный перекрестный ток; 2 — перекрестный ток; 3 — двухфазное движение жидкости.

Для систем с основным сопротивлением массопередаче в жидкой фазе при низких нагрузках по жидкости может потребоваться увеличение времени пребывания и длины пути жидкости на тарелке. Этого можно достигнуть при двухфазовой схеме движения (рис. I-2, d).

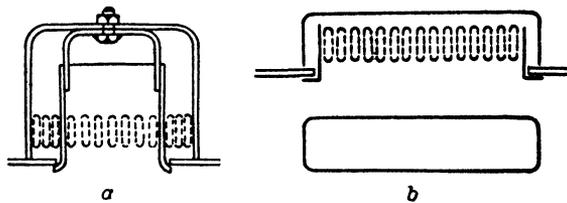


Рис. I-4. Барботажные колпачки:

a — круглый, или капсульный; b — туннельный.

На рис. I-3 приводятся примерные области рабочих режимов для различных схем движения жидкости на тарелке¹.

Для диспергирования газа в тарельчатых колоннах применяются колпачковые и ситчатые тарелки и их модификации.

¹ Huang, Hodson, Petrol. Refiner, 37 (2), 104 (1958).

На колпачковой тарелке пар, проходя через паровой патрубок, движется затем в противоположном направлении и диспергируется в жидкость через прорезы в

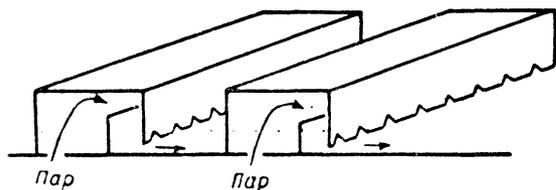


Рис. 1-5. Тарелка «Унифлюкс».

колпачках. Круглый барботажный колпачок и его основная модификация — туннельный колпачок — показаны на рис. 1-4. Площадь прорезей для прохода пара

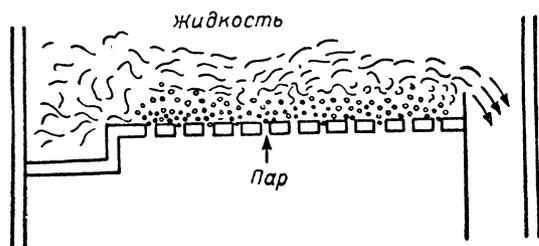


Рис. 1-6. Ситчатая тарелка.

колеблется в пределах от 8 до 15% от общей площади тарелки.

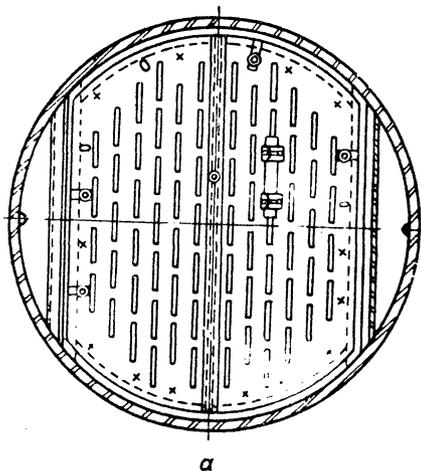


Рис. 1-8. Клапанная тарелка Наттера с прямоугольными клапанами: а — тарелка в плане; б — клапан (1 — плоскость тарелки; 2 — прорезь).

Другой модификацией барботажной колпачковой тарелки является тарелка «Унифлюкс» (рис. 1-5), в которой продольное сечение колпачков расположено перпендикулярно направлению движения жидкости.

Тарелка, на поверхности которой жидкость удерживается кинетической энергией пара, называется ситчатой. Отверстия в такой тарелке делаются круглыми (рис. 1-6) или в виде щелей, образованных либо путем механической просечки листа металла (тарелка Киттеля), либо набором параллельно установленных металлических пластин (тарелка Вентури).

Живое сечение отверстий может изменяться в пределах 5—15% от общей площади тарелки.

Современными модификациями, сочетающими механизм диспергирования пара на ситчатых тарелках с достоинствами способа удержания жидкости на тарелке механическим затвором, являются различные типы клапанных тарелок: «Кох Флекситрей» (рис. 1-7), тарелка Наттера (рис. 1-8) и балластная тарелка Глитча. Отверстия в них закрываются подъемными клапанами, которые обеспечивают изменение живого сечения (в пределах 10—25% от общей площади тарелки), предотвращая таким образом провал жидкости при низких скоростях пара.

Противоточные тарелки «Турбогрид», перфорированные и гофрированные тарелки имеют живое сечение в пределах 10—30% от общей площади тарелки.

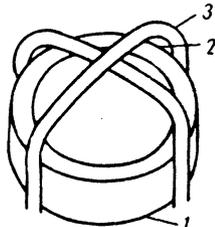


Рис. 1-7. Клапан тарелки «Кох Флекситрей»:

1 — круглое отверстие в тарелке; 2 — подъемный клапан; 3 — направляющие клапана.

Пропускная способность тарельчатых колонн

Область устойчивой работы различных типов тарелок зависит от того критерия, по которому устанавливается устойчивость режима, и поэтому она не постоянна даже для тарелки одной конструкции.

Нижний предел устойчивой работы тарелок найти гораздо легче, чем верхний. На колпачковых тарелках минимальная скорость пара характеризуется тем, что в работе находится только часть прорезей, т. е. пар не

создает напора, необходимого для работы всех прозрей колпачков. Этот режим называется пульсационным. Для ситчатых тарелок под минимальной скоростью пара обычно подразумевают такую, при которой невозможно удержать жидкость на тарелке. Явление, возникающее при этом, называется провалом жидкости.

Верхний предел рабочей скорости поддается оценке с меньшей точностью. Неустойчивость работы колонны может быть результатом захлебывания или затопления. Быстрое снижение эффективности колонны может быть вызвано также повышенным уносом. Любой из этих трех факторов может определять предельную нагрузку колонны с перекрестным движением фаз на тарелках, и в то же время они не могут не зависеть друг от друга. Поэтому любое из предложенных объяснений нельзя рассматривать как всеобъемлющее, так как все они были получены для конкретных типов колонн. Для расчета верхнего предела работы колонны необходимо изучить каждый из этих трех факторов.

Захлебывание наступает, когда сопротивление тарелки превышает напор жидкости в переливном патрубке. При этом пар, стремясь сократить свой путь, проходит через переливные патрубки. Затопление происходит, когда пена на тарелке достигает вышележащей тарелки. Это вызывает дополнительное сопротивление прохождению газа через диспергирующую часть вышележащей тарелки и увеличение уноса, а следовательно, ограничение пропускной способности колонны вследствие резкого снижения эффективности или захлебывания.

Критическое значение уноса часто принимается за критерий, определяющий верхний предел рабочего режима, и является основой уравнения Саудерса и Брауна (I-1). Однако Кольборн не считает унос лимитирующим фактором. Тем не менее уровень пены тесно связан с уносом и, по-видимому, так же тесно с его максимумом, установленным Саудерсом и Брауном.

Колонны с перекрестным током на тарелках. Рабочие скорости пара (газа) в промышленных колоннах с перекрестным током на тарелках обычно находятся в интервале $0,48 < U_c \sqrt{V \rho_p} < 2,8$ для колпачковых тарелок и $0,61 < U_c \sqrt{V \rho_p} < 3,05$ для ситчатых тарелок [где U_c — скорость, отнесенная к свободному сечению колонны, м/сек, а ρ_p — плотность пара (газа), кг/м³]. Эти величины установлены для расстояния между тарелками 450 мм, но верхний предел зависит от расстояния между тарелками. Однако область устойчивой работы обычно в 4—5 раз уже как для колпачковых, так и для ситчатых тарелок.

На основе корреляции между предельной скоростью в колонне и уносом Саудерс и Браун предложили формулу:

$$U_{\max} = K \sqrt{\frac{\rho_{ж} - \rho_{п}}{\rho_{ж}}} \quad (I-1)$$

Постоянная K является функцией расстояния между тарелками и высоты гидрозатвора (глубины барботажа). На рис. I-9 показаны значения K для колонны с колпачковыми тарелками.

Максимальная нагрузка по пару, рассчитанная по константам Саудерса и Брауна, обычно на 20—50% ниже действительной и используется поэтому для предварительного определения пропускной способности колонны.

Новые клапанные тарелки («Флекситрей», Наттера, Глитча) обладают более высокой пропускной способностью, чем колпачковые. Пропускная способность та-

релки Наттера, например, может быть определена по константе Саудерса и Брауна (кривые с на рис. I-9) со следующими поправочными коэффициентами¹:

Для ректификации	
бинарных смесей	1,87 K
многокомпонентных смесей	1,7 K
легких нефтепродуктов	1,5 K
Для абсорбции	1,27 K

В диаграмме для определения максимальной нагрузки по пару для колонн с ситчатыми тарелками²

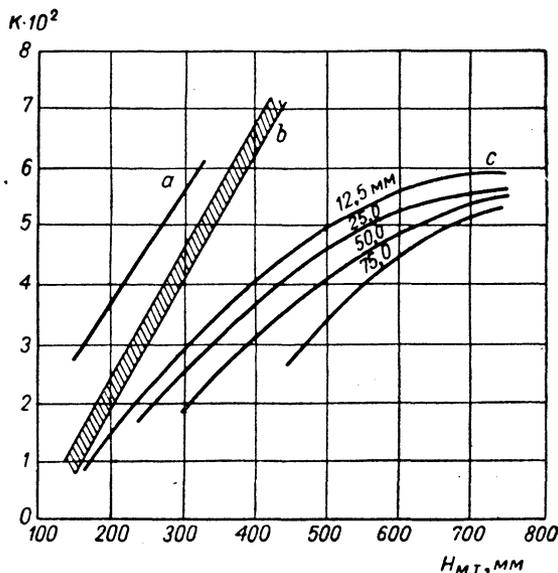


Рис. I-9. Значения K для колонн с колпачковыми тарелками в зависимости от расстояния между тарелками $H_{м.т.}$:

a — низкотемпературная дистилляция, колпачки диаметром 25 мм [Wenzel, Chem. Eng. Progr., 53, 272 (1950)]; *b* — непенящиеся жидкости с поверхностным натяжением более 20 дин/см [Vulcan Engineering Co, 1956]; *c* — данные для различной глубины барботажа [Brown, Souder's, Ind. Eng. Chem., 26, 98 (1934)].

(рис. I-10) учтено влияние поверхностного натяжения, но полученные константы справедливы только для постоянной глубины барботажа.

Колонны с противоточными тарелками. По сравнению с тарелками с перекрестным током противоточные тарелки обладают повышенной пропускной способностью по пару и более узким интервалом устойчивой работы. Обобщение данных по режимам работы противоточных тарелок³ показало, что интервал их стабильной работы можно выразить отношением $< 2/1$, в то время как для тарелок с перекрестным током этот ин-

¹ Nutter, частное сообщение.

² Huang, Hodson, Petrol. Refiner, 37 (2), 104 (1958).

³ Majewski, Brit. Chem. Eng., 4 (6), 336 (1959).

тервал выражается отношением $\leq 4/1$. Точки захлебывания и провала могут быть определены по следующим уравнениям, в которых скорость захлебывания $U_{\text{захл}}$ и скорость, соответствующая провалу жидкости, $U_{\text{пров}}$ (в м/сек) отнесены к свободному сечению колонны:

$$\frac{U_{\text{захл}}^2}{g d_3 \psi^2} \cdot \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{в}}} \right)^{0,16} = 10 \exp \left[-4 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,125} \right] \quad (1-2)$$

$$\frac{U_{\text{пров}}^2}{g d_3 \psi^2} \cdot \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{в}}} \right)^{0,16} = 2,95 \exp \left[-4 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,125} \right] \quad (1-3)$$

где g — ускорение силы тяжести, м/сек²; d_3 — эквивалентный диаметр прорезей, м; ψ — доля свободного сечения тарелки; L — массовый расход жидкости; G — массовый расход пара; $\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{п}}$ — плотность жидкости и пара, $\mu_{\text{ж}}$ и $\mu_{\text{в}}$ — вязкость жидкости и воды.

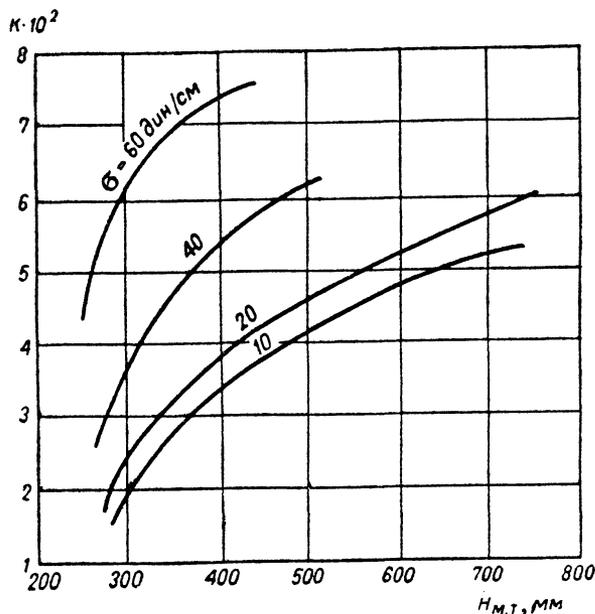


Рис. 1-10. Пропускная способность колонн с ситчатыми тарелками в зависимости от поверхностного натяжения σ и расстояния между тарелками $H_{\text{м.т.}}$.

Уравнения (1-2) и (1-3) справедливы при изменении переменных в следующих пределах: $2,5 < L/G < 148$, $0,2 < U_c < 3,7$ (где U_c — скорость пара в свободном сечении колонны).

Расстояние между противоточными тарелками принимается в пределах 200—400 мм в зависимости от ожидаемой высоты пены.

Ограниченный интервал работы по сравнению с тарелками перекрестного тока обусловлен существованием ясно выраженного узкого оптимального интервала с высокой эффективностью массопередачи. Это яв-

ление (рис. 1-11) было отмечено для систем этанол—вода¹ и бензол — дихлорэтан².

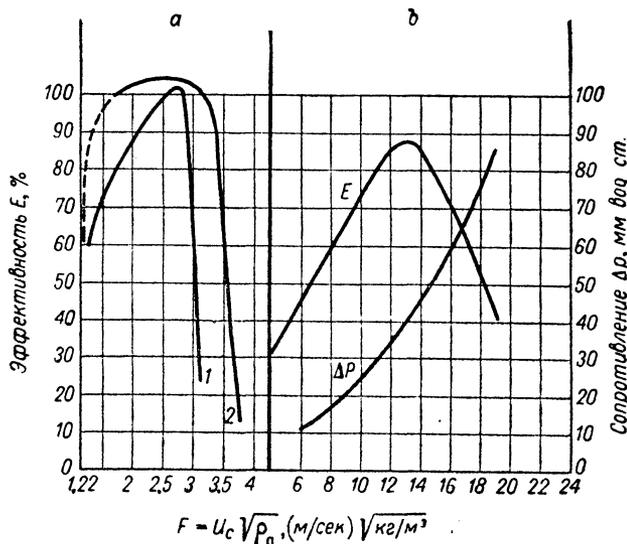


Рис. 1-11. Эффективность E и сопротивление Δp противоточных тарелок в зависимости от скорости пара: а — система этанол — вода (1 — доля свободного сечения тарелки $\psi = 0,144$, диаметр отверстия $d_{\text{отв}} = 1,8$ мм; 2 — $\psi = 0,08$, $d_{\text{отв}} = 1,2$ мм); б — система бензол — дихлорэтан ($\psi = 0,185$, ширина щели 3 мм).

Эффективность гофрированной тарелки по существу постоянна³ в пределах $1,2 < \psi < 2,4$.

Устройство тарелок

Колпачковые и ситчатые тарелки с перекрестным током сходны в плане (рис. 1-12).

Площадь, занимаемая переливными устройствами 1, составляет обычно 10—30% от общей площади тарелки. Длина сливного порога принимается в пределах 55—80% от диаметра колонны, поэтому зона каждого сливного патрубка занимает 5—15% общей площади тарелки. Периферийная зона 3, придающая тарелке жесткость (шириной обычно 25—50 мм), составляет 2—5% от общей площади, причем ее доля уменьшается с увеличением диаметра тарелки. Периферийные нерабочие зоны характерны главным образом для колпачковых тарелок, так как невозможно плотно заполнить колпачками всю площадь тарелки. Часть поверхности, занятая зонами распределения 2 и перелива светлой жидкости, составляет 5—9% от общей площади тарелки.

Типичные величины активной зоны барботажа и контактирования пара с жидкостью даны в табл. 1-2.

Толщина колпачковой тарелки не оказывает влияния на ее сопротивление и определяется обычно механическим расчетом. Однако для ситчатой тарелки толщина является важным фактором, так как она сама играет роль устройства, диспергирующего пар.

¹ Аэров, Даровских, Хим. пром., 92 (1957); Хим. наука и пром., 95 (1957).

² Cervinca, Cerny, Chem. Premysl, 232 (1955).

³ Hutchinson, Baddour, Chem. Eng. Progr., 52, 503 (1956).

ТАБЛИЦА I-2
Активная площадь тарелки

Диаметр колонны, м	Диаметр колпачка, мм	Активная зона (в долях от общей площади)	
		колпачковая тарелка	ситчатая тарелка
0,9	75	0,60	0,65
1,2	100	0,57	0,70
1,8	100	0,66	0,74
2,4	150	0,70	0,76
3,0	150	0,74	0,78

Примечание. Длина хордового переливного порога составляет 75% от диаметра колонны.

Практически было установлено соотношение $0,1 < \frac{t}{d_{отв}} < 0,7$ (где t — толщина тарелки, $d_{отв}$ — диаметр отверстия).

Размер отверстий в ситчатых тарелках с перекрестным потоком может лежать в пределах 3—12 мм. Обычно делаются отверстия диаметром 5 мм, так как просечкой трудно получить одинаковые отверстия диаметром 3 мм, а с увеличением размера отверстия возрастает возможность провала.

Расстояние между отверстиями, расположенными по вершинам равностороннего треугольника, принимается в пределах 2,5—5 диаметров. Если оно меньше 2,5 диаметров, наблюдается интенсивная коалесценция пузырьков. При расстоянии больше 5 диаметров уменьшается пропускная способность колонны; кроме того, в пространстве между отверстиями образуются неактивные зоны жидкости, понижающие эффективность массопередачи.

Противоточные тарелки изготавливаются с круглыми или щелевыми отверстиями и не требуют переливных устройств. Движение пара и жидкости через отверстия происходит противотоком.

В промышленности получили распространение три типа противоточных тарелок: 1) с круглыми отверстиями, 2) «Турбогрид» и 3) гофрированные.

Живое сечение противоточных тарелок принимается в пределах 10—30% от общей площади, в то время как живое сечение ситчатых тарелок с перекрестным

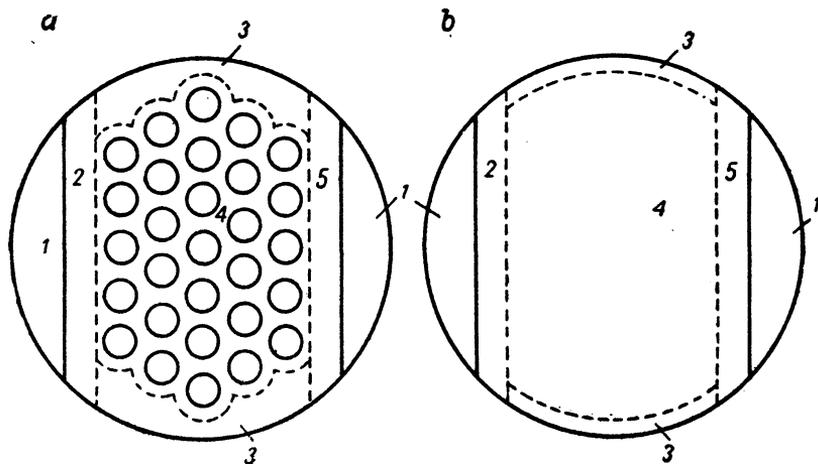


Рис. I-12. Распределение площади тарелки по зонам:

а — колпачковая тарелка; б — ситчатая тарелка; 1 — площадь, занимаемая переливными устройствами; 2 — распределительная зона; 3 — нерабочая периферийная зона; 4 — активная рабочая зона; 5 — зона сепарации.

Однако при малых значениях этого отношения велико сопротивление сухой тарелки, поэтому практически рекомендуемое соотношение принимает вид:

$$0,4 < \frac{t}{d_{отв}} < 0,7.$$

Колпачки обычно располагаются по вершинам равностороннего треугольника. Расстояние между колпачками должно по крайней мере на 25 мм превышать диаметр колпачка d_k , чтобы исключить столкновения потоков пара, выходящих из соседних колпачков. На практике это расстояние меняется в пределах от $d_k + 25$ мм до $d_k + 50$ мм. Диаметр колпачка принимается от 50 до 150 мм, за исключением особых случаев (например, в низкотемпературной дистилляции применяются колпачки диаметром 25 мм).

током находится в пределах 5—15%, а колпачковых 8—15%.

Противоточная тарелка с круглыми отверстиями — ситчатая (отверстия размером 6—12 мм). Тарелка «Турбогрид» имеет прямоугольные щелевые отверстия. Гофрированные тарелки имеют синусоидальное поперечное сечение. Они устанавливаются в колонне таким образом, чтобы направления гофрировки на соседних тарелках не совпадали. Размер отверстий 3—10 мм.

Сопротивление тарелок

Методы определения гидродинамических характеристик на ситчатых и колпачковых тарелках с перекрестным током одинаковы. Сопротивление тарелки расчи-

тывается по следующим уравнениям (рис. I-13) -- для колпачковых тарелок:

$$H_{\text{тар}} = h_1 + \Delta h + 0,5\Delta H + h_2 + h_{\text{ост}} \quad (\text{I-4a})$$

для ситчатых:

$$H_{\text{тар}} = h + \Delta h + 0,5\Delta H + h_2 + h_{\text{ост}} \quad (\text{I-4b})$$

Высота уровня жидкости в переливной трубе для колпачковых тарелок определяется по уравнению:

$$H = 2\Delta h + h + h_1 + 1,5\Delta H + h_2 + h_{\text{ост}} + h_3 \quad (\text{I-5a})$$

для ситчатых:

$$H = 2(h + \Delta h) + 1,5\Delta H + h_2 + h_{\text{ост}} + h_3 \quad (\text{I-5b})$$

В уравнениях (I-4) и (I-5) h — высота переливной перегородки; h_1 — высота гидрозатвора; Δh — превышение уровня жидкости над переливом; ΔH — градиент

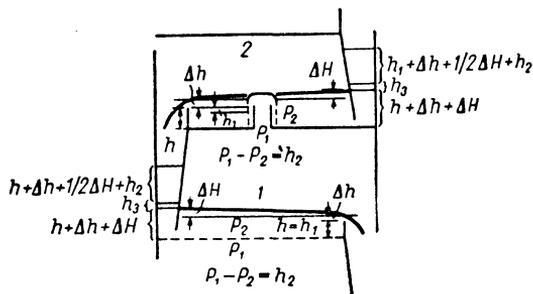


Рис. I-13. Составляющие полного сопротивления тарелок с перекрестным током:

1 — ситчатая тарелка; 2 — колпачковая тарелка.

уровня жидкости на тарелке; h_2 — высота столба жидкости, эквивалентная сопротивлению колпачка или отверстия; h_3 — потери напора на выходе жидкости из переливного патрубка; $h_{\text{ост}}$ — остальные сопротивления.

Высота гидрозатвора. Гидрозатвором является высота слоя жидкости над диспергирующим пар отверстием при нулевом расходе жидкости. Для колпачковой тарелки высота гидрозатвора h_1 равна высоте переливной перегородки h минус высота верхнего обреза прорезей колпачка над плоскостью тарелки. Для ситчатой тарелки высота гидрозатвора h_1 равна высоте переливной перегородки h .

Промышленной практикой установлено, что гидрозатвор или статический уровень жидкости над прорезью должен быть в пределах 0—12 мм при работе под вакуумом, 12—50 мм при атмосферном давлении и 25—100 мм при работе под избыточным давлением.

Переливные перегородки и превышение уровня жидкости над переливом. Переливные перегородки на тарелках с перекрестным током устанавливаются для создания гидрозатвора и равномерного распределения жидкости. Переливные пороги могут быть сегментными или круглыми, но сегментный тип дает возможность получить более равномерное распределение жидкости по тарелке.

Высота порога является функцией необходимого статического уровня и расхода жидкости и принимается в пределах 12—100 мм. При высоте слоя жидкости над прорезями или над отверстиями менее 25 мм имеет место струйный режим движения пара, увеличивающий унос жидкости на вышележащую тарелку, что

снижает эффективность тарелки. С увеличением высоты слоя жидкости работа тарелки стабилизируется. Повышение коэффициента массоотдачи в жидкой фазе при увеличении высоты жидкости над прорезями связано с увеличением времени пребывания жидкости на тарелке. Поэтому выбор высоты слоя жидкости зависит от оптимального соотношения между сопротивлением тарелки и ее эффективностью.

Превышение уровня жидкости над сливным порогом может быть рассчитано по уравнению Френсиса для водослива и его модификациям для переливных порогов различных типов.

Для сегментного перелива:

$$\Delta h = 2,76 \left(\frac{Q_{\text{ж}}}{l} \right)^{2/3} \text{ мм столба жидкости} \quad (\text{I-6a})$$

где $Q_{\text{ж}}$ — расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$; l — длина переливного порога, м .

Для перелива с зубцами:

$$\Delta h = 31,8 \left[\frac{Q_{\text{ж}}}{\text{tg}(\theta/2)} \right]^{0,4} \quad (\text{I-7})$$

где $Q_{\text{ж}}$ — расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$ (\cdot зубец); θ — угол зубцов, град.

Для круглого перелива:

$$\Delta h = 5,3 \left(\frac{Q_{\text{ж}}}{10D} \right)^{0,704} \quad (\text{I-8})$$

где $Q_{\text{ж}}$ — расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$; D — диаметр перелива, мм .

Если колонна в поперечном сечении имеет круглую форму, то вблизи перелива будет происходить сжатие потока жидкости, поэтому в уравнение (I-6) необходимо ввести поправочный коэффициент F (по графику I-14), учитывающий эффективную длину переливного порога. Уравнение в этом случае примет вид:

$$\Delta h = 2,76F \left(\frac{Q_{\text{ж}}}{l} \right)^{2/3} \quad (\text{I-6b})$$

При конструировании колонн обычно принимают сегментный перелив, дающий лучшее распределение жидкости по тарелке. Часто устанавливают его и тогда, когда переливные патрубки имеют круглую форму.

В тех случаях, когда превышение уровня жидкости над переливной перегородкой не превышает 6 мм, лучшее распределение жидкости по тарелке достигается при использовании зубчатых переливов. Так как стандарты на изготовление допускают негоризонтальность установки тарелки до 3 мм, превышение уровня жидкости над переливным порогом менее 6 мм может привести к плохому распределению жидкости.

Потери напора на выходе из переливного патрубка. Эти потери могут быть определены по уравнению:

$$h_3 = 1,15 \cdot 10^{-5} \left(\frac{Q_{\text{ж}}}{A} \right)^2 \quad (\text{I-9})$$

где $Q_{\text{ж}}$ — расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$; A — площадь кольцевого зазора между патрубками и поверхностью тарелки, м^2 .

Хотя потери на выходе из переливного патрубка велики, зазор между патрубком и поверхностью тарелки оказывает существенное влияние на стабильность работы тарелки и распределение жидкости. Гидравлический затвор между уровнем жидкости на тарелке и нижним обрезом переливного патрубка должен быть в пределах 12—37 мм.

Градиент уровня жидкости. Гидравлический градиент, напор, необходимый для преодоления потерь на трение при прохождении жидкости по тарелке, оказывает существенное влияние на стабильность работы, так как он является единственной переменной величиной по длине тарелки. При чрезмерном градиенте начальный участок тарелки может оказаться неработающим из-за повышения сопротивления прохождению потока пара, вызванного увеличением слоя жидкости в этой зоне (рис. I-13). Экспериментально определенная граница стабильной работы обычно составляет $h_2 > 2,5\Delta H$.

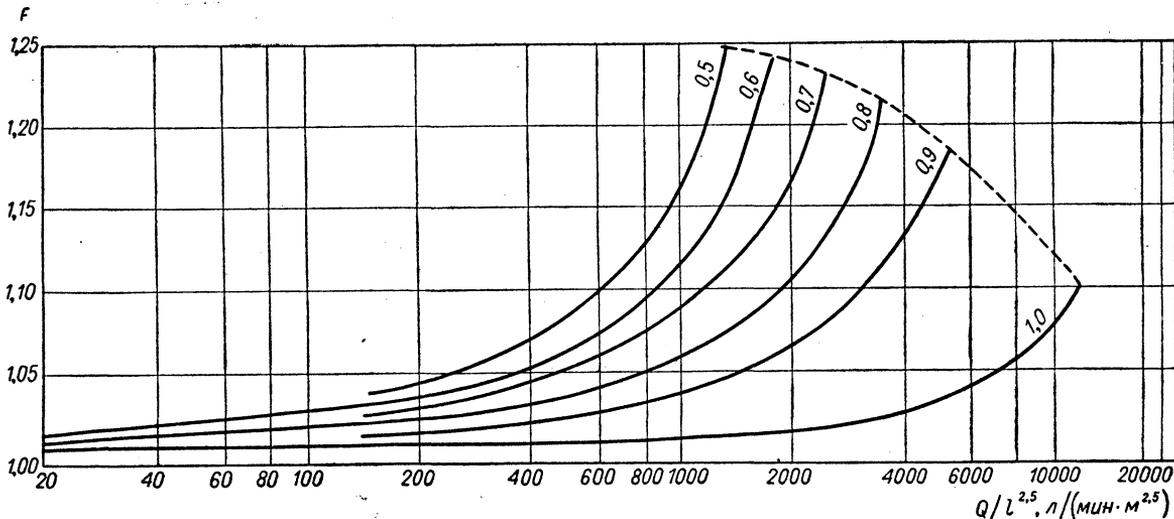


Рис. I-14. Поправочный коэффициент F на эффективную длину перелива (B o l l e s, Petrol Processing, Febr., 1956).

Каждая кривая соответствует постоянному отношению длины перелива l к диаметру колонны. Пунктир ограничивает рекомендуемую область применения.

Градиент уровня жидкости на колпачковых тарелках выше, чем на ситчатых, так как колпачки создают много местных сопротивлений потоку жидкости.

Для расчета градиента уровня жидкости на колпачковых тарелках ΔH получено уравнение¹:

$$\begin{aligned} \sqrt{\Delta H} \left\{ \Delta H \left[0,0234 \left(\frac{r}{2} - 1 \right) + \frac{0,0156}{1 + 0,25\beta^2} \right] + \right. \\ \left. + 0,0234r [d_0 + s(\alpha - 1)] \right\} = \\ = \frac{r\sqrt{r}\sqrt{1 + 0,066\beta^2}Q}{0,095Cl} \text{ мм столба жидкости} \quad (\text{I-10}) \end{aligned}$$

где r — число рядов колпачков, перпендикулярных направлению движения жидкости; β — отношение расстояния между рядами колпачков к минимальному расстоянию между колпачками; d_0 — высота слоя светлой жидкости у перелива, мм; s — расстояние от нижнего обреза колпачка до поверхности тарелки, мм; α — отношение общего свободного расстояния между паровыми патрубками в смежных рядах к общему свободному расстоянию между колпачками в смежных рядах; Q — плотность орошения, л/мин; C — константа градиента уровня жидкости; l — общее свободное расстояние между колпачками нормально к направлению потока жидкости, мм.

Значения константы C для $UV\sqrt{\rho_p} = 1,34$ приведены на рис. I-15, а поправочные множители¹ для других значений $UV\sqrt{\rho_p}$ на рис. I-16. Упрощенный способ определения градиента уровня жидкости на колпачковой тарелке² дан на рис. I-17.

Кэмп и Пайл³ показали, что для колпачковых тарелок при нагрузках по жидкости ниже $30 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м длины переливного порога})$ влияние величины $F_{пр}$ ⁴ (или $U_{пр}\sqrt{\rho_p}$, где $U_{пр}$ — скорость пара в прорезях) на гидравлический градиент незначительно, а увеличение

уровня жидкости на тарелке приводит к повышению градиента уровня жидкости.

Влияние градиента уровня жидкости на стабильность работы ситчатых тарелок менее существенно, кроме тех случаев, когда длина пути жидкости велика. Хьюмарк и О'Коннелл⁴ получили корреляцию для расчета градиента уровня жидкости на ситчатых тарелках, основываясь на работах Клейна. Хотя в уравнение не вошла скорость пара, в неявной форме ее влияние учтено фактором трения, зависящим от степени перемешивания жидкости на тарелке. Градиент уровня жидкости рассчитывается по уравнению:

$$\frac{\Delta H}{L} = 100f \frac{U_{пен}^2}{R_r} \text{ мм/м} \quad (\text{I-11})$$

где $R_r = \frac{bL_0}{b + 2L_0}$ — гидравлический радиус, м; $L_0 = 2(\Delta h + h + 0,5\Delta H)$; Δh и h выражены в мм столба жидкости, b — усредненная ширина тарелки, м; $U_{пен} = \frac{Q_{ж}}{3600L_0\rho_{пен}}$ — скорость пены, м/сек; $Q_{ж}$ — количество жидкости, $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м средней ширины тарелки})$; L — длина секции барботажа, м.

¹ Davies, Ind. Eng. Chem., 39, 777 (1947).

² Zenz, Petrol. Refiner, 32 (1), 150 (1953).

³ Kemp, Pyle, Chem. Eng. Progr., 45, 435 (1949).

⁴ Hughmark, O'Connell, Chem. Eng. Progr., 53 (3), 127M (1957).

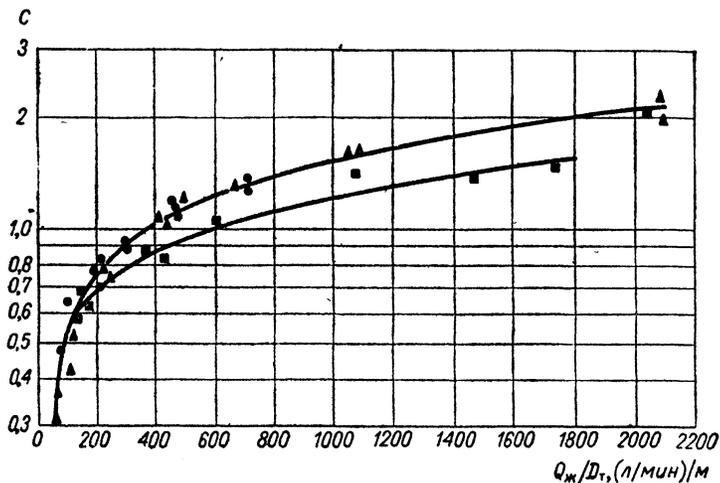


Рис. I-15. Зависимость константы градиента уровня жидкости на тарелке C от расхода жидкости $Q_{ж}$, отнесенного к средней ширине потока на тарелке, при $U\sqrt{\rho_n} = 1,34$ (м/сек) $\sqrt{\text{кг/м}^3}$:
 ● — данные Гуда и др.; ▲ — данные компании Standard Oil of New Jersey (на колпачках нет удерживающих перегородок); ■ — данные той же компании (колпачки с перегородками).

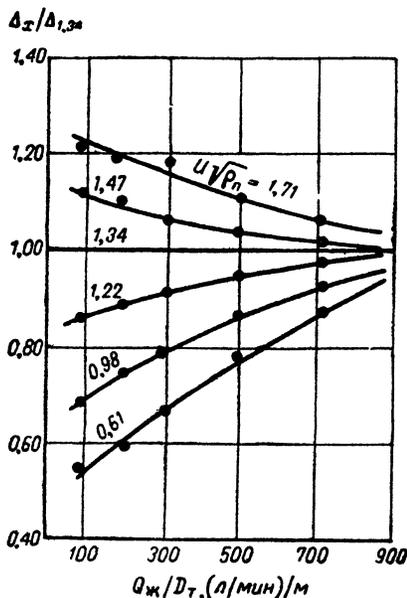


Рис. I-16. Поправочный множитель константы градиента уровня жидкости C при $U\sqrt{\rho_n} \neq 1,34$ (м/сек) $\cdot \sqrt{\text{кг/м}^3}$.

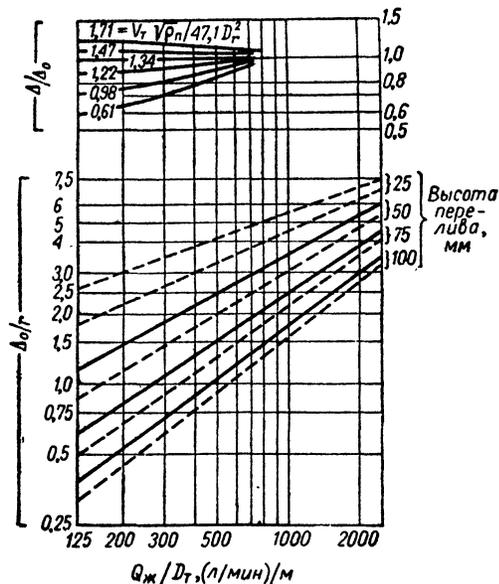


Рис. I-17. График для определения градиента уровня жидкости на тарелке:

Δ — градиент уровня жидкости, мм; Δ_0 — градиент без поправки на скорость пара, мм; V_T — нагрузка тарелки (колонны) по пару, м³/мин; ρ_n — плотность пара, кг/м³; D_T — диаметр тарелки (колонны), м; $Q_{ж}$ — количество жидкости, перетекающее через перегородку, литр/мин; γ — число рядов колпачков, перпендикулярных движению жидкости; — колпачки опираются на поверхность тарелки; - - - между плоскостью тарелки и нижним обрезом колпачка расстояние 25 мм.

Как видно из рис. I-18, фактор трения $f = 0,47Re^{-1}$ для слабого перемешивания, когда $F_{пр} < 10,8$ (где $F_{пр} = U_{пр} \sqrt{\rho_{п}}$, как определено выше) и $f = 1,95Re^{-1}$ для хорошего перемешивания, когда $F_{пр} > 10,8$ (где $Re = \frac{R_{г} U_{пены} \rho_{ж}}{\mu_{ж}}$).

Высота сливного патрубку. Это один из факторов, ограничивающих пропускную способность колонны. Недостаточная высота сливного патрубку может вызвать

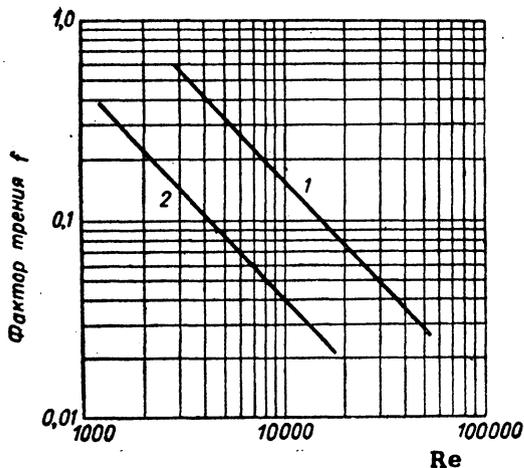


Рис. I-18. Фактор трения f для определения градиента уровня жидкости на ситчатых тарелках в зависимости от Re :

1 — хорошее перемешивание; 2 — слабое перемешивание.

захлебывание. Стабильный режим работы обеспечивается при соблюдении общего правила: длина сливного патрубку должна быть равна удвоенной высоте светлой жидкости в нем.

Максимальная высота слоя жидкости в сливном патрубку определяется суммарным падением давления парового потока и уровнем жидкости на тарелке, как показано на рис. I-13.

Для колпачковых тарелок высота жидкости в сливном патрубку составляет:

$$h_2 + h + 2 \Delta h + h_1 + h_3 + 1,5 \Delta H \quad (I-12a)$$

а для ситчатых:

$$h_2 + 2(h + \Delta h) + h_3 + 1,5 \Delta H \quad (I-12b)$$

Сопротивление сухой тарелки. Сопротивление ситчатых и колпачковых тарелок обусловлено потерями напора при сжатии и расширении струи пара в распределительных диспергирующих устройствах. Для ситчатых тарелок оно может быть определено по обычному уравнению для одиночного отверстия:

$$h_2 = CU_{отв}^2 \frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}} \quad (I-13)$$

где $U_{отв}$ — скорость пара в отверстиях, м/сек.

Коэффициент сопротивления отверстия зависит от отношения его диаметра $d_{отв}$ к толщине тарелки t и от

свободного сечения тарелки. Путем обобщения данных по сопротивлению ситчатых тарелок с диаметром отверстий 5 мм установлено влияние этих переменных на коэффициент сопротивления отверстия²:

$$h_2 = 0,612 \left(\frac{U_{отв}}{C_{отв}} \right)^2 \frac{\rho_{п}}{\rho_{ж}} \quad (I-14)$$

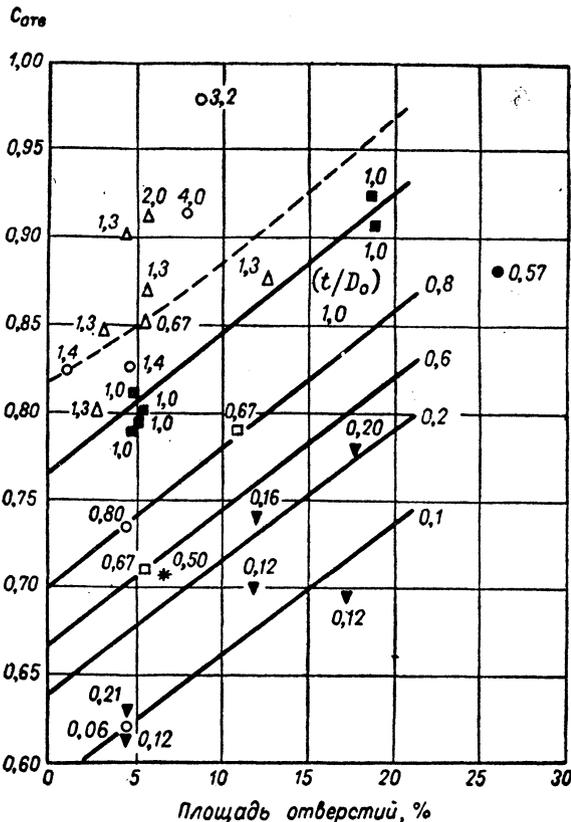


Рис. I-19. Коэффициент $C_{отв}$ для определения сопротивления сухих ситчатых тарелок (диаметр отверстий 4,8 мм).

Пунктиром показана зависимость $C_{отв}$, рассчитанного из суммы потерь на сжатие и расширение потока при прохождении его через отверстие в тарелке большой толщины. Сплошные линии проведены для постоянных отношений $t/d_{отв}$.

Точка	Автор	Точка	Автор
▼	Arnold et al.	□	Atkins
■	Hunt et al.	×	Jones, Pyle
○	Kamer	●	Lerner
△	Mayfield et al.		

¹ Arnold, Plank, Schoenborn, Chem. Eng. Progr., 48, 633 (1952). — Hunt, Hanson, Wilke, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 441 (1955). — Jones, Pyle, Chem. Eng. Progr., 51, 424 (1955). — Kamer, Chem. Eng. Japan, 18, 108 (1954). — Mayfield, Rasmussen, Lee, Ind. Eng. Chem., 44, 2238 (1952).

² Leibson, Kelly, Bullington, Petrol. Refiner, 36 (2), 127 (1957).

где $C_{отв}$ — коэффициент, зависящий от отношения толщины тарелки к диаметру отверстия (рис. I-19).

Сопротивление сухой ситуатой тарелки в зависимости от скорости, отнесенной к рабочей площади¹, для $0,5 < \frac{t}{d_{отв}} < 0,7$ показано на рис. I-20.

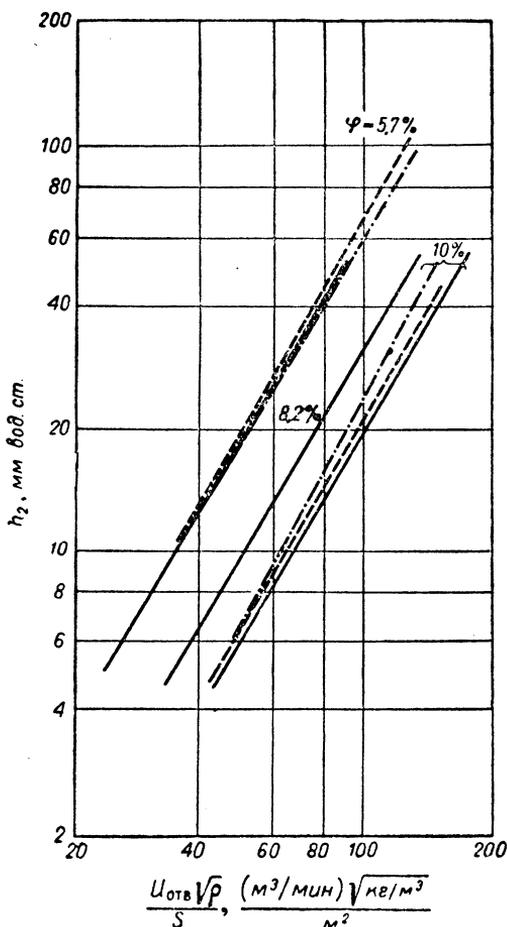


Рис. I-20. Сопротивление сухих ситуатых тарелок. Свободное сечение φ рассчитано по отношению только к рабочей площади тарелки.

Диаметр отверстий: - - - 3,2 мм; — 4,3 мм; - · - · 6,35 мм.

Сопротивление колпачковой тарелки определяется потерями напора на сжатие потока в паровом патрубке, на изменение направления и сужение потока в кольцевом пространстве между патрубком и колпачком и на расширение при истечении через прорези. Уравнения для расчета имеют следующий вид².

Потери напора в паровом патрубке $h_{п.п}$:

$$h_{п.п} = 1,2 \frac{d_{п.п}}{\rho_{ж}} (U_{п.п} \sqrt{\rho_{п.п}})^{2,09} \quad (I-15)$$

Потери напора при повороте потока:

$$h_{пов} = \frac{647}{\rho_{ж}} \left[U'_{п.п} \sqrt{\rho_{ж}} \left(\frac{d_{п.п}}{d_{к.п}} \right)^2 \right]^{1,71} \quad (I-16)$$

Потери напора при истечении через прорези:

$$h_{пр} = \left(\frac{25 \cdot 400 V_{пр}}{n \omega \sqrt{\rho_{ж} \rho_{п}}} \right)^{2/3} \quad (I-17)$$

В уравнениях (I-15)–(I-17) $d_{п.п}$ — внутренний диаметр патрубка, мм; $d_{к.п}$ — внутренний диаметр колпач-

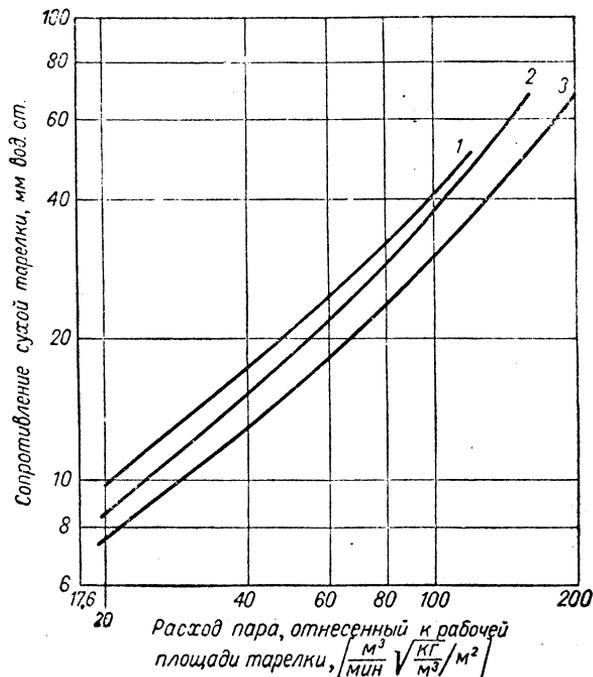


Рис. I-21. Сопротивление сухих колпачковых тарелок:

Кривая	Диаметр колпачка, мм	Расстояние между колпачками, мм
1	150	200
2	100	150
3	75	114

Прорези занимают 50% длины окружности колпачков.

ка, мм; $U_{п.п}$ — скорость пара в патрубке, м/сек; $U'_{п.п}$ — скорость пара в наименьшем поперечном сечении кольцевого пространства между патрубком и колпачком, м/сек; $V_{пр}$ — расход пара на одну прорезь, м³/ч; n —

¹ Teller, Allen's Handbook for Oil and Chemical Industries, Philadelphia, 1958.

² Dauphin, Sc. D. Thesis, M. I. T., 1939.

число прорезей в колпачке; h — потери напора, мм столба жидкости; w — ширина прорези, мм.

В связи с тем, что все слагаемые потерь напора зависят от расхода парового потока и квадратного корня из плотности пара, сопротивление сухой тарелки в виде функции от произведения этих величин¹ дается на рис. I-21.

Унос

Унос в тарельчатых колоннах оказывает отрицательное влияние на среднюю эффективность аппаратов. Многие корреляции для предельной скорости пара в колоннах даны относительно максимально допустимого уноса.

Полученные эмпирические зависимости связывают скорость пара в свободном сечении колонны с эффективным расстоянием между тарелками и уносом, хотя имеется предположение, что на унос влияют также скорость пара в отверстиях или прорезях и скорость потока жидкости по тарелке².

Обширное исследование уноса на ситчатых тарелках³ позволило установить, что

$$e = 2,58 \cdot 10^{-5} \left(\frac{U_c}{H_{эф}} \right)^{3,2} \quad (I-18)$$

где e — унос, кг жидкости/кг пара; U_c — скорость пара в свободном сечении колонны, м/сек; $H_{эф}$ — эффективное расстояние между тарелками (расстояние между тарелками минус 2,5-кратная высота светлой жидкости на тарелке), м.

По данным ряда исследователей⁴, унос на колпачковых тарелках приблизительно в 3 раза больше, чем на ситчатых, поэтому:

$$e \approx 7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{U_c}{H_{эф}} \right)^{3,2} \quad (I-19)$$

Джонс и Пайл⁵ считают, что отношение уносов на колпачковых и ситчатых тарелках имеет экстремум (рис. I-22). Это отношение, по их оценке, изменяется в пределах от 6 до 12.

Эмпирическое уравнение, обобщающее данные по уносу в колонне диаметром 0,375 м для колпачков размером 70, 100, 108, 139 и 145 мм, имеет следующий вид⁶:

$$\lg \frac{e}{f(h + \Delta h - b + w)} = -4,67 + \frac{0,693}{H_{м.т}} + 35,2 U_c \frac{\rho_c}{\Delta p} \quad (I-20)$$

где e — унос, кг/мин; f — рабочая площадь тарелки, м²; h — высота сливного порога, мм; Δh — превышение уровня жидкости над сливным порогом, мм; b — расстояние от верхней кромки прорези до поверхности тарелки, мм; w — ширина прорези, мм; $H_{м.т}$ — расстояние между тарелками, м; U_c — скорость пара в свободном сечении колонны, м/сек; $\Delta p = \rho_{ж} - \rho_{п}$.

На основе обобщения большинства накопленных ранее данных по уносу в колоннах с колпачковыми та-

релками предложена зависимость¹ (рис. I-23), связывающая унос со скоростью пара в свободном сечении колонны U_c , физическими свойствами системы и расстоянием между тарелкой и уровнем пены на нижней лежащей тарелке $H'_{эф}$.

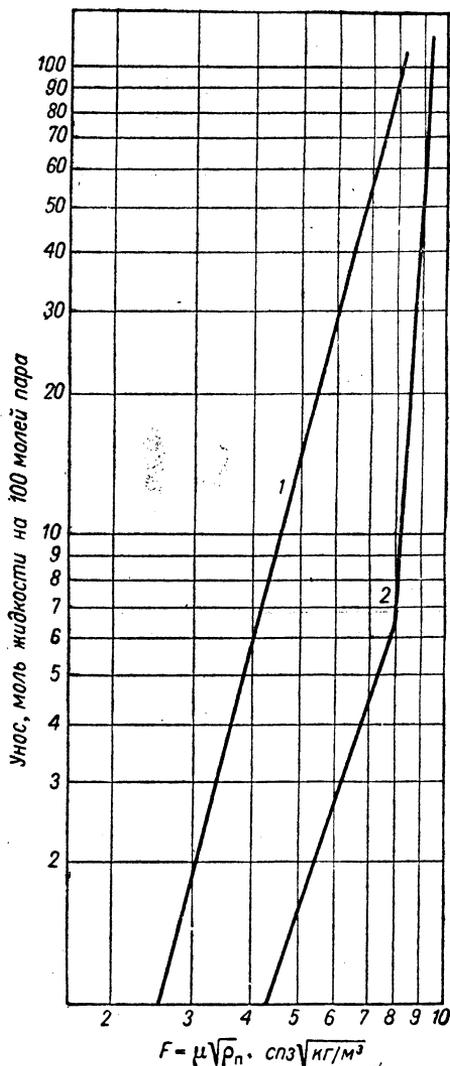


Рис. I-22. Унос на колпачковых и ситчатых тарелках ($H_{м.т} = 450$ мм):

1 — тарелка с колпачками диаметром 107 мм и расстоянием между ними 150 мм, $\psi = 13,5\%$;
2 — ситчатая тарелка, $\psi = 6,7\%$, $d_{отв} = 3,2$ мм.

Для колонн с эффективным расстоянием между тарелками менее 100 или более 400 мм эти уравнения следует применять осторожно, так как при этих расстояниях, очевидно, унос изменяется не так значительно в зависимости от $U_c/H'_{эф}$. Это явление объяс-

¹ Teller, там же.

² Cheng, Teller, Am. Inst. Chem. Engrs J., 7, 282 (1961).

³ Hunt, Hanson, Wilke, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 441 (1955).

⁴ Atteridge et al., Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 3 (1956). — Brooks et al., Petrol. Eng., vol. C-32, August 1955.

⁵ Jones, Pyle, Chem. Eng. Progr., 51, 424 (1955).

⁶ Simkin, Strand, Olney, Chem. Eng. Progr., 50, 565 (1954).

¹ Eduljee, Brit. Chem. Eng., 3 (9), 474 (1958).

няется тем, что при больших расстояниях между тарелками частицы настолько малы, что силы сопротивления преобладают над силами тяжести. При малых расстояниях тяжелые частицы разгоняются до достаточно высоких скоростей, так что силы тяжести и силы сопротивления оказывают относительно малое влияние¹ (рис. I-24).

допущении, что разность изменения составов на последующих тарелках остается постоянной.

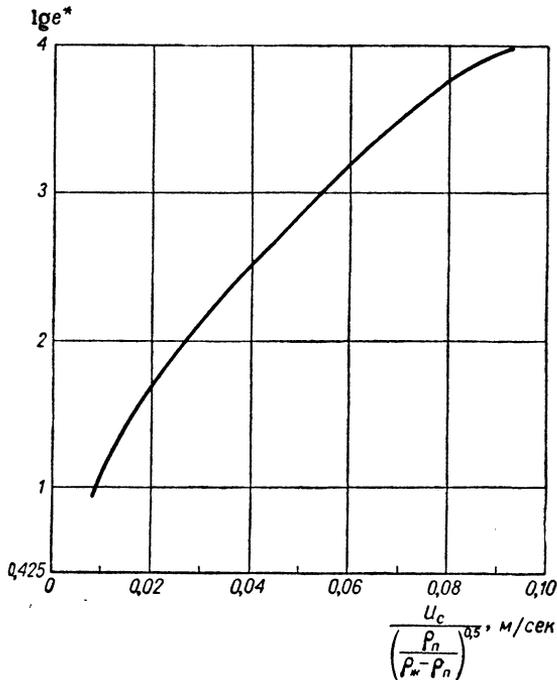


Рис. I-23. Унос на колпачковых тарелках:

$e^* = e (H'_{эф})^{2.59} \mu \sigma^{0.4}$; e — унос, $кг/(ч \cdot м^2)$ свободного сечения тарелки; e^* — унос с поправкой на свойства жидкости и расстояние между тарелками; σ — поверхностное натяжение жидкости, $дин/см$; μ — вязкость жидкости, $спз$.

Кольборн² провел анализ режимов работы колонны, используя в качестве основы для расчетов влияние уноса на эффективность тарелки по уравнению:

$$E = \frac{E_{м.п}}{1 + (eE_{м.п}/R)} \quad (I-21)$$

где E — к.п.д. тарелки с учетом влияния уноса (эффективности); $E_{м.п}$ — к.п.д. по Мэрфри (без уноса); e — унос, $моль жидкости/моль пара$; $R = L/G$; L — поток жидкости; G — поток пара (газа).

Кольборн показал также, что экономическому оптимуму соответствует $e = R/3E_{м.п}$. Допустимый унос при этом условии настолько высок, что факторы, обеспечивающие стабильную работу колонны, начнут преобладать до того, как будет достигнута эта величина уноса.

Кольборн указывает на ограниченную область применения уравнения (I-21), так как оно получено при

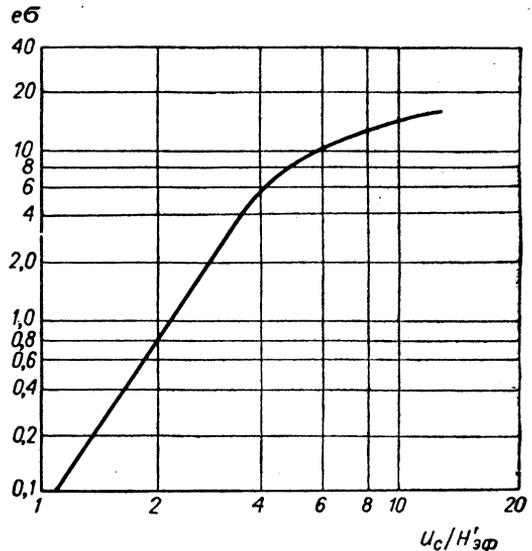


Рис. I-24. Унос на колпачковых тарелках:

e — унос, $кг жидкости/кг пара$; σ — поверхностное натяжение, $дин/см$; U_c — скорость пара в свободном сечении колонны, $м/сек$; $H'_{эф}$ — расстояние между верхним уровнем пены и вышележащей тарелкой, $м$.

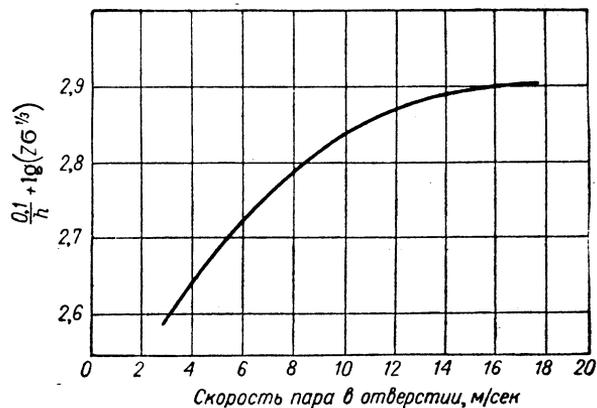


Рис. I-25. Зависимость высоты пены от скорости пара в отверстии:

h — высота слоя светлой жидкости, $см$; z — высота пены, $см$; σ — поверхностное натяжение, $дин/см$.

Более точное уравнение, учитывающее влияние уноса, требует вести расчет от тарелки к тарелке и может быть представлено следующим образом:

$$x_{n+2} = x_{n+1} + \frac{E_{м.п}/R}{1 + (eE_{м.п}/R)} [y_{n+1}^* - Rx_{n+1} - (1-R)x_D] \quad (I-22)$$

где x — мольная доля легколетучего компонента в жидкой фазе бинарной смеси или многокомпонентной,

¹ Bubble Tray Design Manual, vol. 58, 1958.

² Colburn, Ind. Eng. Chem., 28, 526 (1936).

замененной эквивалентной бинарной смесью; y^* — концентрация (в мольных долях) пара, равновесного с жидкостью концентрации x ; $E_{м.п}$ — к. п. д. по Мэрфри; e — унос, моль жидкости/моль пара; $R=L/G$; n — номер тарелки; индекс D означает дистиллят.

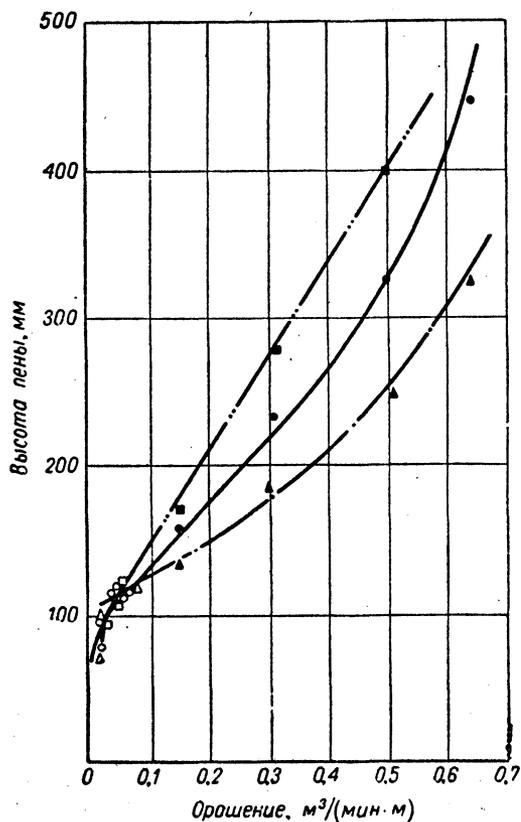


Рис. 1-26. Зависимость высоты пены от орошения:

Система	Условия опыта	$F = U_c \sqrt{\rho_{п}}$		
		0,704	1,125	1,59
Метилэтилкетон — вода	Колонна	△	○	□
Воздух — вода	Одиночная тарелка	▲	●	■

Тарелки имели защищенный перелив высотой 75 мм.

Сравнение числа тарелок зоны ректификации при дистилляции смеси бензол — толуол, вычисленных по обоим уравнениям, показывает, что при использовании уравнения E ошибка равна 18%¹.

Ценц², используя эффективность по Кольборну, установил, что оптимальная величина уноса $e=0,175$ L/G. Это обобщение следует применять с осторожностью, ввиду того что в реальных условиях требуется уста-

навливать дополнительные тарелки для компенсации влияния уноса. Как следует из уравнения Кольборна:

$$\frac{dE}{de} = \frac{-E_0/(L/G)}{\{1 + [eE_0/(L/G)]\}^2} \quad (I-23)$$

Кроме того, обобщение Ценца для определения оптимума получено применительно к конструкциям из

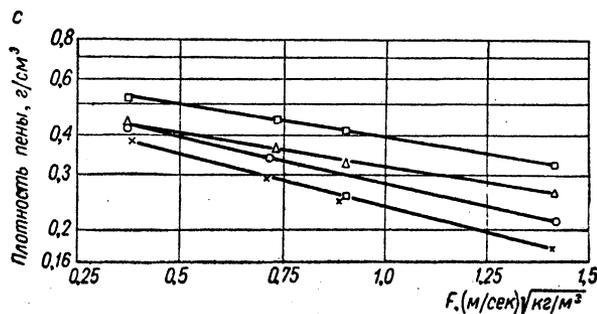
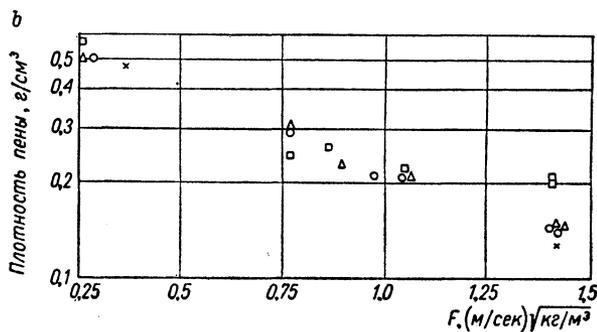
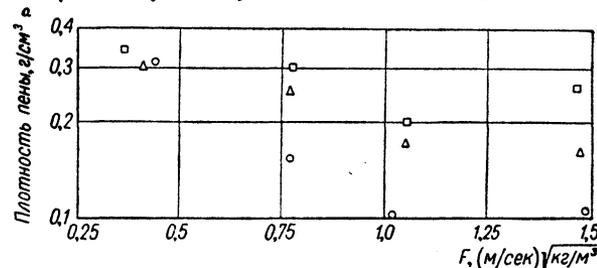


Рис. 1-27. Плотность пены на системе воздух — вода:

Позиция	Тарелка	Высота перелива, мм	Высота перегородки, мм
a	Колпачковая	50	63
b	»	75	88
c	Ситчатая	75	88

Орошение [в м³/(мин·м)]: × — 0,165; ○ — 0,33; △ — 0,495; □ — 0,655.

углеродистой стали и с использованием эмпирического (включающего экстраполяцию) уравнения Симкина для расчета уноса на колпачковых тарелках.

Эта зависимость дает более высокие величины уноса по сравнению с данными, представленными на рис. 1-23.

¹ Danly, частное сообщение.

² Zenz, Petrol. Refiner, 36 (3), 179 (1957).

Пена. Пена, увеличивая поверхность и время контакта фаз, интенсифицирует процесс массопердачи. С другой стороны, она уменьшает эффективное расстояние между тарелками, что приводит к увеличению уноса. В предельном случае пена целиком заполняет пространство между тарелками (так называемое затопление) и служит причиной совершенно нестабильной работы тарелки.

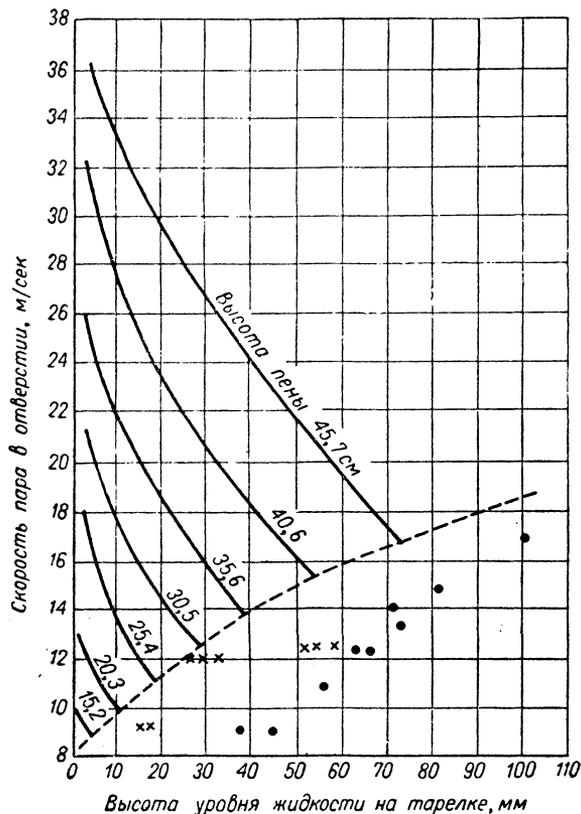


Рис. I-28. Область рабочих режимов ситчатой тарелки:

— экспериментальная высота пены и ---- экспериментальный нижний предел просачивания жидкости ($\psi = 19,6\%$, $t = 3,2$ мм);

× — данные Арнольда и др. ($\psi = 7,5\%$, $t = 0,74$ мм; все отверстия работают); ● — данные Мейфильда по предельной скорости газа, соответствующей просачиванию жидкости ($\psi = 4,5\%$, $t = 6,4$ мм, $d_{отв} = 6,4$ мм; почти все отверстия работают).

В корреляцию для расчета высоты пены в зависимости от скорости пара в отверстиях¹ (рис. I-25) введена высота слоя светлой жидкости. Однако применение этой зависимости для слоев светлой жидкости (над диспергирующим устройством) менее 12 мм сомнительно, так как в этом случае происходит «инжективное» или дробление жидкости струями газа, что приводит к подавлению ячеистого пенообразования. При этом увеличивается унос.

Влияние скорости жидкости на высоту пены изучено менее подробно². Зависимость для систем с различ-

ным поверхностным натяжением приведена на рис. I-26. Высота пены увеличивается со скоростью жидкости на тарелке.

Плотность пены изменяется обычно в пределах 0,2—0,5 г/см³. От нее зависит время контакта фаз и высота пены. Плотность пены на колпачковых тарелках не зависит от скорости жидкости, на ситчатых тарелках — возрастает с увеличением скорости жидкости. Как и следовало ожидать с увеличением скорости газа плотность пены уменьшается¹ (рис. I-27).

Просачивание и перелив. Просачиванием на ситчатых тарелках называется утечка жидкости через отверстия у сливной перегородки в противотоке к потоку пара. Просачивание происходит в начальной по ходу жидкости части тарелки, что снижает эффективность тарелки. Минимальная скорость пара в отверстиях, при которой наступает просачивание жидкости, определялась рядом исследователей² для тарелок с площадью свободного сечения $\psi < 10\%$. При большей площади свободного сечения просачивание происходит в интервале скоростей, превосходящих на 40% критические³ (рис. I-28).

Перелив через паровые патрубки на колпачковых тарелках аналогичен просачиванию, но происходит преимущественно при чрезмерной нагрузке тарелки по жидкости. При большом градиенте уровня жидкости на тарелке, первый по ходу жидкости ряд колпачков выключается из работы и, если уровень жидкости больше высоты паровых патрубков, жидкость будет стремиться перетечь через паровой патрубок на нижележащую тарелку.

Эффективность тарелок

Эффективность тарелок до сих пор определяется эмпирическими методами. Однако новейшие исследования привели к лучшему пониманию работы тарелки.

Для определения эффективности массопердачи на тарелке обычно используют к. п. д. по Мэрффи. Однако более точно она выражается с помощью достигаемого числа единиц переноса. Локальный к. п. д. Мэрффи связан с числом единиц переноса следующим соотношением:

$$E_{o,r} = 1 - \exp(-N_{o,r}) \quad (I-24)$$

где $E_{o,r}$ — локальный к. п. д., рассчитанный по изменению состава газа (пара); $N_{o,r}$ — число единиц переноса, отнесенное к газовой фазе.

Таким образом, определение эффективности тарелки современными методами проводится по следующей схеме:

- 1) рассчитываются числа единиц переноса в паровой и жидкой фазах;
- 2) определяется локальная эффективность;
- 3) определяется эффективность тарелки;
- 4) оценивается влияние уноса;
- 5) рассчитывается эффективность колонны.

Взаимодействие пара и жидкости на тарелке происходит в трех зонах: 1) при образовании, коалесценции и подъеме пузырьков в слое жидкости; 2) в зоне развитой турбулентности при прорыве пара через поверхность жидкости, сопровождаемом быстрым изменением межфазовой поверхности в жидкой фазе; 3) в пене, образующейся в сплошной газовой фазе.

¹ American Institute of Chemical Engineers Research Committee, 4 ежегодное сообщение, 1958.

² Eduljee, Brit. Chem. Eng. 3 (1), 14 (1958). — Mayfield, Church, Green, Lee, Rasmussen, Ind. Eng. Chem., 44, 2238 (1952).

³ Zenz, Petrol. Refiner, 33 (2), 99 (1954).

¹ Eduljee, Brit. Chem. Eng., 4 (6), 320 (1959).

² Foss, Gerster, Chem. Eng. Progr., 52 (1), 28J (1956).

Тарельчатые колонны широко используются в промышленности в основном благодаря слабой зависимости их эффективности от скорости пара (рис. I-29). В связи с этим последним обстоятельством во многие из первоначальных зависимостей не включена скорость пара как переменная величина, и поэтому они, как правило, обладают низкой чувствительностью по отношению к рабочим параметрам. Эти зависимости не очень точно интерпретируют явления в процессе массопередачи на тарелке, вследствие чего имеют ограниченное применение.

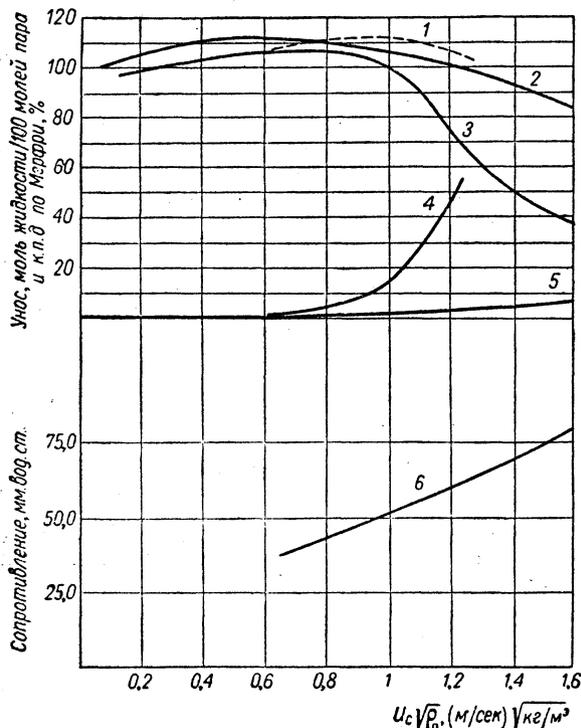


Рис. I-29. К. п. д. по Мэрфи и сопротивление тарельчатой дистилляционной колонны на системе этанол — вода (Peavy, Baker, Ind. Eng. Chem., 29, 1056 (1937)):

1 — к. п. д., рассчитанный без учета уноса, и 3 — к. п. д., полученный экспериментально ($H_{M,T} = 300$ мм); 2 — к. п. д. тарелки (расчетная и экспериментальная кривые совпадают, $H_{M,T} = 450$ мм); 4 и 5 — унос ($H_{M,T} = 300$ и 450 мм соответственно); 6 — сопротивление тарелки (для обоих значений $H_{M,T}$). Статический уровень жидкости на тарелках 25 мм.

Зависимости для определения эффективности тарелок делятся на 1) общие, 2) основанные на массопередаче в сплошной жидкой фазе и 3) основанные на массопередаче в сплошной жидкой и сплошной паровой фазах.

Общие корреляции. При анализе режимов работы бензиновых колонн¹ удалось связать эффективность тарелки с вязкостью питающей жидкости μ и установить, что $E_{M,P}$ пропорционален $\mu^{-0,9}$. Влияние относительной летучести ключевого компонента α на эффективность

(которое проявляется в относительном сопротивлении паровой и жидкой фаз) установлено¹ при сравнении данных по эффективности промышленных и лабораторных колонн относительно величины $\alpha\mu$. Корреляция соответствует экспериментальным данным с точностью $\pm 10\%$ (рис. I-30), причем 90% точек ложатся на кривую с разбросом $\pm 16\%$.

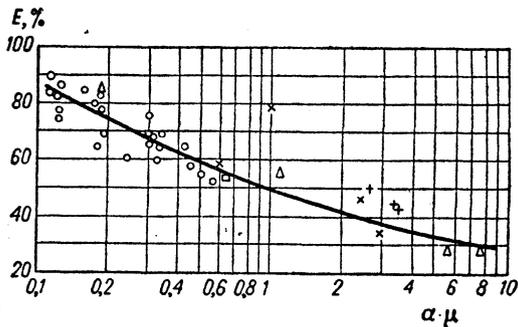


Рис. I-30. Влияние относительной летучести ключевого компонента α и вязкости питания μ на среднюю эффективность E тарелки разделительных колонн:

○ — промышленная углеводородная разделительная колонна; △ — промышленная колонна разделения хлорпроизводных углеводородов; + — промышленная колонна разделения спиртов; × — лабораторная колонна ректификации этилового спирта; □ — прочие данные.

Корреляции, основанные на массопередаче в сплошной жидкой фазе. Вальтер и Шервуд² при обобщении данных, полученных на лабораторной колонне, получили следующее выражение:

$$E_{M,P} = 1 - \exp \left[- \frac{z}{8,6 (2,5 + 5,92/PN) \mu^{0,63} \omega^{0,33}} \right] \quad (I-25)$$

или

$$N_{0,r} \approx \frac{z}{\mu^{0,63} \omega^{0,33}} \quad (I-26)$$

где z — высота слоя жидкости от середины прорезей, мм; ω — ширина прорези, мм; μ — вязкость жидкости, спз; N — константа Генри, кмоль/(м³ · атм); P — рабочее давление, атм.

Эта зависимость (среднее отклонение $\pm 22\%$) установлена для следующих пределов изменения параметров: $25 < z < 45$ мм; $0,7 < \mu < 22$ спз.

Существенным фактом, установленным в этой работе, является то, что ширина прорези слабо влияет на эффективность.

Было сделано предположение³, что при неустановившемся процессе переноса массопередача в сплошную жидкую фазу как в газе, так и в жидкости происходит в соответствии с теорией проникания. Массообмен происходит между сферическими пузырями и жидкой фазой. Предложенные уравнения имеют вид:

$$k_r = \frac{a}{3t_r} \ln F \quad (I-27a)$$

¹ O'Connell, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 42, 741 (1946).

² Walter, Sherwood, Ind. Eng. Chem., 33, 403 (1941).

³ Geddes, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 42, 79 (1946).

где $F = f \frac{D_r \pi^2 t}{a^2}$ (рис. 1-31)

$$k_{ж} = 0,345 \left(\frac{D_{ж}}{t_{ж}} \right)^{1/2} \quad (I-27b)$$

$$K_{o.r} = \frac{1}{k_r} + \frac{1}{R k_{ж}} \quad (I-28a)$$

$$R = ZHT \quad (I-28b)$$

$$\ln(1 - E_{o.r}) = \frac{3K_{o.r} t}{a} \quad (I-29)$$

где $a = \left[\frac{\sigma(h_1 + \omega)}{\rho_{ж} - \rho_r} \right]^{1/3}$ — радиус пузыря, эквивалентный радиусу сферического пузыря, м; D_r — коэффициент диффузии, м²/сек; $E_{o.r}$ — локальная эффективность,

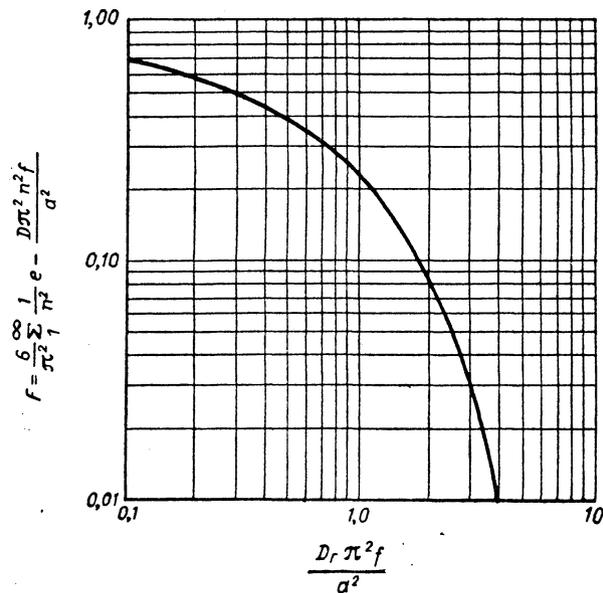


Рис. 1-31. К уравнению (I-27a).

рассчитанная по изменению состава газовой фазы; $h_1 = 0,74 \left[\left(\frac{V}{\omega} \right)^{2/3} \left(\frac{\rho_r}{\rho_{ж} - \rho_r} \right)^{1/3} \right]$ — высота открытия прорезей при рабочих условиях, м; Δh — превышение уровня жидкости над сливным порогом, м; $h = \Delta h + h' + 0,5h_1$; h' — расстояние от верхнего обреза прорези до верхнего края сливного порога, м; H — константа Генри, кмоль/(м³·атм); k — коэффициент массоотдачи, м/сек; K — коэффициент массопередачи, м/сек; n — число пузырей за время t ; $t = \frac{h}{1,9a^{0,37}}$ — время подъема газовой пузыря в слое жидкости на тарелке, сек; $t_{ж} = \frac{2at}{h}$ — среднее время контакта жидкости с пузырем, сек; T — температура, °К; V — количество газа при нормальных условиях за время t , м³; Z — коэффициент сжимаемости газа; ω — ширина прорези, м.

Эти уравнения дают хорошее совпадение с опытными данными¹.

По предположению Баковского², пар в жидкой фазе движется не в виде отдельных пузырей, а сплошными струями, причем перенос вещества в жидкой сплошной фазе осуществляется так же, как и в пленочных колоннах постоянного диаметра (колонны со смоченными стенками).

Уравнение для локальной эффективности имеет вид:

$$\lg \frac{1}{1 - E_r} = \frac{0,34hT^{0,5}}{M^{0,5}U_{пр}^{0,25}P^{0,25}} \quad (I-30)$$

где $U_{пр}$ — скорость пара в прорезях, см³/сек; T — температура, °К; h — высота уровня жидкости над прорезью плюс высота открытия прорези h_1 , см; $h_1 = 0,038(MP/T\rho_{ж})^{1/3}(U_{пр}/\omega)^{1/3}$ (для прямоугольной прорези), см; M — молекулярный вес пара; P — давление, атм; ω — ширина прорези, см.

Уравнение дает удовлетворительное совпадение с опытными данными³. Оно использовалось для обработки опытных данных, полученных при статических уровнях жидкости над прорезью в пределах 6—30 мм. Превышением уровня жидкости над сливным порогом и градиентом уровня жидкости на тарелке пренебрегали, так как было установлено, что активный уровень жидкости на тарелке обычно меньше высоты сливного порога за счет высокой турбулизации потока.

Небольшое косвенное влияние ширины прорези, отраженное в уравнении (I-30) согласуется с выводами Вальтера и Шервуда [см. уравнение (I-25)].

Баковский допускает влияние вязкости жидкости на эффективность, но указывает, что оно учитывается введением в уравнение молекулярного веса пара.

При исследовании влияния вязкости жидкости на массопередачу в тарельчатых колоннах⁴ установлено, что при $\mu_{ж} > 4$ спз:

$$\frac{N_{r1}}{N_{r2}} = \left(\frac{Sc_1}{Sc_2} \right)_r \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)_ж^{0,6} \quad (I-31)$$

При $\mu_{ж} < 4$ спз существенного влияния вязкости жидкости не обнаружено, Sc — критерий Шмидта.

Корреляции, основанные на массопередаче в сплошной паровой и сплошной жидкой фазах. Впервые возможность массопередачи в зоне пены на тарелке была рассмотрена Джерстером и др.⁵ Идеи, высказанные ими, были развиты⁶, и получена зависимость для массопередачи в пене. Эффективная длина зоны контакта пара как высота пены, равная $z_{пен} = z_{ж}/(1 - \varepsilon)$ [где $z_{ж}$ — уровень жидкости на тарелке, ε — коэффициент газонаполнения (доля пустот в пене)].

Корреляция данных по газовой фазе, полученная на основании теории проникания, имеет вид:

$$\ln \frac{1}{1 - E_r} = \frac{(Az_{ж}/r^{1,5})(D_r/U)^{0,5} [e^{0,5}/(1 - \varepsilon)]}{1 + m(D_r/D_{ж})^{0,5}(C_r/C_{ж})} \quad (I-32)$$

где A — постоянный множитель; D_r и $D_{ж}$ — коэффициенты диффузии, м²/ч; E_r — эффективность по

¹ Carey et al., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 30, 504 (1934). — Walter, Sherwood, Ind. Eng. Chem., 33, 403 (1941).

² Bakowski, Chem. Eng. Sci., 1, 266 (1957).

³ Carey et al., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 30, 504 (1934). — Langdon, Keyes, Ind. Eng. Chem., 35, 464 (1943).

⁴ Barker, Choudhury, Brit. Chem. Eng., 6, 348 (1959).

⁵ Gerster, Colburn, Bonnet, Carmony, Chem. Eng. Progr., 45, 716 (1949).

⁶ West, Gilbert, Shimizu, Ind. Eng. Chem., 44, 2470 (1952).

Мэрффи, рассчитанная по изменению концентрации в паре; m — наклон равновесной линии; r — средний радиус пузыря в пене, m ; U — скорость газа, отнесенная к рабочей площади тарелки, $m/ч$; $z_{ж}$ — начальный уровень жидкости над зоной диспергирования газа, m ; C_r и $C_{ж}$ — коэффициенты для пересчета k_r и $k_{ж}$ из размерности $m/ч$ в размерность $кмоль/(ч \cdot м^2)$, размерность коэффициента C $кмоль/м^3$.

При обширном исследовании режимов работы колпачковых колонн установлена связь числа единиц переноса с временем пребывания фазы в зоне тарелки. Получены уравнения:

$$N_r = k_r \bar{a} (RT) \frac{\beta}{U} = \frac{k_r \bar{a} t_r}{3600} \quad (I-33)$$

$$N_{ж} = \frac{k_{ж} \bar{a} \rho_{ж}}{L'} = \frac{k_{ж} \bar{a} t_{ж}}{3600} \quad (I-34)$$

где β — газонаполнение слоя пены на тарелке, $м^3/м^2$ поверхности барботажа; t_r и $t_{ж}$ — действительное время пребывания газа и жидкости, $сек$; R — газовая постоянная в соответствующей размерности; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, $кмоль/м^3$; T — температура, $^{\circ}K$; U — скорость газа, отнесенная к рабочей площади тарелки, $м/сек$.

Связь времени контакта со скоростью жидкости, скоростью газа и высотой сливного порога установлена экспериментально. Окончательные зависимости (выведенные в предположении полного перемешивания и отсутствия уноса) имеют следующий вид:

$$N_r = \frac{0,776 + 4,57W - 0,238F + 1,75L}{Sc^{0,5}} \quad (I-35)$$

$$N_{ж} = (17,7 \cdot 10^4 D_{ж})^{0,5} (0,213F + 0,15) t_{ж} \quad (I-36)$$

где

$$t_{ж} = \frac{0,141 l_{ж}}{L'}$$

$$l = (0,042 + 0,19W - 0,0135F + 0,0408L) m$$

$D_{ж}$ — коэффициент диффузии в жидкости, $м/ч$; $F = U_c \sqrt{\rho_r}$; U_c — скорость газа в свободном сечении колонны, $м/сек$; ρ_r — плотность газа, $кг/м^3$; L — расход жидкости $м^3/(мин \cdot м$ средней ширины потока жидкости по тарелке); L' — расход жидкости, отнесенный к рабочей поверхности тарелки, $кмоль/(ч \cdot м^2)$; W — высота сливного порога, $м$; $l_{ж}$ — длина пути жидкости, $м$.

Пределы применимости уравнений для газовой фазы:

$$Sc \approx 0,6$$

$$1,22 < F < 3,2 - см.^1$$

$$0,062 < L < 0,310 \text{ м}^3/(мин \cdot м)$$

$$25 < W < 125 \text{ мм}$$

$$0,5 < \Pi < 6 \text{ атм}$$

Для жидкой фазы:

$$0,25 < F < 2,8$$

$$0,062 < L < 1,240 \text{ м}^3/(мин \cdot м)$$

$$25 < W < 125 \text{ мм}$$

$$0,4 < \text{длина тарелки} < 1,2 \text{ м}$$

По величинам N_r и $N_{ж}$ можно получить значение локальной эффективности по Мэрффи из следующего соотношения:

$$\frac{-1}{\ln(1 - E_{о.г})} = \frac{1}{N_r} + \frac{mG}{L} \cdot \frac{1}{N_{ж}} \quad (I-37)$$

Влияние перемешивания жидкости на тарелке. Выше эффективность тарелки по Мэрффи выводилась в предположении полного перемешивания жидкости. Однако в действительности на тарелке с перекрестным током его не происходит. Поэтому существует концентрационный градиент, обуславливающий увеличение эффективности тарелки.

Льюис¹ вычислил соотношение между локальной эффективностью и эффективностью тарелки для трех предельных случаев, когда перемешивание жидкости отсутствует (рис. I-32).

Первый случай (рис. I-32, а) встречается в практике наиболее часто; ему отвечает уравнение:

$$E_{м.п} = \frac{L}{mG} \left[\left(\exp \frac{mG}{L} E_{о.г} \right) - 1 \right] \quad (I-38)$$

Уравнение (I-38) наряду с основными условиями предполагает, что $L/G = \text{const}$; угол наклона линии равновесия постоянен в пределах изменения рабочих концентраций на тарелке и локальная эффективность $E_{о.г}$ постоянна по всей площади тарелки.

Для действительных условий работы тарелки предположения Мэрффи и Льюиса неприменимы, так как происходит лишь частичное перемешивание жидкости. Зависимость для эффективности реальной тарелки² получена в предположении, что тарелка может быть представлена состоящей из n секций полного перемешивания:

$$E_{м.п} = \frac{L}{mG} \left[\left(1 + \frac{mG}{L} \cdot \frac{E_{о.г}}{n} \right)^n - 1 \right] \quad (I-39)$$

Аппроксимация числа секций полного перемешивания представлена на рис. I-33.

Степень перемешивания, от которой зависит применимость уравнения для расчета эффективности, определяется, во-первых, скоростью жидкости (увеличение скорости уменьшает обратное перемешивание), во-вторых, конструктивными особенностями тарелки (перемешивание на ситчатых тарелках меньше, чем на колпачковых) и, наконец, скоростью пара (при ее увеличении повышается турбулизация и перемешивание жидкости).

В основу метода последовательных приближений³ положены экспериментальные данные по перемешиванию на колпачковых тарелках. В качестве жидкой среды использовалась вода. Корреляция сделана относительно переменного числа Пекле Pe :

$$\frac{E_{м.п}}{E_{о.г}} = \frac{1 - e^{-(n+Pe)}}{(n+Pe) \{1 + [(n+Pe)/n]\}} + \frac{e^n - 1}{n \{1 + [n/(n+Pe)]\}} \quad (I-40)$$

где $n = \frac{Pe}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{4mG}{L} \frac{E_{о.г}}{Pe}} - 1 \right)$; $Pe = \frac{l_{ж}^2}{D_{т} t_{ж}}$; $l_{ж}$ — длина пути жидкости, $м$; $D_{т}$ — коэффициент тур-

¹ Lewis, Ind. Eng. Chem., 28, 399 (1936).

² Gautreaux, O'Connell, Chem. Eng. Progr., 51, 232 (1955). — Kirschbaum, Distillation and Rectification, New York, 1948.

³ Bubble Tray Design Manual, 1958.

¹ Применение данной зависимости для нагрузок по пару $F < 1,22$, сомнительно, так как величина $k_r \bar{a}$ быстро убывает ниже этой скорости.

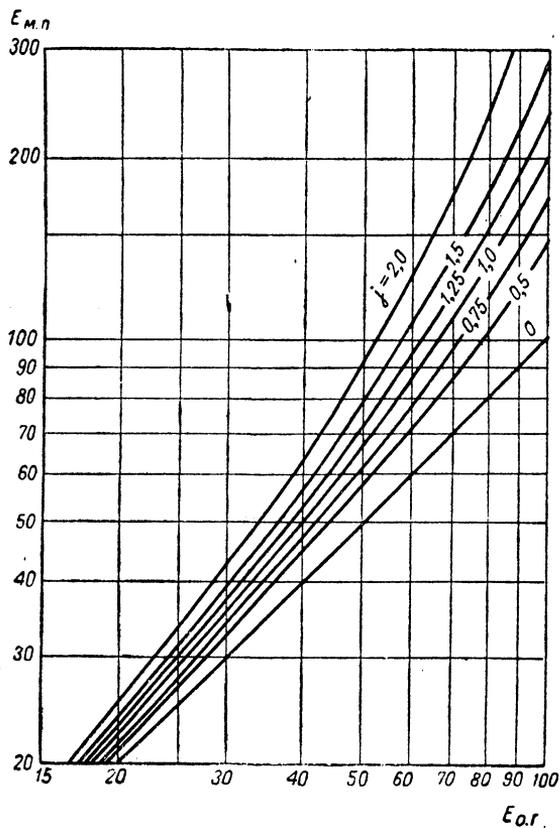
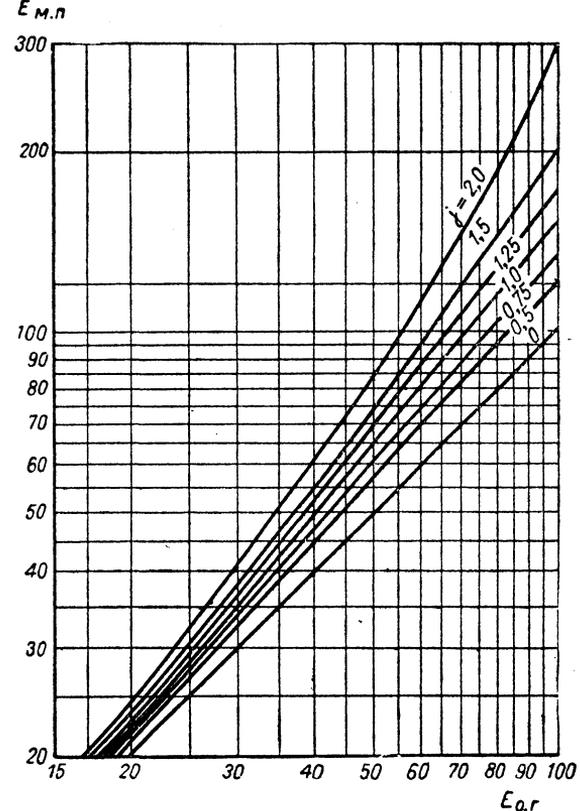
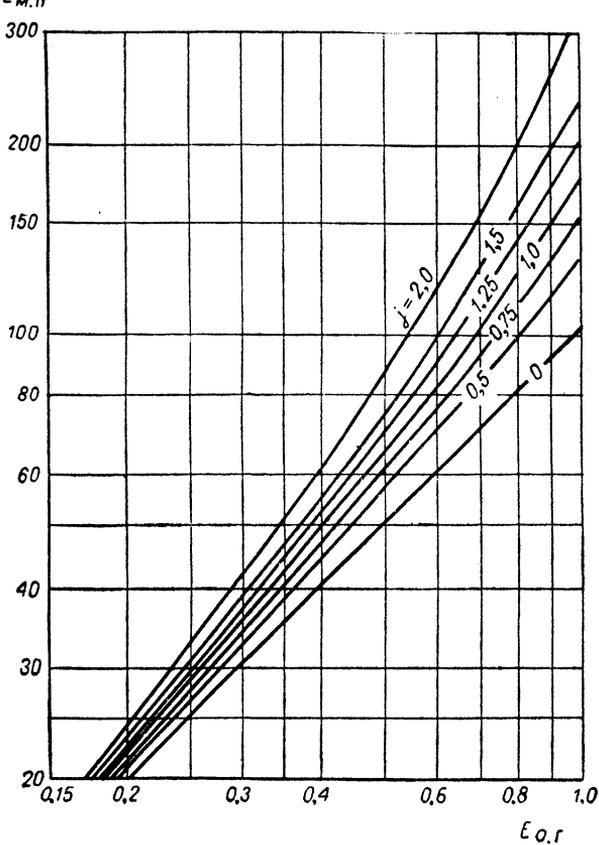


Рис. I-32. Связь локальной эффективности $E_{o,r}$ с эффективностью тарелки по Мэрфри $E_{M,п}$ в паровой фазе ($j = m \gamma / L$).

Наверху слева — пар полностью перемешан под каждой тарелкой; внизу слева — жидкость на тарелке и пар в пространстве между тарелками не перемешиваются, жидкость на смежных тарелках движется в одном направлении; наверху справа — пар в пространстве между тарелками и жидкость на тарелках не перемешиваются, жидкость на смежных тарелках движется в противоположных направлениях.

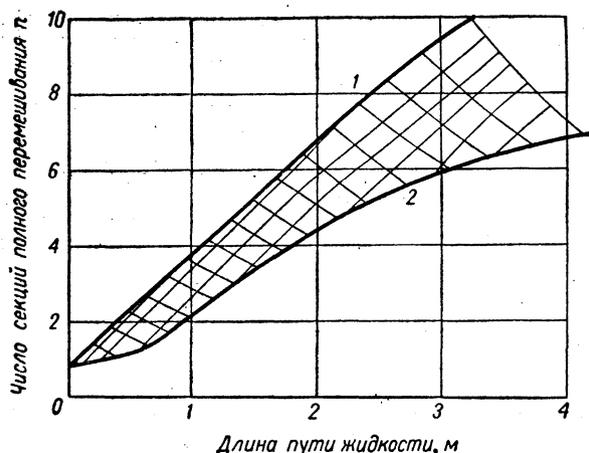


Рис. I-33. Влияние длины пути жидкости по тарелке на число секций полного перемешивания:

1 — минимальное перемешивание; 2 — максимальное перемешивание.

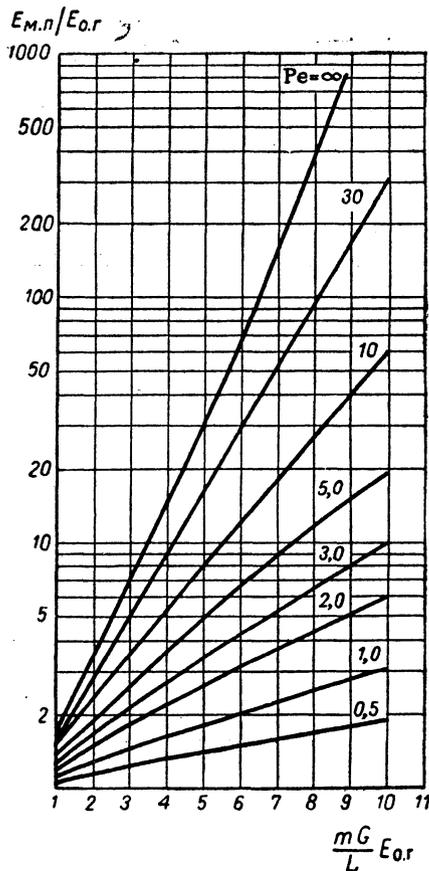
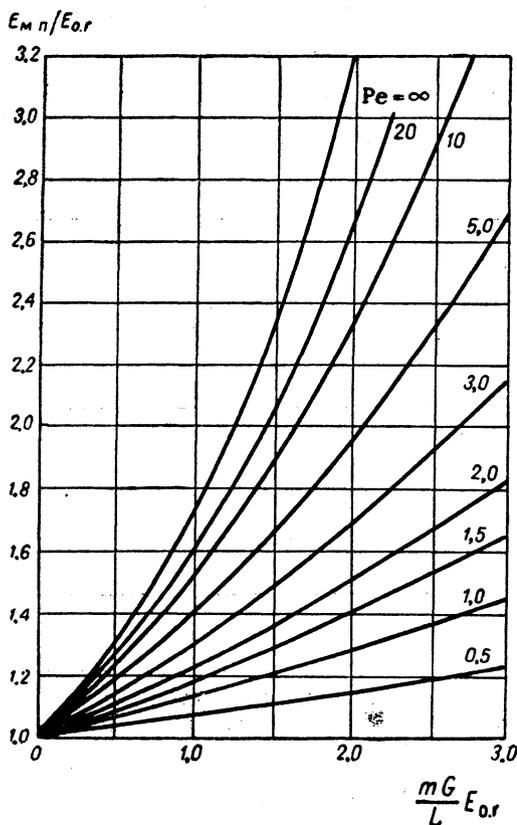


Рис. I-34. Кривые перемешивания.

Остальные обозначения см. в уравнениях (I-35) и (I-36).

Графически зависимость (I-40) представлена на рис. I-34.

Сравнение эффективности тарелок различных типов. Изложенное ниже сопоставление параметров, влияющих на эффективность колонн, выполнено главным образом применительно к колпачковым тарелкам, потому что внедрение в промышленность новых типов тарелок началось только с 1940 г. и достигло ускоренных темпов лишь в последние годы. В тарелках новых типов также используются основные принципы массопередачи, причем различие в эффективности обуславливается только изменением распределения пара и развитием поверхности контакта фаз.

Для получения сопоставимых результатов сравнение необходимо производить при одинаковых условиях (по материальным потокам и статическому уровню жидкости над диспергирующим устройством). Число исследований подобного рода ограничено.

Джон и Пайл¹ сравнивали эффективность колпачковой тарелки ($\psi = 13,5\%$) с ситчатой ($\psi = 6,7\%$) в колонне диаметром 450 мм, на смеси уксусная кислота —

булентной диффузии, $m^2/\text{сек}$; для колпачков диаметром 75 мм, расположенных в углах равностороннего треугольника со стороной 112 мм; $D_T^{0,5} = 0,0378 + 0,0171U + 0,66L + 0,6W$.

вода. Отмечается, что при условиях испытания унос не оказывает существенного влияния на эффектив-

¹ Jones, Pyle, Chem. Eng. Progr., 51, 424 (1955).

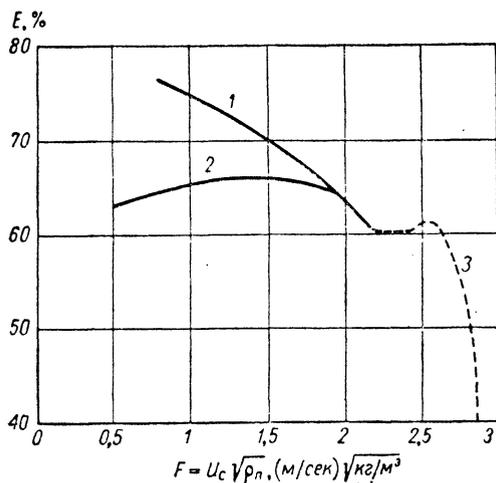


Рис. 1-35. Сравнение эффективности ситчатых и колпачковых тарелок:

1 и 3 — ситчатые тарелки, $d_{отв} = 3,2$ мм, расстояние между отверстиями по стороне равностороннего треугольника 9,6 мм, статический уровень жидкости 38 мм, $H_{м.т} = 460$ мм; 2 — колпачковые тарелки, диаметр колпачка 108 мм, расстояние между колпачками по стороне равностороннего треугольника 150 мм; глубина барботажа 25 мм, $H_{м.т} = 460$ мм.

пропиловый спирт — втор-бутиловый спирт¹. Длина пути жидкости в обоих случаях была почти одинаковой, хотя диаметр колонны с ситчатыми тарелками был несколько больше. Унос был незначителен в обеих колоннах. С поправкой на различие в длине пути жидкости установлено, что эффективность ситчатой тарелки на 5—15% выше.

Сравнение эффективности в газовой фазе ситчатой² и колпачковой³ тарелки на системе аммиачно-воздушная смесь — вода показано на рис. 1-36. Как видно из графика, изменение величины F от 1,1 до

$2,07 \frac{м}{сек} \sqrt{\frac{кг}{м^3}}$ при данной скорости жидкости оказывает небольшое влияние на эффективность ситчатой тарелки, в то время, как эффективность колпачковой тарелки изменяется значительно. При $F = 2,07$ эффективность ситчатой тарелки на 5—10% выше.

Результаты сравнения работы различных тарелок⁴ при данных, полученным различными исследователями при увлажнении воздуха (процесс контролируется сопротивлением в газовой фазе) и при десорбции кислорода (процесс контролируется сопротивлением в жидкой фазе), приводятся на рис. 1-37 и 1-38. Ввиду того, что высота статического уровня и длина пути жидкости различались, результаты оказались несопоставимыми. Однако характер зависимости эффективности от условий работы показателен для этих типов тарелок. На рис. 1-39 сравнивается работа тарелки Киттеля и колпачковой на системе β -хлортолуол — n -хлортолуол⁵ при 30—40 мм рт. ст., а на рис. 1-40 — балластной тарелки Глитча ($d_{отв} = 39$ мм) и стандартной колпачковой тарелки на системе гексан — гептан.

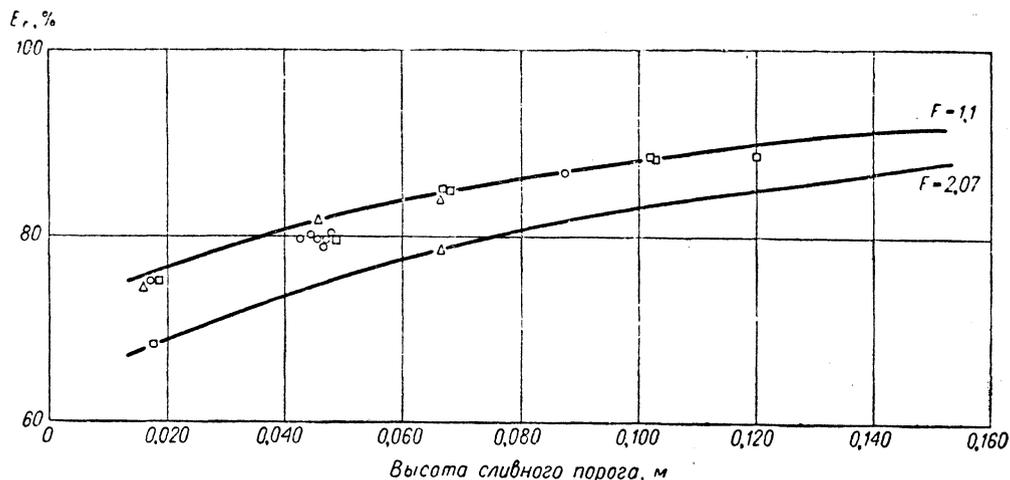


Рис. 1-36. Сравнение локальной эффективности в газовой фазе на ситчатой и колпачковой тарелках на системе аммиачно-воздушная смесь — вода.

Экспериментальными точками представлены результаты, полученные на ситчатой тарелке ($d_{отв} = 3$ мм, расстояние между отверстиями 9 мм), сплошными линиями — на колпачковой тарелке (диаметр колпачка 37,5 мм, колпачки расположены по углам квадрата со стороной 62,5 мм). $P = 1$ атм, $t = 20^\circ$ С, орошение = $0,28$ м³/(мин·м).

$$\Delta - F = U_c \sqrt{\rho_n} = 1,1; \quad \circ - F = 1,71; \quad \square - F = 2,07.$$

ность. Установлено, что ситчатые тарелки имеют более широкий диапазон стабильной работы, чем колпачковые, и обеспечивают более эффективную массопередачу при $U_c \sqrt{\rho_n} < 1,7$ (рис. 1-35).

В литературе можно найти также сравнение эффективности ситчатых и колпачковых тарелок на системе

¹ Mayfield et al., Ind. Eng. Chem., 44, 2238 (1952).

² Wolf, M. S. Thesis, Univ. of Delaware, 1958.

³ Gerster, Hill, Hochgraf, Robinson, Efficiencies of Distillation Columns, Final Report, Am. Inst. Chem. Engrs., Dec. 1, 1958.

⁴ Garner, Ellis, Freshwater, Trans. Inst. Chem. Engrs (London), 35, 61 (1957).

⁵ Pollard, Trans. Inst. Chem. Engrs, 35, 69 (1957).

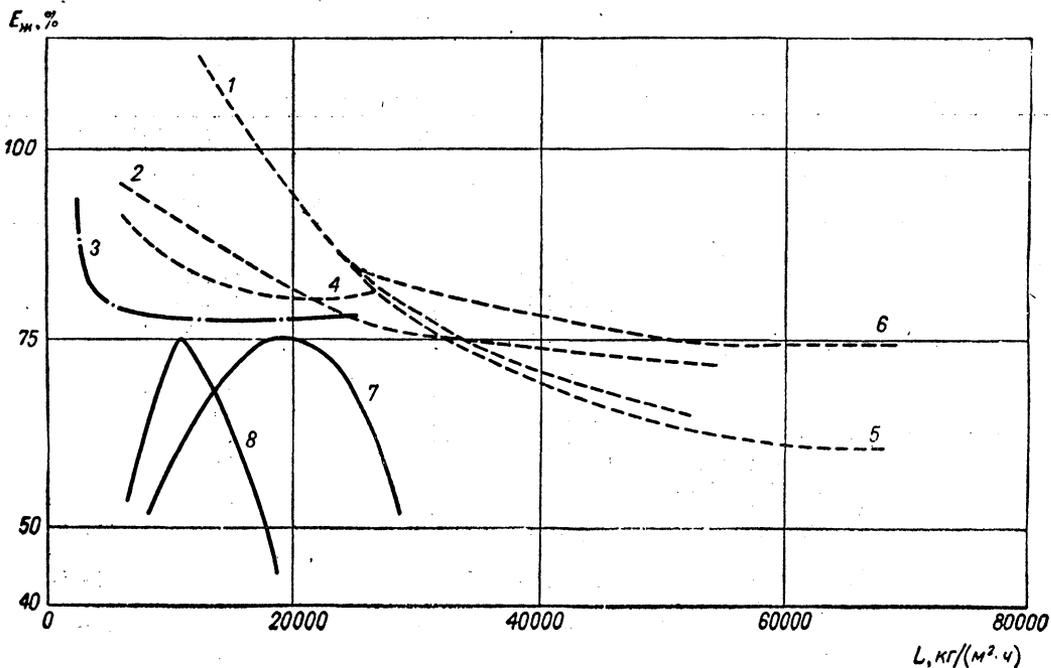


Рис. I-37. Эффективность различных тарелок в жидкой фазе:

Кривая	Тип тарелки	Скорость воздуха, м/сек	Кривая	Тип тарелки	Скорость воздуха, м/сек	Кривая	Тип тарелки	Скорость воздуха, м/сек
1	Ситчатая	0,61	4	Каскадная	1,19	7	Решетчатая	0,78
2	»	0,915	5	Колпачковая	0,376	8	»	1,1
3	Каскадная	0,855	6	»	0,703			

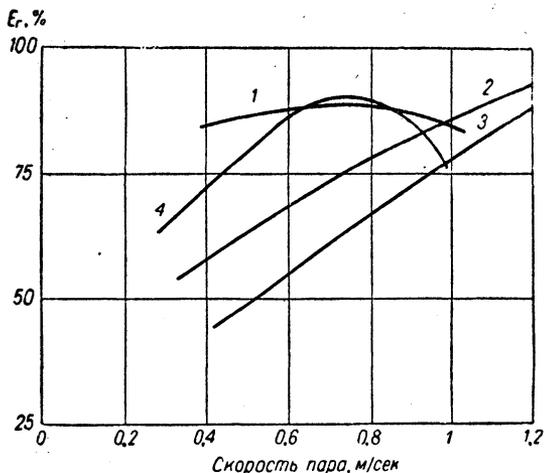


Рис. I-38. Эффективность различных тарелок в газовой фазе:

Кривая	Тип тарелки	L , кг/(м ² ·ч)	Система
1	Решетчатая	11 600—11 900	.....
2	Каскадная (ширина щели 3,2 мм, $\Psi = 23\%$)	4 000—13 000	Метилциклогексан — толуол
3	То же	1 135—3 700	Метанол — H ₂ O
4	Колпачковая	7 320	Воздух — H ₂ O

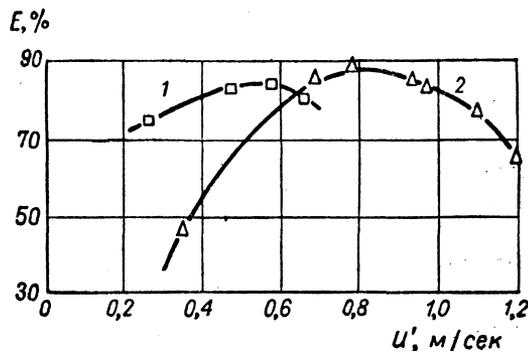


Рис. I-39. Эффективность E тарелок в зависимости от приведенной скорости пара U' :
1 — колпачковая тарелка; 2 — тарелка Киттеля.

Эффективность тарелок различного типа

ТАБЛИЦА I-3

Тип тарелки	Диаметр, м	Система, концентрации	$U_C \sqrt{\rho_{\Pi}}$ $\frac{м}{сек} \sqrt{\frac{кг}{м^3}}$	Статический уровень жидкости, мм	Нагрузка по жидкости $м^3/(ч \cdot м$ длины перелива)	Эффективность, %		Давление атм	Литература (см. стр. 30)	
						по Мэрфри $E_{м.п}$	колонны			
Колпачковая	0,4	Этанол (20—60%) — вода (80—40%)	0,24—0,48	30	.....	92—80 ¹	.....	1,03	1
			0,24—0,72	30	.....	95—80 ²	.....	1,03	
			0,24—0,96	30	.....	87—83 ³	.....	1,03	
			0,24—1,34	30	.....	97—84 ⁴	.....	1,03	
	0,15	Этанол — вода	0,048—0,073	6,3	.....	74	.....	1,03	2
			0,048—0,073	12,5	.....	82	.....	1,03	
			0,048—0,073	19,0	.....	88	.....	1,03	
			0,048—0,073	32,0	.....	96	.....	1,03	
			0,24—1,22	38,0	.....	87	.....	1,03	
	0,127×0,23	Метанол — пропанол	0,24—0,98	38,0	.....	86	.....	1,03	3
			Бензол — четыреххлористый углерод
	0,3	Жидкий воздух	0,61	10,0	.....	77	.....	1,2	4
	1,8	C ₁ —C ₆ , ключевая пара C ₃ —C ₅	0,86—1,22	1,8—2,5	.....	.....	77—84	26—32	5
			C ₃ —C ₆ , ключевая пара C ₄ —C ₅	1,22—1,34	3,8—4,3	59—64		8,1—8,2
			C ₃ —C ₆ , ключевая пара C ₄ —C ₅	1,1—1,34	0,79—8,1	44—46		10,2—10,3
2,15	Метилциклогексан — толуол — фенол	.....	.....	.....	.....	49—53	1,12—1,4	6	
1,2	Циклогексан — гептан	65,5 мол. % C ₆	1,18	25	13,0	80,6	.....	2,46	7
		30,05 мол. % C ₆	1,22	25	14,65	83,9	.....	2,45	
		50,55 мол. % C ₆	2,34	25	17,0	71,8	.....	1,66	
		28,4 мол. % C ₆	3,04	.....	30,0	83,0	.....	1,67	
0,45	1,2-Дихлорэтан (20—80%) — толуол (80—20%)	1,16	12,5	.....	.....	89—111	.....	1,03	8
		Ацетон (20—60%) — вода (80—40%)	0,49	12,5	.....	40	.....	1,03	
		0,61	12,5	.....	88	.....	1,03		
0,33	Метанол (10—90%) — вода (90—10%)	0,56	50	.....	.....	62	.....	1,03	9
		0,73	50	.....	.....	92	.....	1,03	
1,675	Дихлорметан — 1,2-дихлорэтан	1,12	.....	.....	12,7	84—91	.....	2,57	10
С туннельными колпачками	4,0	Бутан — бутиленфурфурол (8—16% бутана)	0,72	18,2	88—101	2,57	10
			0,96	.....	.....	60	50	.....	6,0—6,7
Колпачковая	1,8	C ₅ —C ₇	0,975	78	1,7	11
			1,52	.....	.....	.....	.....	81	1,7
			1,83	.....	.....	.....	.....	77	1,7
			2,44	.....	.....	.....	.....	60	1,7
Балластная	1,8	0,975	75	78	1,7	10
			1,52	75	.....	.....	.....	81	1,7
			1,83	75	.....	.....	.....	77	1,7
			2,44	75	.....	.....	.....	60	1,7
Ситчатая	0,45	Уксусная кислота — вода	0,61	76	12
			То же	1,71	65	1,03	12
Колпачковая	0,45	» »	0,61	.....	.....	.....	65	.....	12
	0,45	» »	1,71	.....	.....	.....	65	1,03	12
	0,6	Пентан — м-ксилол	1,1	.....	24,5	114,9—118	.....	1,03	13
Ситчатая	2,45	Бензол — толуол — ксилол	2,82	25	12,6—19,4	.....	54	1,22	13
			Смесь ксилолов	2,58 (укрепл.) 2,21 (исчерп.)	25	34 38,4	85,5	1,75	13

¹ H_{м.т} = 135 мм.² H_{м.т} = 200 мм.³ H_{м.т} = 270 мм.⁴ H_{м.т} = 415 мм.

Литература к табл. I-3

1. Kirschbaum, Z. Ver. deut. Ing. Beih. Verfahrenstech., № 5, s. 131, 1938; № 3, s. 69, 1940.—2. Careu, Sc. D. Thesis, M. I. T., 1930.—3. Brown, Souder, Nyland, Hesler, ind. Eng. Chem., 27, 383 (1935).—4. Lubo, Williams, O. S. R. D. Rept. 3768, 1944.—Aston, Tests of Perforation of Portable Units for Liquid Air Rectifying, O. S. R. D., 1944.—5. Cicales, Davies, Harrington, Hougland, Hutchinson, Walsh, Petrol. Processing, 1, 296 (1946).—6. Drickamer, Brown, Whi-

te, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 41, 555 (1945).—7. F. R. I. Tests, Fourth Annual Progress Rept., Research Committee, A. I. Ch. E. 1956.—8. Oliver, Watson, Am. Inst. Chem. Engrs. J., 2, 18 (1956).—9. Gerster, Bonnet, Hess, Chem. Eng. Progr., 47, 621 (1951).—10. Bubble Tray Design Manual, A. I. Ch. E. 1958.—11. Topical Report 15, Fractionation Research, Inc., 1958.—12. Jones, Pyle, Chem. Eng. Progr., 51, 424 (1955).—13. Gerster, Hill, Hochgraf, Robinson, A. I. Ch. E. Research Committee, Tray Efficiency in Distillation Columns, Final Report, University of Delaware, 1958.

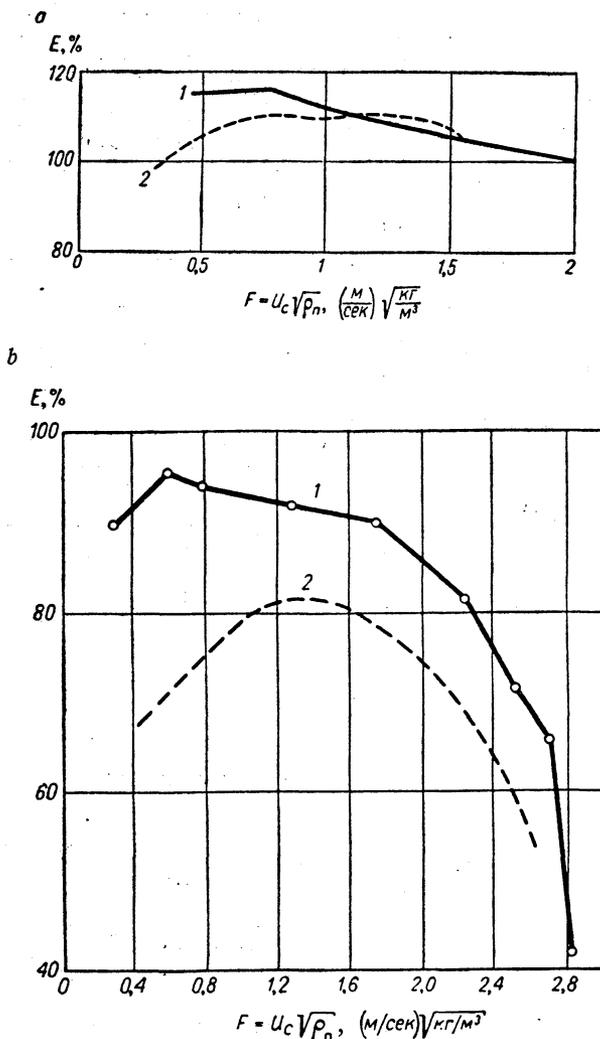


Рис. I-40. Сравнение эффективности балластной и колпачковой тарелок:

a — C₄, P_{абс} = 11,7 ат; b — C₆ — C₇, P_{абс} = 1,7 ат;

1 — балластная тарелка; 2 — колпачковая тарелка.

Характерные значения эффективности тарелок, полученные при обследовании работы тарельчатых колонн на различных системах, приведены в табл. I-3. Используя эти величины при проектировании, необходимо сопоставить их с данными по составу смеси, статическому уровню и длине пути жидкости, скорости пара и жидкости, расстоянию между тарелками, так

как изменение любого из этих параметров может существенно повлиять на эффективность тарелки. Поэтому рекомендации табл. I-3 могут использоваться только как ориентировочные.

Влияние концентрации на эффективность. Имеются сообщения относительно того, что для одной и той же системы наблюдаются меньшие значения эффек-

тивности тарелки, когда изменение концентрации на ней невелико, по сравнению с эффективностью при значительном изменении концентрации¹.

Предложено объяснение этого явления, основанное на изменении поверхностного натяжения в зоне пены на тарелке². Так как стабилизация пены происходит в результате изменения поверхностного натяжения жидкой фазы при накоплении в ней компонента с высоким поверхностным натяжением на стыках пузырей, это предотвращает агломерацию. При небольших концентрационных градиентах в жидкости возникает неустойчивая пена, и скорость массопередачи снижается в соответствии с уменьшением стабильности поверхности.

Исследованиями также установлено, что если поверхностное натяжение жидкости увеличивается по мере ее продвижения вниз по колонне, эффективность тарелок выше, чем в противоположных обстоятельствах. Эта зависимость позволяет утверждать, что значительная доля массопередачи происходит в пене. Однако вопрос остается открытым, так как ни одна из известных корреляций по эффективности не учитывает изменения поверхностного натяжения в зависимости от состава жидкости на тарелке.

Уравнения для расчета эффективности, в общем, могут применяться и для процесса абсорбции. В тех случаях, когда встречаются значительные отклонения, они могут быть отнесены за счет снижения поверхностного натяжения при увеличении концентрации растворенного в жидкости газа.

Стоимость тарельчатых колонн

При определении стоимости колонн для предварительной экономической оценки процесса требуется учитывать не только тип тарелки и диаметр аппарата, но и влияние числа тарелок, расстояния между тарелками и таких особенностей конструкции, которые оказывают существенное влияние на стоимость изготовления (съемность тарелок, конструкция диспергирующих устройств).

Относительная стоимость тарельчатой колонны в зависимости от материала может быть грубо определена с помощью следующих данных:

Углеродистая сталь	1
Нержавеющая сталь 410	1,6—2,4
» » 304	2,0—2,7
» » 316	2,3—3,2
Монель-металл	3,0—4,0

Расчет оптимальных размеров тарельчатых колонн

Критерием оптимальности расчета тарельчатых колонн является достижение желаемой четкости разделения при минимальной стоимости процесса, включая амортизацию оборудования. Минимальная стоимость процесса получается, когда

$$\frac{d \text{ (общей стоимости)}}{d \text{ (параметров процесса и конструкции)}} = 0$$

$$\frac{d^2 \text{ (общей стоимости)}}{d \text{ (параметров процесса и конструкции)}^2} > 0$$

Установление оптимума влияния параметров конструкции для определенных типов колонн на основе опыта обычно предпочтительнее применения обобщений, так как параметры, относящиеся к конструкции, могут быть совершенно отличными от переменных, входящих в обобщенные уравнения оптимизации. Для достижения оптимума при расчете могут быть изменены соотношения потоков жидкости и пара (флегмовое число или отношение жидкость — газ), давление процесса и условия ввода питания.

При расчете оптимальных размеров колонны необходимо учитывать материал конструкции, стоимость переработки и труда, тип и эффективность тарелок, количество и чистоту дистиллята, вид равновесной зависимости жидкость — пар.

Для предварительных расчетов пригодны различные обобщающие соотношения, например уравнение Кольборна¹ для оптимального флегмового числа:

$$R_{\text{опт}} = \frac{N + [(C_2/tG_n + C_3)/C_1] + (dn/dR)}{dn/dR} \quad (\text{I-41})$$

где R — флегмовое число, L/G ; n — число теоретических тарелок; G_n — допустимая скорость пара в теплообменнике, $\text{кмоль}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$; t — длительность работы, ч ; C_1 — расходы на амортизацию колонны, отнесенные к единице площади; C_2 — расходы на амортизацию теплообменников, отнесенные к единице поверхности теплообмена; C_3 — стоимость переработки, отнесенная к 1 моль дистиллята.

Используя модифицированное соотношение Кольборна, Хаппель² нашел, что оптимальное число тарелок изменяется в 2—3 раза общее флегмовое число. Гиллиленд³ установил эмпирическое соотношение между флегмовым числом и числом теоретических тарелок:

$$0,1 < \frac{R_{\text{опт}} - R_{\text{min}}}{R_{\text{min}} + 1} < 0,3$$

и, соответственно,

$$0,35 < \frac{N_{\text{опт}} - N_{\text{min}}}{N_{\text{min}} - 1} < 0,52$$

Другие исследователи⁴ отмечают влияние стоимости переработки на оптимальную работу. Они указывают, что в колоннах дистилляции бензина оптимальное флегмовое число отличается от минимального в 1,1—1,5 раза. Если в системе имеется холодильник, то $1,1R_{\text{min}} < R_{\text{опт}} < 1,2R_{\text{min}}$; в тех случаях, когда в конденсаторе используется вода, охлажденная в градирне, $1,2R_{\text{min}} < R_{\text{опт}} < 1,4R_{\text{min}}$.

Кольборн⁵ и Ценц⁶ рассчитали оптимальную величину уноса. Кольборн указывает, что $e = CU_c^m$, а оптимальная величина уноса, определяющая оптимальный

¹ Colburn, Chemical Engineering Lecture Notes, Univ. of Delaware, 1943.

² Happel, Chem. Eng., 65, 144 (1958).

³ Gilliland, Ind. Eng. Chem., 32, 1220 (1940).

⁴ Kiguchi, Ridgway, Petrol. Refiner, 35 (12), 179 (1956).

⁵ Colburn, Ind. Eng. Chem., 28, 526 (1936).

⁶ Zenz, Petrol. Refiner, 36 (3), 179 (1957).

¹ Bakowski, Chem. Eng. Sci., 1, 266 (1952). — Langdon, Keyes, Ind. Eng. Chem., 35, 464 (1943). — Van Wijk, Thijsen, Chem., Eng. Sci., 3, 153 (1954).

² Zuiderwig, Harmsen, Chem. Eng. Sci., 9, 89 (1958).

диаметр и скорость пара в колонне может быть вычислена по формуле:

$$e_{\text{опт}} = \frac{R}{(m-1)E_{\text{м.п}}} \quad (\text{I-42})$$

где: $E_{\text{м.п}}$ — эффективность тарелки по Мэрфри; $R = L/G$; e — унос, моль пара/моль жидкости; C — постоянная для колонны; U_c — скорость пара, отнесенная к свободному сечению колонны; m — коэффициент, зависящий от конструкции колонны.

НАСАДОЧНЫЕ КОЛОННЫ

Насадочные колонны широко используются для приведения в контакт систем газ — жидкость главным образом в процессах абсорбции, а также в дистилля-

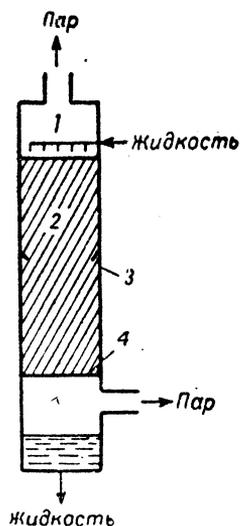


Рис. I-41. Схема насадочной колонны:

1 — ороситель; 2 — насадка; 3 — перераспределитель жидкости; 4 — поддерживающая тарелка.

ции в тех случаях, когда необходимость в малой площади поперечного сечения аппарата исключает применение высокоэффективной тарельчатой колонны. Насадочные колонны требуют обычно меньших капитальных вложений, чем тарельчатые, и создают развитую турбулентность в газовой фазе, что приводит к высокой эффективности массообмена в системах с основным сопротивлением массопередаче в газовой фазе. С применением насадки из полимерных материалов был преодолен существенный недостаток насадочных колонн — их высокий вес по сравнению с тарельчатыми колоннами.

По конструкции насадочные колонны проще тарельчатых (рис. I-41). Обычно колонна состоит из цилиндрического корпуса, в котором размещены перераспределительные и опорная тарелки, поддерживающие насадку.

Распределитель жидкости, установленный над насадкой, конструируется таким образом, чтобы насадка смачивалась равномерно.

Основные типы насадок приведены на рис. I-42.

Сопротивление и стабильность работы

Сопротивление и режимы работы насадочных колонн показаны на рис. I-43.

При малых плотностях орошения, когда эффективная площадь живого сечения смоченной и сухой насадки незначительно различаются, сопротивление пропорционально скорости пара в степени 1,8—2,0, что показано отрезком кривой AB . С увеличением скорости газа выше точки B часть энергии газового потока расходуется на удержание возрастающего количества жидкости в колонне, при этом эффективная площадь живого сечения колонны для прохождения потоков пара и жидкости уменьшается (участок BC). Сопротивление в этом режиме возрастает быстрее, чем

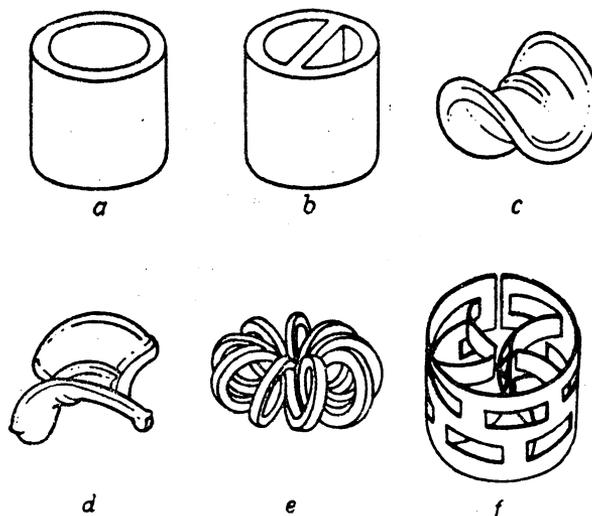


Рис. I-42. Типы насадок:

а — кольца Рашига; б — кольца Лессинга; в — седла Берля; г — седла «Инталок»; е — розетки Теллера (спиральная насадка); ф — кольца Палля.

квадрат скорости пара. При скорости пара в точке B начинается подвешивание жидкости в насадке. Необходимо отметить, что изменение наклона кривой $\Delta P = f(G/\Phi)$ в этом режиме не всегда носит ярко выраженный характер.

Дальнейшее увеличение задержки жидкости в насадке может привести к возникновению двух режимов. Если насадка составляет в основном вытянутые поверхности, эффективный диаметр отверстий становится настолько малым, что жидкость образует сплошную фазу по поперечному сечению колонны — обычно в верхней части насадки. При накоплении жидкости в колонне в виде сплошной фазы наступает совершенно нестабильный режим работы. Незначительное изменение скорости газа (точка C) вызывает чрезвычайно большое изменение сопротивления. Это явление называется захлебыванием.

ТАБЛИЦА 14

Сопротивление при захлебывании

Тип насадки	Размер, мм	Сопротивление при захлебывании, мм вод. ст./м высоты насадки	Литература
Кольца Рашига	6	342	Zenz, Chem. Eng., 60 (8), 176 (1953)
	12	291	
	25	342	
	38	208	
	50	208	
Седла Берля	12	2:8	Teller, Ford, Ind. Eng. Chem., 50, 12101 (1953)
	25	208	
	38	208	
Розетки Теллера (инверсия фаз)	25	208	

Если насадка не образует непрерывной поверхности, происходит инверсия фаз, при которой газ барботирует через слой жидкости. Возврат к режиму со сплошной газовой фазой происходит просто при снижении скорости газа. Аналогично режиму захлебывания при инверсии фаз сопротивление колонны возрастает очень быстро.

Изменение сопротивления при больших плотностях орошения показано кривой A'B'C', переход к режиму подвисяния происходит не так резко, как в случае меньших плотностей орошения.

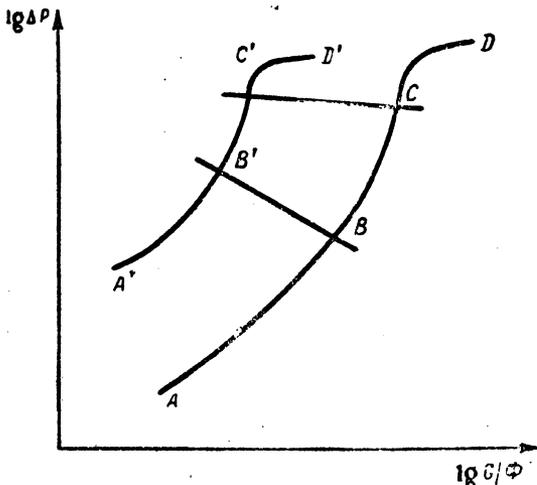


Рис. 1-43. Зависимость сопротивления насадочной колонны от скорости газа.

Условия стабильной работы выше точки захлебывания (область CD) для насадки, не образующей непрерывной поверхности, когда жидкость составляет сплошную фазу, а пар — дисперсную, неоднократно описывались¹.

Попытки обобщить зависимости сопротивления от скорости газа для всех типов насадок предпринимались неоднократно, однако эти обобщения неприменимы для всех режимов работы колонны ввиду того, что удерживающая способность, вызывающая уменьшение площади живого сечения для потока газа, является функцией геометрических характеристик насадки.

Данные по сопротивлению для различных насадок приведены на рис. 1-44—1-48 в виде зависимости $\Delta P = f(L, G/\Phi)$. Плотность орошения в $кг/(ч \cdot м^2)$ принята за параметр, ΔP в мм вод. ст. на 1 м высоты слоя насадки отложено по ординате, по абсциссе отложена скорость G/Φ , где $\Phi = \sqrt{r_g/1,2}$ (для того, чтобы приведенные данные по сопротивлению были бы сопоставимы с результатами, полученными на системе воздух — вода).

Захлебывание и подвисяние

Режим захлебывания или инверсии фаз, отражающий такую ситуацию, когда пустоты между телами

ТАБЛИЦА 1-3

Характеристики насадок

Насадка	Номинальный размер, мм	Свободный объем V_c , %	Насыпная масса, $кг/м^3$	Фактор формы C_f	Литература
Кольца Рашига керамические	20	67	735	182	1
	25	68	720	155	
	38	68	720	97	
	50	75	385	75	
	50	92	1170	115	
Кольца Рашига стальные (толщина стенки 1,6 мм)	25	92	620	75	1
	50	92	620	75	
Седла Берля керамические	20	65	770	138	1
	25	69	720	82,5	
	38	70	610	76	
Седла «Инталокс» керамические	25	70	545	77	1
	38	81	480	81	
Розетки Теллера полиэтиленовые высокого давления	25	87	160	57	3
	25	83	160	65	
Кольца Палля стальные	25	93	530	45	3
	25	93	530	45	
(24 отверстия)	50	94	450	17	4
	50	94	450	17	

1. L u b i n, Ph. D. Thesis, Univ. of Missouri, 1949.— 2. L e v a, Chem. Eng. Progr., Symp. Ser. 10, 51 (1954).— 3. T e l l e r, Ford, Ind. Eng. Chem., 50, 12101 (1953).— 4. E c h e r t et. al., Chem. Eng. Progr., 54, 70 (1953).

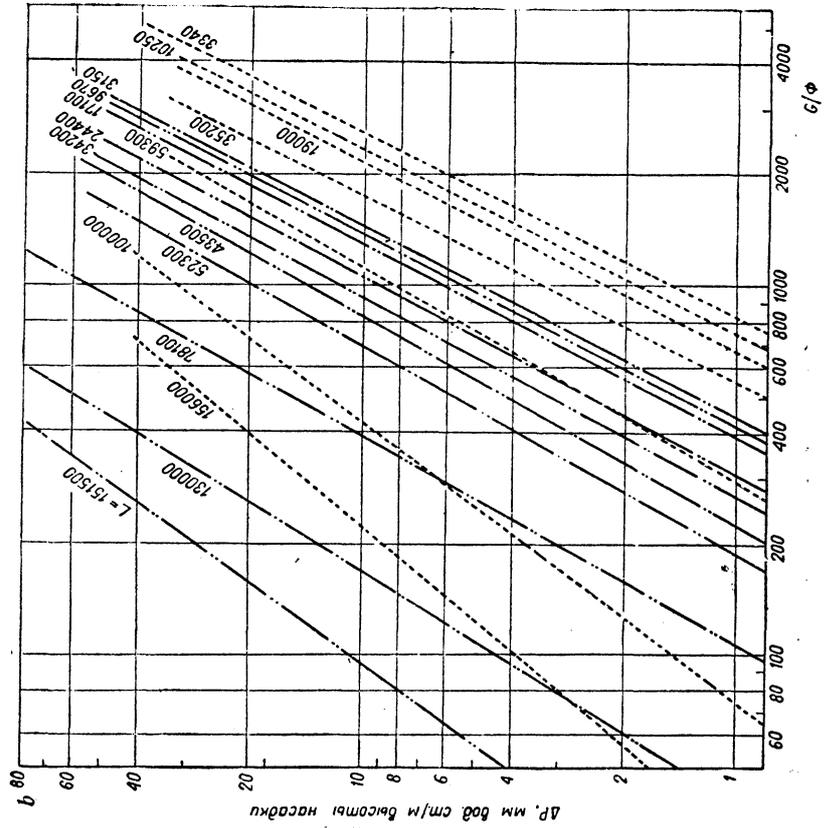
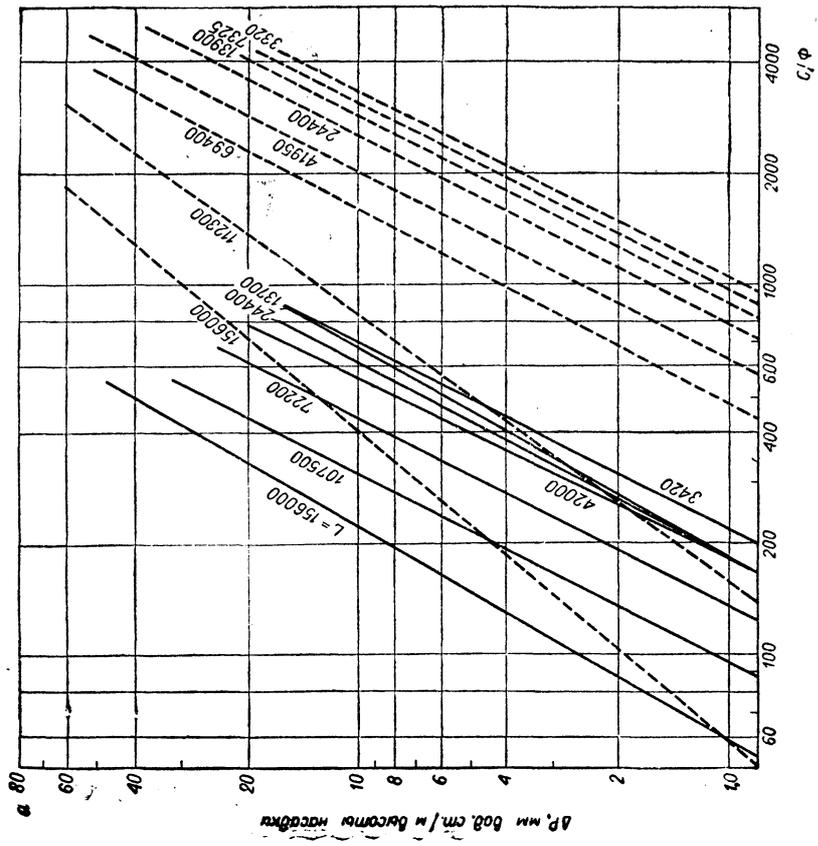


Рис. 1-44 (a и b). Сопротивление насадочных колонн, заполненных керамическими кольцами Рашига: а — размер насадки 25 мм, — — — — — нагружена навалом, — — — — — регулярно уложена, - - - - - 12,5 + 25 мм, - - - - - 25 мм.

механизм развития режима захлебывания одинаков для любого типа насадки, было подтверждено, что сопротивление при захлебывании не зависит от отношения потоков L/G и определяется только физическими свойствами системы.

Сопротивление при захлебывании для различных насадок на системе воздух — вода приведено в табл. I-4.

Общая зависимость по режимам захлебывания для различных насадок¹ основана на уравнении:

$$\frac{U_c^2 a}{g V_c^3} \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \mu_{ж}^{0,2} = f \left(\frac{L}{G}, \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \right)^{1/2} \quad (I-43)$$

где U_c — скорость захлебывания, отнесенная к свободному сечению колонны, $м/сек$; a — удельная поверхность насадки, $м^2/м^3$; V_c — свободный объем сухой насадки, $м^3/м^3$; G — нагрузка по газу, $кг/(ч \cdot м^2)$; $g = 9,81 м/сек^2$; L — плотность орошения, $кг/(ч \cdot м^2)$; $\mu_{ж}$ — вязкость жидкости, $спз$.

Ввиду того, что a и V_c не являются геометрическими характеристиками насадки, удобнее использовать уравнение, в котором отношение a/V_c^3 заменено эмпирическим фактором формы C_ϕ . Корреляция Шервуда и Холлоуэя, модифицированная Лева², графически представлена рис. I-49.

Физические и геометрические характеристики различных насадок приведены в табл. I-5.

Поверхностное натяжение должно оказывать существенное влияние на захлебывание, так как оно определяет механизм коалесценции, который способствует слиянию жидкости в сплошную фазу. Число исследований в этой области ограничено. Ньютон и др.¹, изменяя поверхностное натяжение жидкости введением определенных количеств поверхностно-активного вещества (ПАВ), установили, что модифицированная зависимость Шервуда — Холлоуэя удовлетворяет опытным данным, если по оси абсцисс откладывать величину $L/G \sqrt{\rho_r/\rho_{ж}} (\sigma_{ж}/\sigma_{воды})^3$, где σ — поверхностное натяжение.

Авторы, однако, отмечают, что на точку захлебывания, которая может повышаться при изменении поверхностного натяжения, оказывает влияние также вспенивание жидкости, возникающее при использовании ПАВ.

Предложена обобщенная корреляция² для скорости захлебывания при противоточном движении фаз, основанная на соотношении:

$$1 + 0,835 \left[\left(\frac{\rho_d}{\rho_c} \right)^{1/4} \left(\frac{U_d}{U_c} \right)^{1/2} \right] = 0,41 C_\phi \left(\frac{U_c^2 \rho_c}{g \epsilon^3 \Delta \rho} \right)^{-1/4} \quad (I-44)$$

¹ Sherwood, Holloway, Ind. Eng. Chem., 30, 768 (1938).

² Leva, Chem. Eng. Progr., Symp. Ser., 10, 51 (1954).

¹ Newton et al., Petrol. Refiner, 31, 10, 141—143 (1952).

² Sakiadis, Johnson, Ind. Eng. Chem., 46, 1229 (1954).

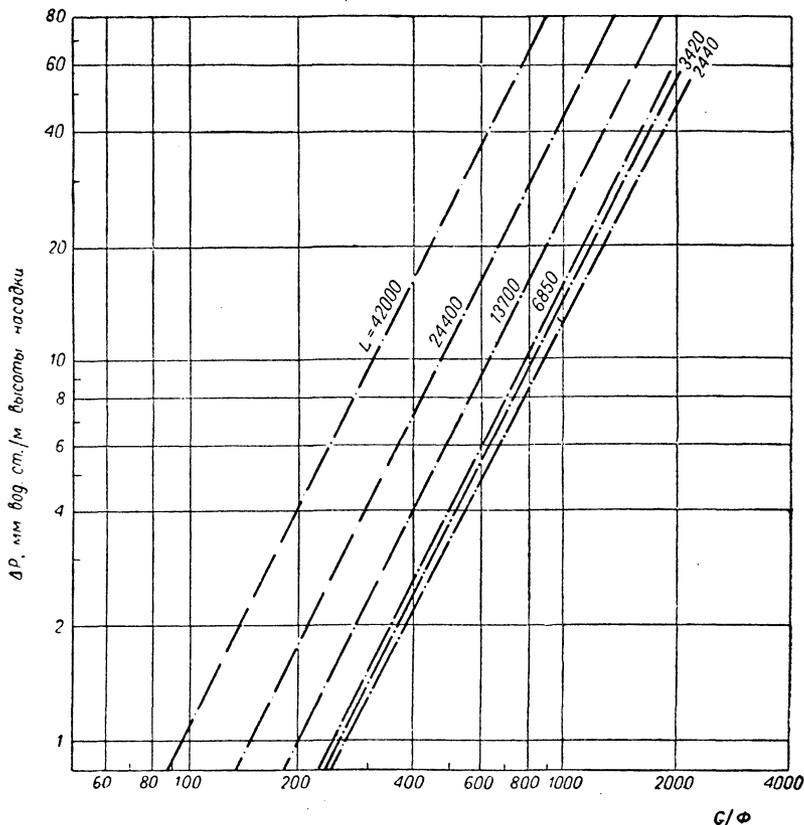


Рис. I-14 (с). Сопротивление насадочных колонн, заполненных (навалом) керамическими кольцами Рашига размером 25 мм.

где ρ_d и ρ_c — плотность дисперсной и сплошной фаз, $кг/м^3$; U_c — скорость в свободном сечении, $м/ч$; g — ускорение силы тяжести, $м/ч^2$; e — удельный объем,

Количественно точка подвешивания поддается определению с меньшей точностью, чем точка захлебывания. Выше уже отмечалось, что по точке, которой соответ-

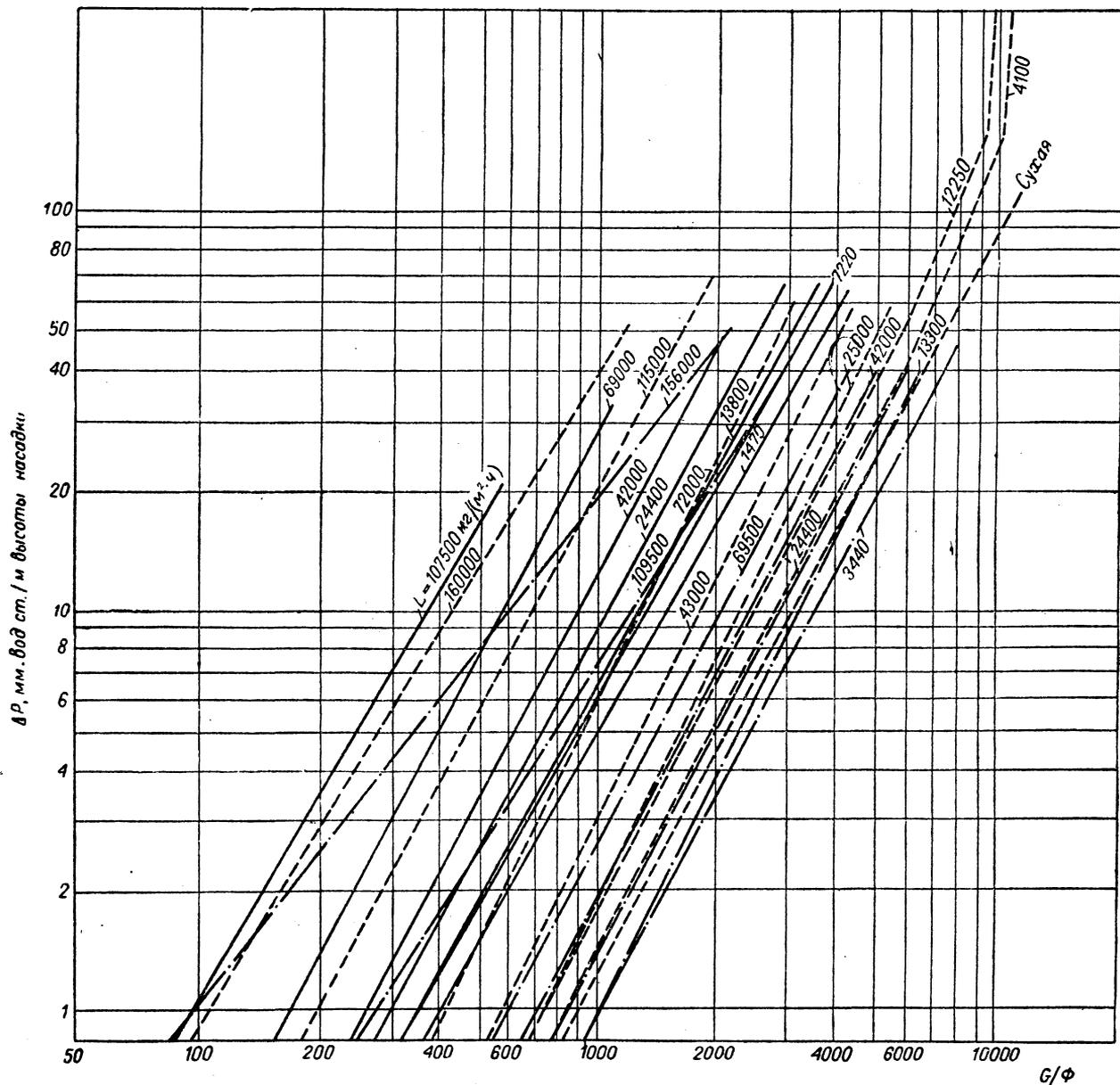


Рис. I-45. Сопротивление колонн с керамической насадкой из седел Берля на системе воздух — вода в колонне диаметром 500 мм.

Размер насадки: — 12,5 мм; --- 25 мм; - - - 12,5 + 25 мм.

$м^3/м^3$ насадки; C_n — константа, характеризующая насадку.

Уравнение по своей форме имеет большое сходство с соотношением Шервуда — Холлоуэя. Для широкого ряда рассмотренных систем средняя погрешность составляет 13,5%.

ствует перелом на кривой $(d\Delta P/dG)_к = cG$, может быть определена скорость газа, выше которой быстро возрастает задержка жидкости в насадке или начинается унос жидкости потоком газа из верхних слоев насадки. Ввиду того, что переход к подвешиванию от предшествующего режима может происходить при

очень плавном изменении зависимости сопротивления от скорости газа (рис. 1-43) условия подвисяния могут быть оценены только приблизительно.

ные, полученные на растворе сахарозы¹, значительно отклоняются от нее. Лева указал, что эти системы имеют одинаковое поверхностное натяжение (не учте-

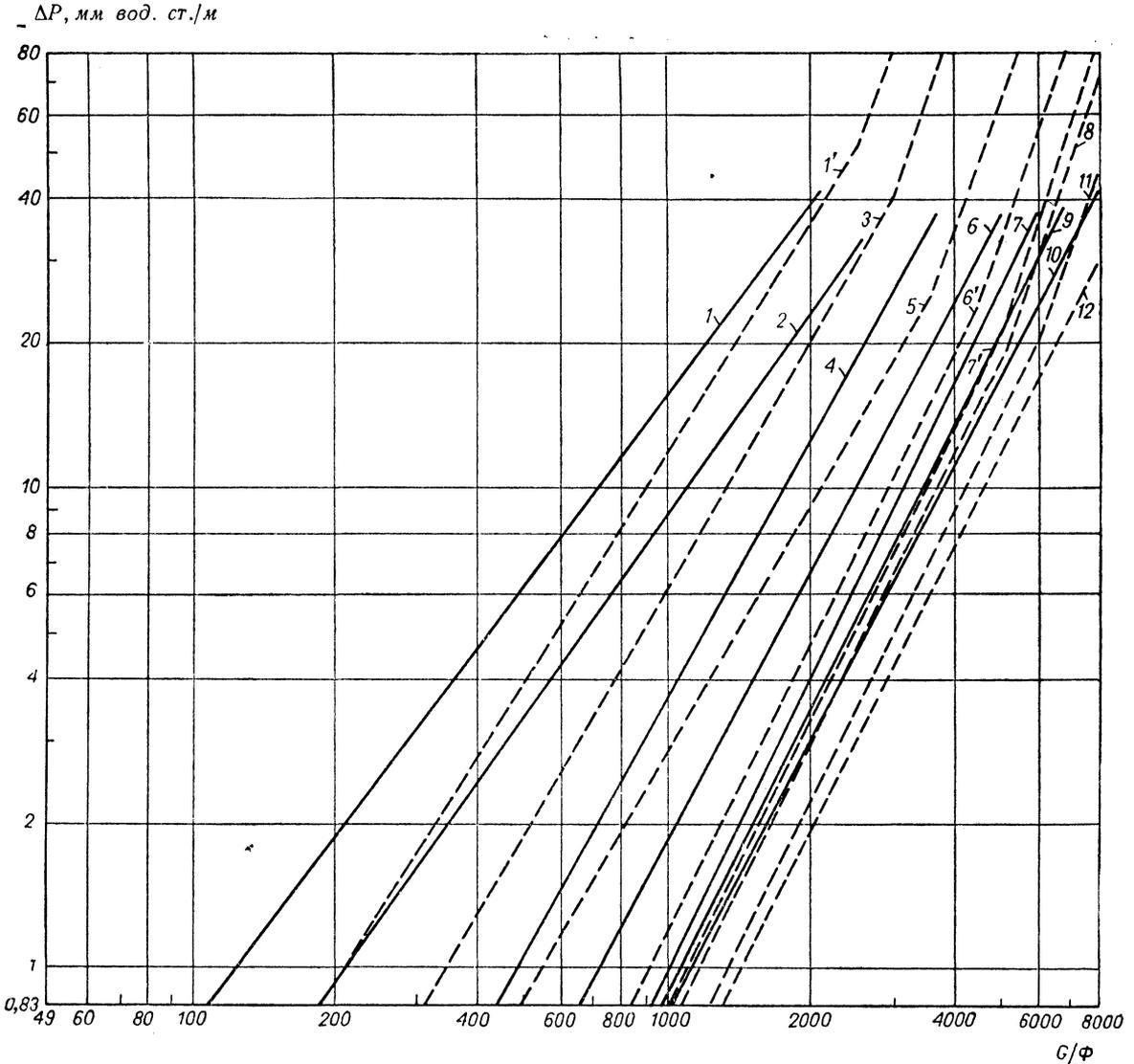


Рис. 1-46. Сопротивление спиральной насадки 75 мм:
 — загружена навалом; --- регулярно уложена;

Кривая	L, кг/(м ² ·ч)						
1 и 1'	156 000	4	74 800	7 и 7'	2 440	10	3 410
2	107 500	5	66 500	8	13 250	11	3 460
3	112 000	6 и 6'	42 000	9	13 700	12	Сухая

Корреляция Шервуда — Холлоуэя получена главным образом по данным для системы воздух — вода. Данные по системе нефть — углеводороды¹, а также дан-

но Шервудом и Холлоуэем) и вязкость, но значительно различаются по плотности. Введя дополнительный эмпирический фактор, учитывающий влияние плотности,

¹ Bain, Hougen, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 40, 29 (1944).

¹ Lubin, Ph. D. Thesis, Univ. of Missouri, 1949.

все эти данные можно привести в соответствие с корреляцией Шервуда — Холлоуэя. Для определения условий захлебывания с учетом эмпирической поправки на плотность $(\rho_{\text{воды}}/\rho_{\text{ж}})^2$ можно пользоваться рис. I-49.

хлебывания принимается в следующих пределах:

Кольца Рашига . . .	60—80
Седла Берля	65—80
Седла «Инталокс» . .	65—85
Розетки Теллера . .	75—100

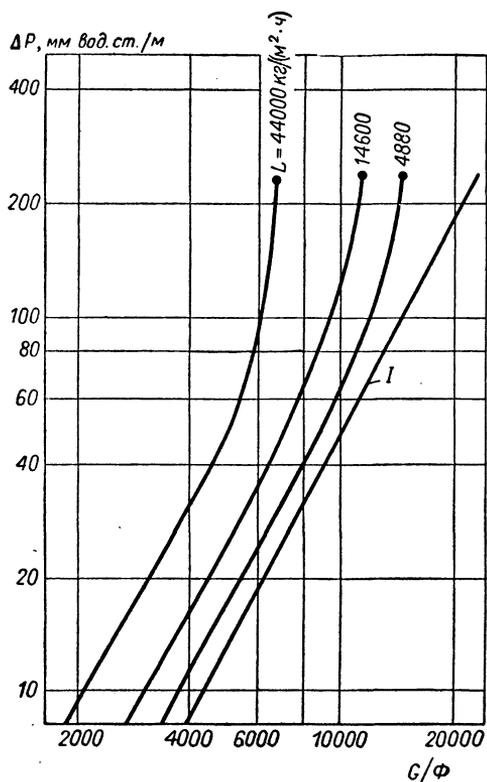


Рис. I-47. Сопротивление насадки из розеток Теллера размером 19—50 мм (номинальный размер 25 мм) на системе воздух — 15% раствор моноэтаноламина ($\nu = 1,88$ сст):

● — инверсия фаз; кривая I — для влажной и сухой насадки.

На рис. I-50—I-52 приводятся графики скоростей подвизания по данным, полученным на системе воздух — вода в колонне диаметром 0,5 м с высотой насадки 1 м для наиболее часто используемых типов насадок¹. Эти данные достаточно хорошо согласуются с результатами других, менее обширных работ².

Не рекомендуется работать на режиме, близком к захлебыванию, с насадкой, склонной к необратимому захлебыванию.

В промышленной практике для различных насадок скорость газа в колонне в процентах от скорости за-

ΔP , мм вод. ст./м

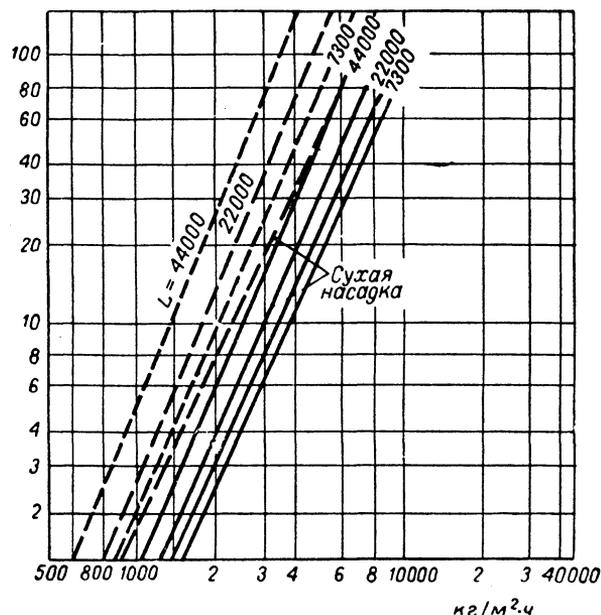


Рис. I-48. Сопротивление насадки из колец Рашига и колец Палля:

--- кольца Рашига 25 мм; — кольца Палля 25 мм.

Опорные тарелки

Конструкция опорных тарелок под насадку оказывает значительное влияние на гидравлическое сопротивление и на область устойчивой работы насадочных колонн. Площадь живого сечения опорной тарелки равна суммарной площади отверстий в тарелке минус площадь отверстий, занятая насадкой. Поэтому для самой тарелки эта величина должна быть больше площади живого сечения насадки для того, чтобы опорная тарелка не оказалась в той критической области, в которой может развиваться захлебывание.

В колоннах могут применяться два основных типа опорных тарелок: противоточные (рис. I-53) и с раздельным проходом для пара и жидкости (рис. I-54).

Свободное сечение без учета доли, занимаемой насадкой, у противоточных опорных тарелок может доходить до 90%, а у тарелок с раздельным проходом для пара и жидкости до 200%, что обеспечивает большую область стабильной работы.

Удерживающая способность насадки

Задержка жидкости в насадочной колонне может быть статической и динамической. Динамическая задержка оказывает благоприятное влияние на кинетику массопердачи, способствуя развитию и обновлению межфазовой поверхности за счет диспергирования

¹ Tillson, S. M. Thesis, M. I. T., 1939. — Molstad, Abbey, Thompson, McKinney, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 38, 387 (1942).

² Mach, Dechema Monograph, 6, 38 (1933); Z. Ver. deut. Ing., B, 375 (1935). — White, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 31, 1 (1935). — Uchida, Fujita, J. Soc. Chem. Ind. Japan, 40, 238 B (1937). — Sarchet, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 38, 283 (1942). — Elgin, Weiss, Ind. Eng. Chem., 31, 435 (1939).

агломерации жидкости. Статическая задержка оказывает ограниченное влияние на скорость переноса массы¹. В ламинарном режиме задержка жидкости, как правило, отрицательно влияет на эффективность разделения.

сти газа вплоть до достижения режима подвисяния. Выше точки подвисяния удерживающая способность быстро возрастает (рис. I-55). На системе воздух — вода установлена¹ связь удерживающей способности ниже точки подвисяния с $L^{0,6}$ (рис. I-56).

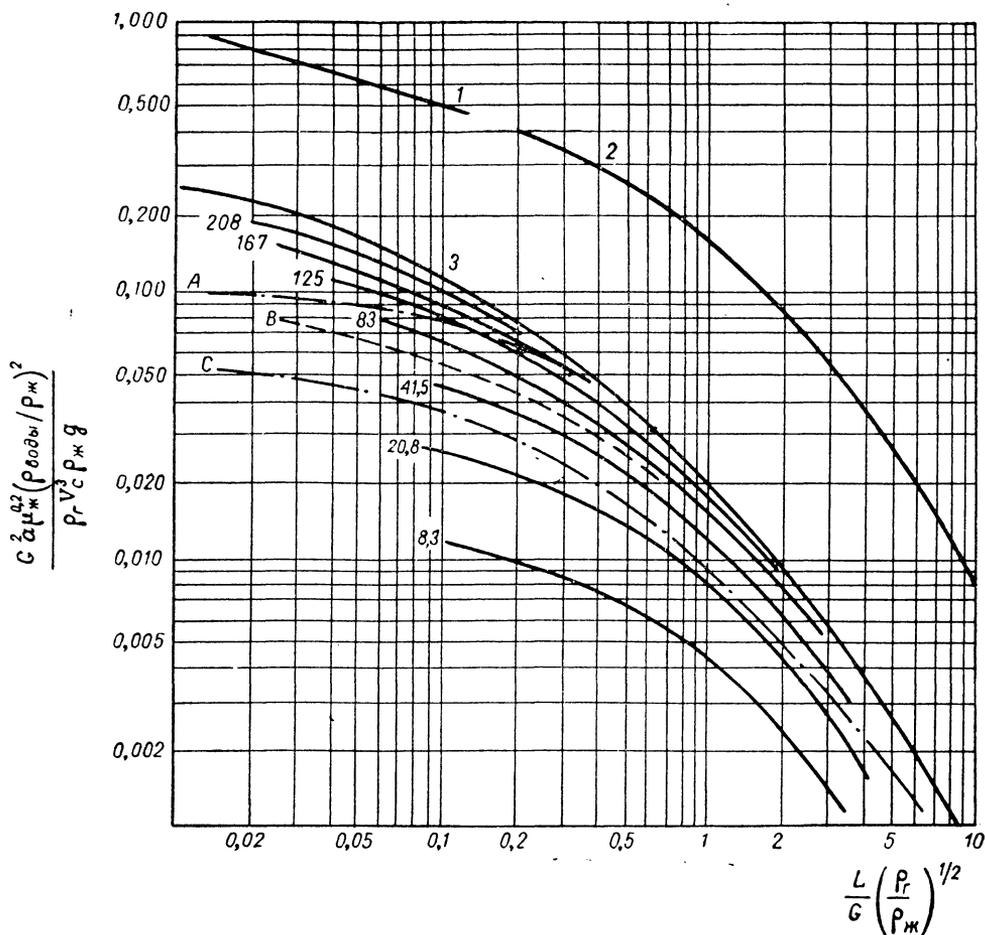


Рис. I-49. Обобщающая зависимость по сопротивлению и захлебыванию насадочных колонн:

A — приблизительный верхний предел режима подвисяния; B — линия, обобщающая большинство опубликованных данных; C — приблизительный нижний предел режима подвисяния; 1 — режим захлебывания блочной насадки; 2 — режим захлебывания регулярно уложенной насадки из колец Рашига; 3 — режим захлебывания насадки, загруженной навалом. Цифры на кривых показывают сопротивление единицы высоты насадки, мм вод. ст./м; L и G — массовая скорость жидкости и газа, кг/(ч · м²).

Обширные данные по удерживающей способности насадки в рабочих режимах имеются в литературе². Эльджин и Джессер отмечают, что при работе на насадке из седел Берля размером 12 и 25 мм и колец Рашига размером 12×12 мм и 25×25 мм, удерживающая способность при рабочих режимах не зависит от скоро-

Удерживающую способность насадки ниже точки подвисяния измеряли Шульман и др. Установлены следующие зависимости. При $\mu_{ж} < 12 \text{ снз}$ удерживающая способность в рабочем режиме $h_{\text{раб}}$ для колец Рашига 25×25 мм:

$$h_{\text{раб}} = 0,00016L^{0,57} \mu_{ж}^{0,13} \rho_{ж}^{-0,84} \left(\frac{\sigma}{73} \right)^{0,925-0,156 \lg L} \quad (I-45)$$

¹ Thoenes, Kramers, Chem. Eng. Sci., 8, 271 (1958).
² Cooper, Christl, Perry, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 37, 979 (1941). — Furnas, Bellinger, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 34, 251 (1938). — Elgin, Jesser, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 39, 277 (1943). — Elgin, Weiss, Ind. Eng. Chem., 31, 435 (1939). — Shulman, Ulrich, Weiss, Proulx, Am. Inst. Chem. Engrs. J., 1, 247 (1955).

¹ Leva, Tower Packings and Packed Tower Design, Tallmadge, Ohio, 1953, pp. 52—53.

для седел Берля 25×25 мм:

$$h_{раб} = 0,000176L^{0,57} \mu_{ж}^{0,13} \rho_{ж}^{-0,84} \left(\frac{\sigma}{73} \right)^{1,033-0,156 \lg L} \quad (I-46)$$

где $h_{раб}$ — удерживающая способность, м³ жидкости/м³ насадки; σ — поверхностное натяжение, дин/см; L — плотность орошения, кг/(ч · м²).

Распределение потоков

Эффективность массопередачи в насадочных колоннах в сильной степени зависит от равномерности распределения потоков жидкости и пара. На распределение влияют два фактора: конструкция устройства для начального распределения жидкости по насадке и длина пути жидкости.

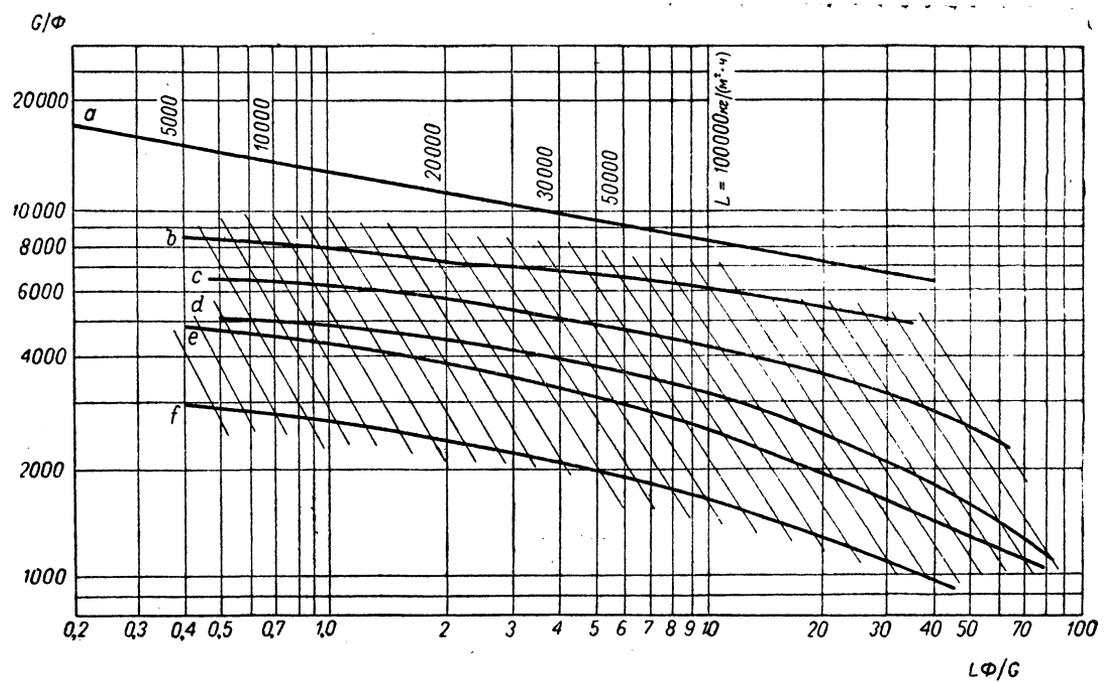


Рис. I-50. Скорость подвисяния для насадки из колец Рашига и розеток Теллера:

Кривая	Насадка	Размер, мм	Кривая	Насадка	Размер, мм
a	Розетки Теллера	25	d	Кольца Рашига	38
b	Кольца Рашига	50 (регулярно уложенные)	e	>	25
c	>	50 (навалом)	f	>	12,5

Статическая удерживающая способность:

$$h_{ст} = C \mu^m \left(\frac{1}{\rho_{ж}} \right)^{0,37 \sigma n} \quad (I-47)$$

Значения коэффициентов C , m и n приведены в табл. I-6.

К уравнению (I-47)

ТАБЛИЦА I-6

Насадка	C	m	n
Графитовые кольца Рашига 25 мм	0,0185	0,02	0,23
Фарфоровые кольца Рашига 25 мм	0,00020	0,02	0,99
Фарфоровые седла Берля 25 мм	0,00119	0,04	0,55

Ухудшение распределения жидкости, обусловленное растеканием жидкости к стенкам колонны было оценено рядом исследователей¹, которые нашли, что этот эффект нарастает при увеличении длины рабочей части колонны (рис. I-57).

Доказано², что для удовлетворительного распределения жидкости по насадке отношение диаметра колонны к эквивалентному диаметру насадки должно превышать 8. Однако при вводе жидкости в одну точку на насадку 20×20 мм в колонне диаметром 300 мм

¹ Manning, Cannon, Ind. Eng. Chem., 49, 347 (1957). — Murch, Ind. Eng. Chem., 5, 2616 (1953). — Granville, Brit. Chem. Eng., 2, 70 (1957).

² Baker, Chilton, Vernon, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 31, 296 (1935).

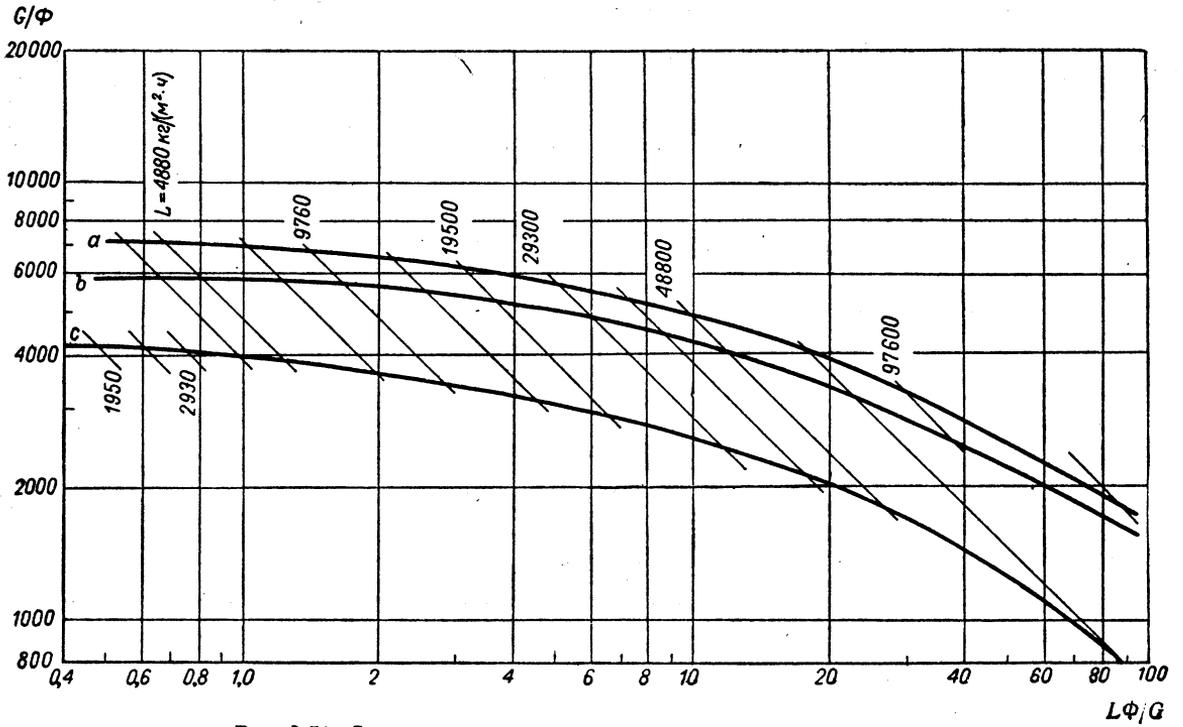


Рис. I-51. Скорость подвисяния для насадки из седел Берля:
a – 38 мм; *b* – 25 мм; *c* – 12,5 мм.

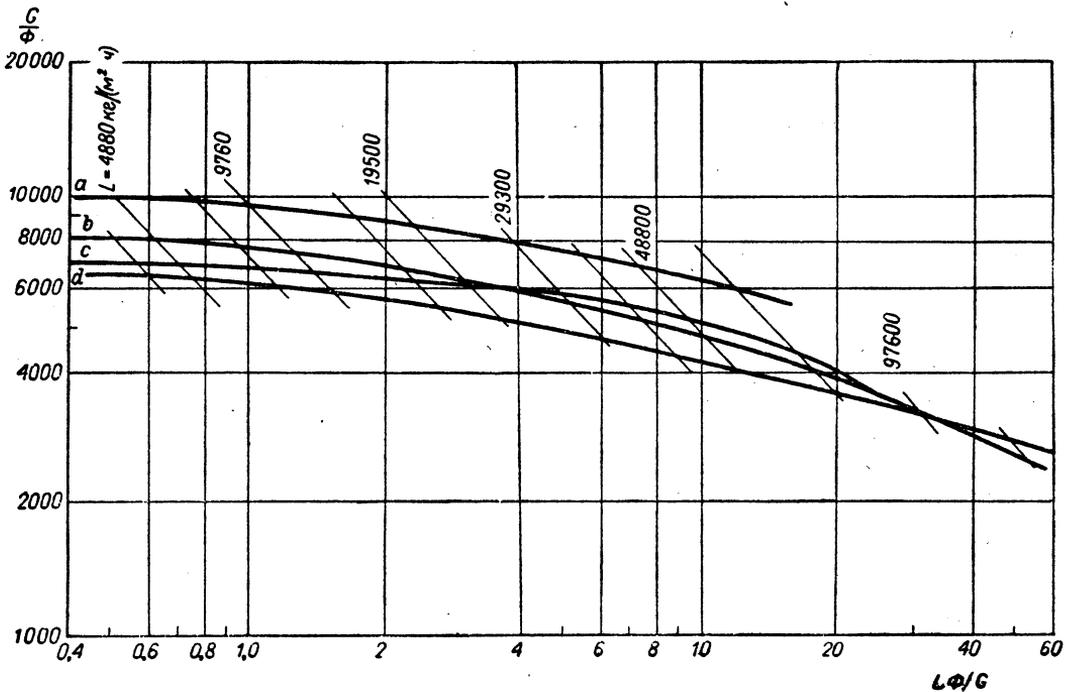


Рис. I-52. Скорость подвисяния для одноходовой спиральной насадки размером 75 мм и блочной решетчатой насадки:
a – блочная № 6146 и № 6295; *b* – спиральная регулярно уложенная; *c* – блочная № 6897; *d* – спиральная навалом.

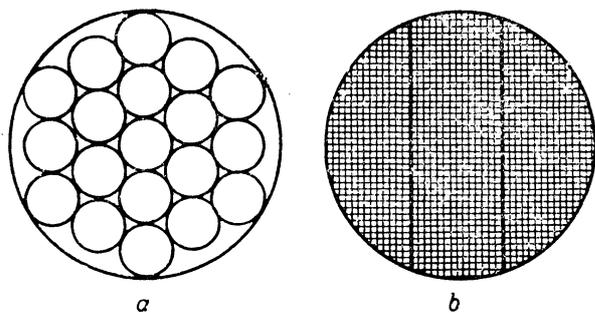


Рис. I-53. Опорная тарелка (противоточная):
а — из сварных колец; б — из проволочной сетки.

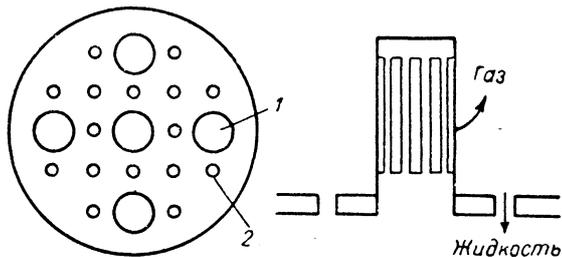


Рис. I-54. Опорная тарелка колпачкового типа
(с раздельными каналами для газа и жидкости):
1 — патрубков для газа; 2 — каналы для жидкости.

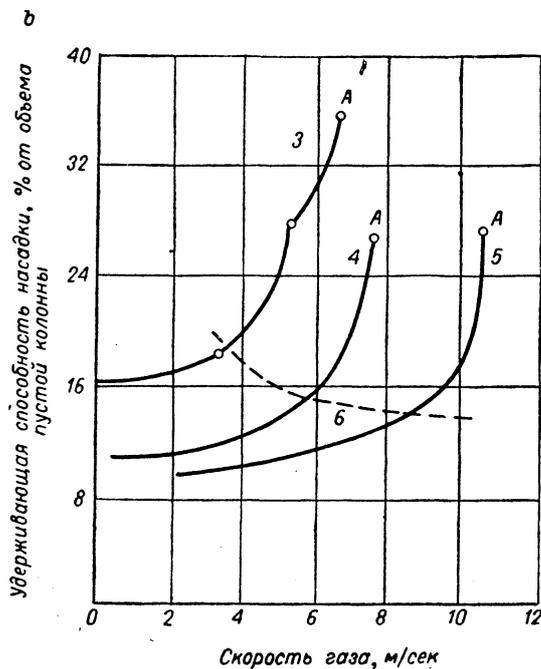
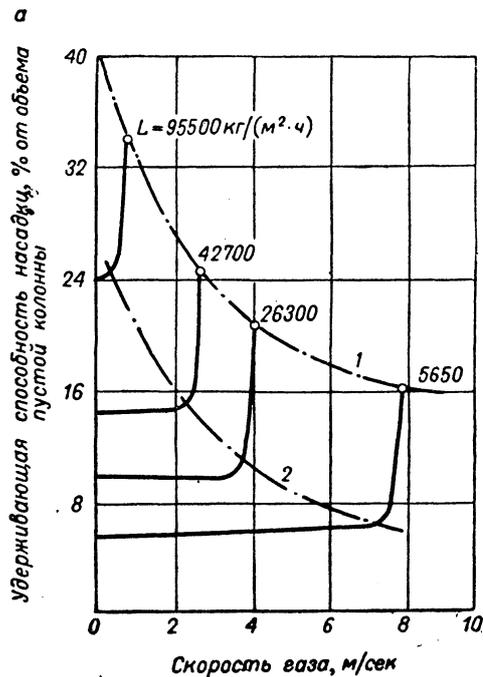


Рис. I-55. Влияние скорости газа на удерживающую способность насадки.

а — насадка — седла Берля 12,5 мм, система воздух — вода;

1 — геометрическое место точек, соответствующее верхнему пределу срыва работы колонны (предел захлебывания, определяемый графически); 2 — примерное положение визуально определяемого захлебывания;

б — насадка — кольца Рашига 25 мм;

3 — раствор сахарозы [$L = 90\,300 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $\mu = 8 \text{ спз}$]; 4 — вода [$L = 48\,800 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$]; 5 — раствор сахарозы [$L = 29\,300 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $\mu = 9 \text{ спз}$]; 6 — визуально наблюдаемое захлебывание, соответствующее примерно точке подвисяния; точка А — верхний предел срыва работы колонны.

равномерное распределение жидкости было получено только в 3 м от точки ввода. Поэтому достаточно равномерное распределение необходимо создать в верхнем слое насадки.

Прагг¹ сообщает данные по влиянию конструкции верхнего распределительного устройства в квадратной колонне со стороной 450 мм, заполненной регулярно уложенной насадкой из колец размером 75×75 мм. Ниже приводится зависимость относительной скорости массопередачи от конструкции распределителя:

Распределитель

Относительная характеристика работы насадки

Лоток шириной 25 мм с зубчатой кромкой	100
Ввод через одиночное отверстие	16
Разбрызгивающая пластина под одиночным отверстием	76
Одиночное отверстие и слой насадки из колец 25×25 мм, загруженных навалом на высоту 450 мм над регулярно уложенной насадкой	63
Разбрызгиватель со многими отверстиями и такой же слой насадки	120

¹ Pratt, Trans. Inst. Chem. Engrs, 29, 226 (1951).

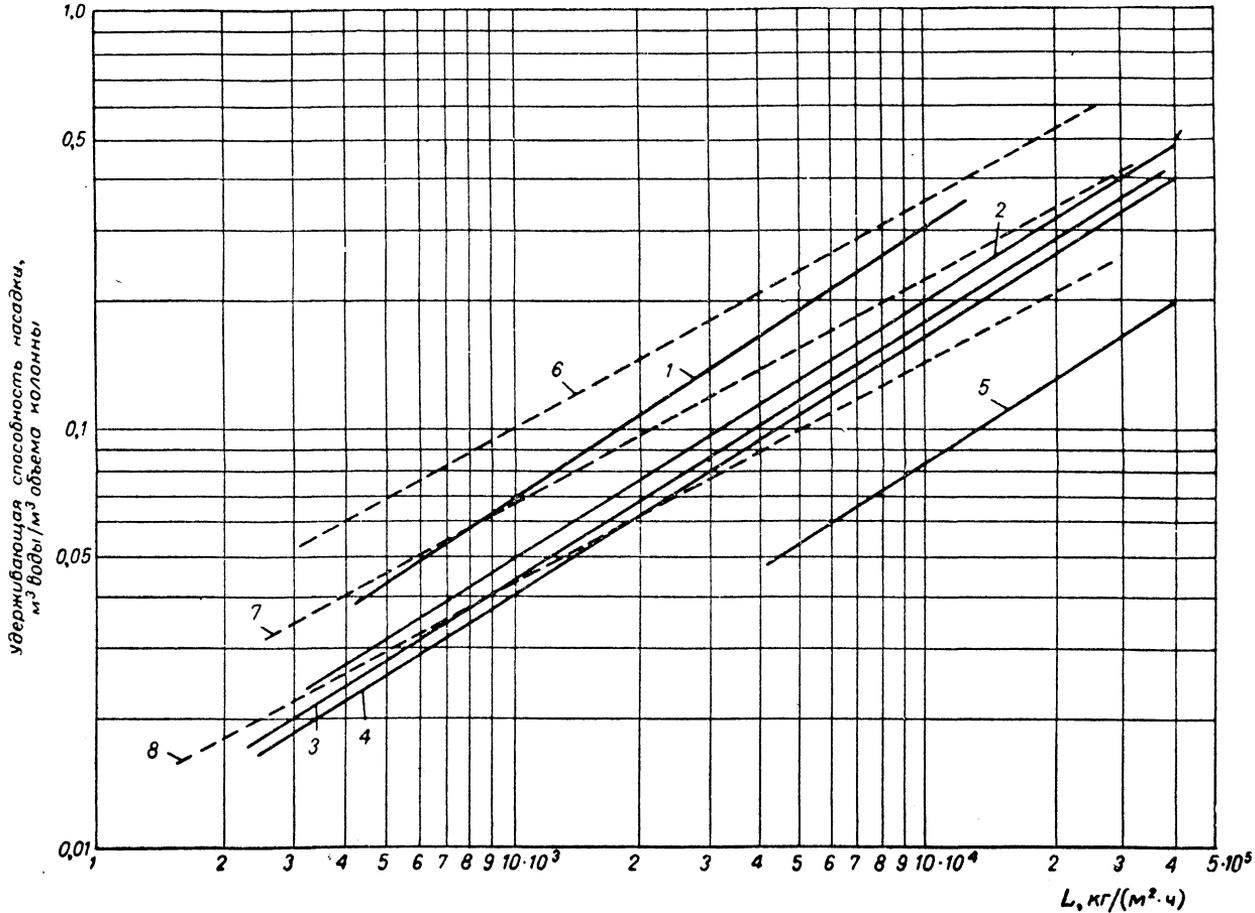


Рис. 1-56. Данные по удерживающей способности насадки из колец Рашига и седел Берля:

Кривая	Насадка	Размер, мм	Кривая	Насадка	Размер, мм	Кривая	Насадка	Размер, мм
1	Кольца Рашига	9,5	4	Кольца Рашига	25	7	Седла Берля	12,5
2	»	12,5	5	Стальные кольца	30	8	»	25
3	»	16	6	Седла Берля	4			

Ухудшение распределения жидкости в слое насадки происходит при удлинении ее пути. Жидкость стремится двигаться к стенкам, а газ — подниматься по центру колонны (рис. I-58 и I-59). Если высота слоя насадки превышает 4,5 м, может оказаться необходимой установка перераспределителей жидкости. Нарушение

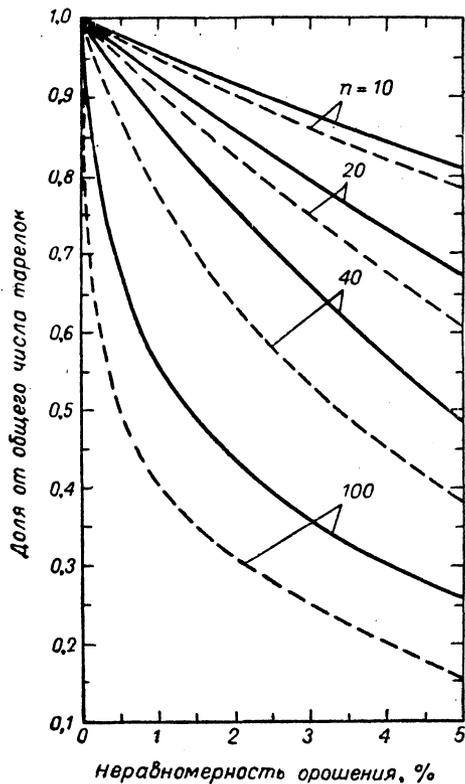


Рис. I-57. Влияние неравномерности орошения на эффективность для системы с относительной летучестью 1,07.

Состав жидкости в верхней части колонны:

— 90 мол. %; - - - - 60 мол. %; n — общее число теоретических тарелок.

распределения, обусловленное растеканием жидкости к стенкам колонны, можно частично ликвидировать, применив покрытия, которые создают несмачиваемость стенок¹. Влияние этого эффекта для колонн с кольцами Рашига и розетками Теллера показано на рис. I-60.

В качестве распределителей могут применяться распылительные форсунки, переливные устройства (рис. I-61) или брызгалки с большим числом отверстий, подающие жидкость непосредственно на насадку. Перераспределительные устройства могут иметь форму опорных решеток и колец (рис. I-62), применяются также перераспределители из проволоочной сетки.

Поверхность межфазового контакта

Доказано, что межфазовая поверхность, находящаяся в зависимости от геометрической характеристики насадки и режима работы колонны, оказывает существенное влияние на скорость переноса массы. Многие

исследователи¹ определяли действительную поверхность межфазового контакта в колонне путем сопоставления с известной поверхностью как несмоленной, так и полностью смоченной насадки. Зная коэффициенты массопередачи, отнесенные к единице поверхности массопередачи, и действительную поверхность контакта фаз, можно рассчитать действительное количество переданного вещества.

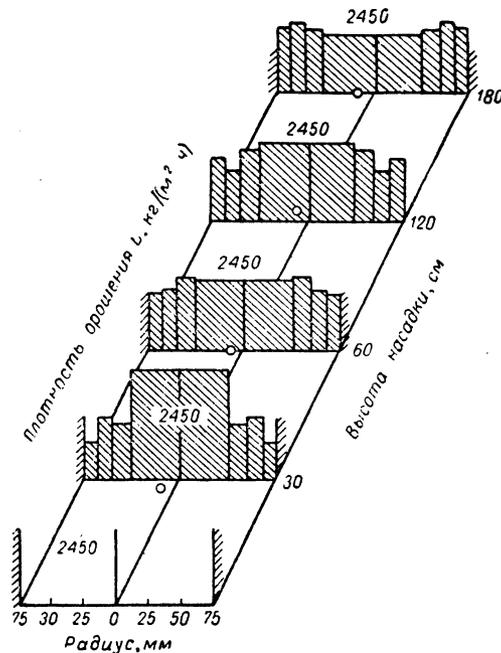


Рис. I-58. Распределение жидкости в колонне диаметром 150 мм с насадкой из кускового материала размером 12,5 мм. Приращение радиуса соответствует равновеликим сегментам поперечного сечения колонны. Ввод жидкости в центральную точку поперечного сечения колонны. Плотность орошения (водой) 2450 кг/(м²·ч), скорость воздуха 3950 кг/(м²·ч).

Зависимость скорости массопередачи от действительной поверхности контакта фаз при постоянной плотности орошения может быть выражена следующим уравнением²:

$$\left(\frac{\partial H_{o,r}}{\partial G}\right)_{ж} = \frac{H_{o,r} - H_r}{G} + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial H_r a}{\partial G}\right)_{ж} - \frac{H_{o,r}}{a} \left(\frac{\partial a}{\partial G}\right)_{ж} \quad (I-48)$$

где a — поверхность контакта фаз, м²/м³; G — скорость пара, кмоль/(ч·м²); H_r — высота единицы переноса в паровой фазе, м; $H_{o,r}$ — общая высота единицы переноса, отнесенная к паровой фазе и эквивалентному составу пара, м.

¹ Weisman, Bonilla, Ind. Eng. Chem., 42, 1099 (1950). — Shulman et al., Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 253 (1955). — Yoshida, Koyanagi, Ind. Eng. Chem., 506, 365 (1958).

² Teller, Am. Inst. Chem. Engrs J., 7, 129 (1961).

¹ Teller, Chem. Eng. Progr., 50, 65 (1954).

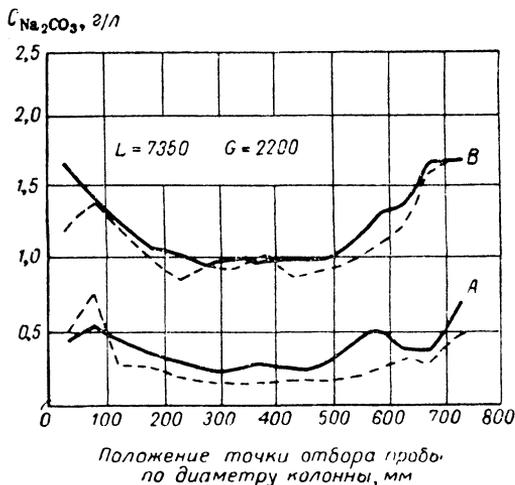


Рис. I-59. Влияние распределения жидкости на количество образовавшегося Na_2CO_3 в зависимости от точки отбора пробы по диаметру колонны. Насадка — кольца Палля, 38 мм [Eskert, Chem. Eng. Progr., 54, 70 (1958)]: А — концентрация Na_2CO_3 в верхней части колонны; В — в нижней части. Пунктиром показаны данные для параллельных опытов.

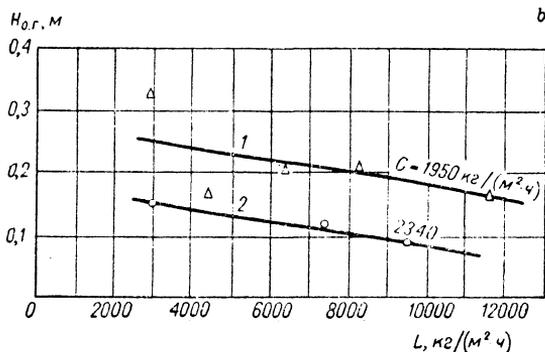
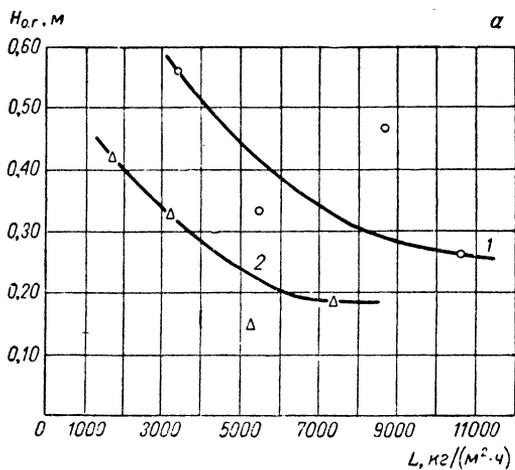


Рис. I-60. Влияние несмачивающегося покрытия стенок колонны на эффективность насадки: а — кольца Рашига 19 мм; б — розетки Теллера 25 мм; 1 — не облицованная колонна; 2 — облицованная колонна.

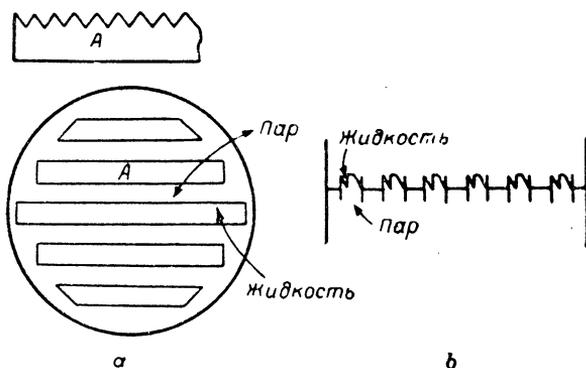


Рис. I-61. Распределители жидкости: а — с сегментными переливами; б — с круглыми переливами.

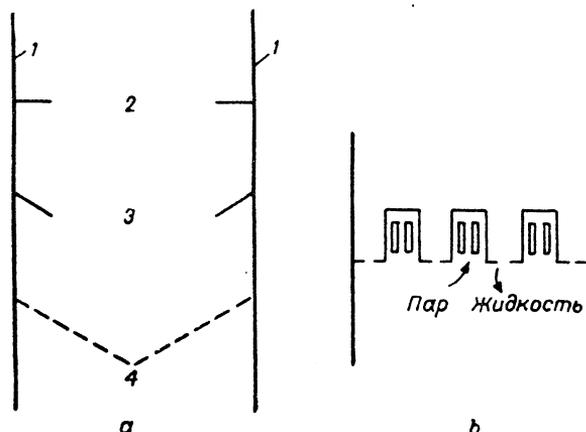


Рис. I-62. Перераспределители жидкости: а — вытеснительный; б — колпачковый. 1 — корпус колонны; 2 — прямой вытеснитель; 3 — конический вытеснитель; 4 — коническая опорная решетка, совмещенная с вытеснителем.

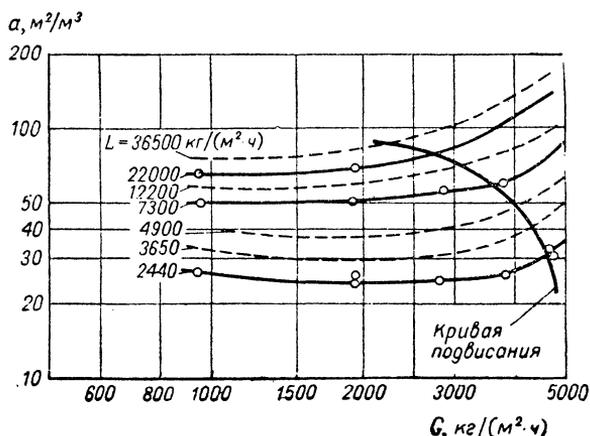


Рис. I-63. Действительная межфазовая поверхность a колец Рашига 25 мм.

Это уравнение согласуется с результатами, полученными на насадке из колец Рашига и седел Берля.

Действительную поверхность контакта фаз не следует смешивать со смоченной поверхностью насадки. Первую образуют поверхности пленок, струй и жидкости, удерживаемой в зазорах насадки, и она отражает среднее статистическое время проникания, предшествующее смещению и обновлению поверхности в зазорах насадки.

Действительная поверхность контакта насадки из колец Рашига 25×25 мм определяется из уравнения¹:

$$a = k_r a / k_r$$

Имеются данные по k_r , полученные при испарении воды из предварительно насыщенной насадки², и по k_r при увлажнении воздуха³. Отношение активной поверхности к общей поверхности насадки при плотности орошения $2600 < L < 12500$ кг/(м²·ч) может быть представлено соотношением:

$$\frac{a}{a_{\text{общ}}} = 0,24G^{0,31}L^{0,07} \quad (\text{I-49})$$

Шульман и др. (см. выше) определяли действительную поверхность контакта путем сопоставления данных по возгонке нафталина, из которого была изготовлена насадка, и величин $k_r a$, рассчитанных с учетом сопротивления жидкой фазы. Результаты свидетельствуют о более сильном влиянии плотности орошения. Действительная поверхность контакта для насадок из колец Рашига и седел Берля в широких пределах изменения плотности орошения приводится на рис. I-63 и I-64.

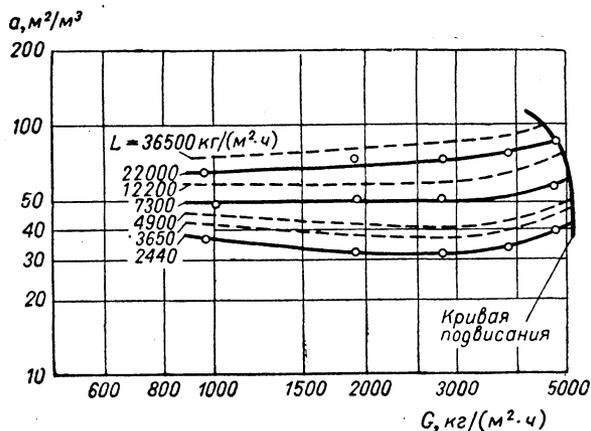


Рис. I-64. Действительная межфазовая поверхность a седел Берля (25 мм).

Иошида и Койанаги (см. выше) рассчитали действительную поверхность контакта для колец Рашига и седел Берля путем сравнения скоростей массопередачи в колонне при неизменной поверхности насадки. Влияние плотности орошения ниже точки подвисяния для

систем с различным поверхностным натяжением показано на рис. I-65 и I-66.

Пратт¹ разработал другой подход к определению действительной поверхности контакта — с использованием понятия минимальной эффективности скорости

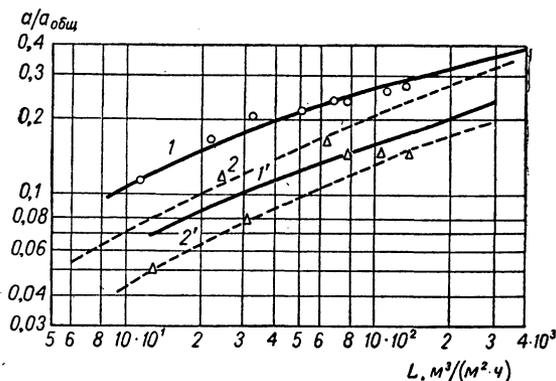


Рис. I-65. Отношение действительной межфазовой поверхности a к общей поверхности насадки $a_{\text{общ}}$ из колец Рашига, орошаемой метанолом и водой. Высота слоя насадки 400 мм, $t = 15^\circ \text{C}$:

1 и 1' — орошение метанолом; 2 и 2' — орошение водой; \circ — насадка 25 мм; Δ — насадка 15 мм.

и жидкости (М. Э. С. Ж.). В противовес мнению других исследователей, он утверждает, что для любого типа насадки существует минимальная скорость жидкости, при которой действительная поверхность контакта дости-

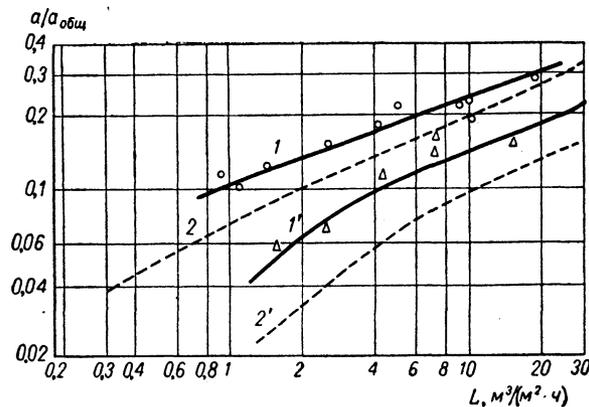


Рис. I-66. Отношение действительной межфазовой поверхности a к общей поверхности насадки $a_{\text{общ}}$ из седел Берля, орошаемой метанолом и водой. Высота слоя насадки 400 мм, $t = 15^\circ \text{C}$:

1 и 1' — орошение метанолом; 2 и 2' — орошение водой; \circ — насадка 25 мм; Δ — насадка 12 мм.

гает максимума и в дальнейшем не меняется. Этот вывод основан на том факте, что величина $k_r a$ перестает изменяться выше определенной плотности орошения, за-

¹ Weisman, Bonilla, Ind. Eng. Chem., 42, 1099 (1950).

² Tacker, Hougén, Chem. Eng. Progr., 45, 188 (1949).

³ McAdams et al., Chem. Eng. Progr., 45, 241 (1949).

⁴ Pratt, Trans. Inst. Chem. Engrs, 29, 195 (1951).

висящей от свойств системы и орошающей жидкости. Графическое определение М. Э. С. Ж. показано на

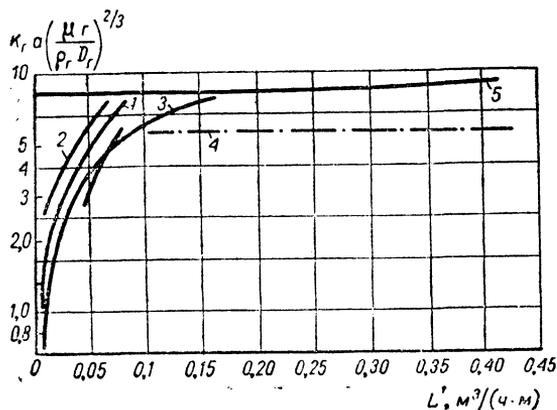


Рис. I-67. Графическое определение минимальной эффективной скорости жидкости ($G = 2440 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; L' — плотность орошения, отнесенная к периметру насадки, $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м})$: 1 — абсорбция паров этанола; 2 — испарение; 3 и 4 — абсорбция аммиака; 5 — предельная прямая для всех систем.

рис. I-67. Геометрические характеристики некоторых насадок приводятся в табл. I-7.

ТАБЛИЦА I-7

Геометрические характеристики насадок

Насадка	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Периметр, $\text{м}/\text{м}^2$	Эквивалентный диаметр, м
Кольца Рашига			
12,5 мм	374	298	0,0071
25 мм	190	160,5	0,01695
38 мм	118	102	0,0267
50 мм	95,3	85,3	0,0342
Седла Берля			
12,5 мм	463	463	0,00588
25 мм	259	259	0,0107
38 мм	164	164	0,0171

Массопередача в жидкой фазе

На основании данных по десорбции кислорода, водорода и двуокиси углерода было установлено¹, что до точки подвисяния, выше которой резко меняются межфазовая поверхность и степень турбулизации, величина $H_{ж}$ не зависит от скорости газа. Кроме того, до точки подвисяния величина $H_{ж}$ экспоненциально зависит от L (рис. I-68, I-69 и I-70).

Предложена эмпирическая зависимость, связывающая высоту единицы переноса в жидкой фазе $H_{ж}$ с па-

раметрами процесса и физическими свойствами системы:

$$H_{ж} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{L}{\mu_{ж}} \right)^n \left(\frac{\mu_{ж}}{\rho_{ж} D_{ж}} \right)^{0,5} \quad (I-50)$$

где α и n — коэффициенты, зависящие от межфазовой поверхности и геометрии насадки; L — плотность орошения; $D_{ж}$ — коэффициент диффузии в жидкой фазе.

Однако уравнение (I-50) имеет ограниченное применение ввиду того, что отношение $L/\mu_{ж}$ неверно передает влияние числа Рейнольдса, так как эффективная поверхность контакта фаз зависит от плотности орошения¹. В корреляции Шервуда и Холлоуэя принято, что поверхность контакта не зависит от плотности орошения, так как коэффициенты уравнения постоянны для данного размера насадки. Получено более точное соотношение в безразмерном виде¹:

$$\frac{H_{ж}}{(\mu_{ж}^2/\rho_{ж}^2 g)^{1/4}} = C \text{Re}^p (\text{Sc})^q \quad (I-51)$$

Это уравнение по форме подобно зависимости²:

$$\frac{H_{ж}}{(\mu_{ж}^2/\rho_{ж}^2 g)^{1/4}} = \frac{1}{0,015} \left(\frac{L}{a_3 \mu_{ж}} \right)^{1/3} (\text{Sc})^{2/3} \quad (I-52)$$

где $H_{ж}$ — высота единицы переноса в жидкой фазе, м ; $\mu_{ж}$ — вязкость жидкости, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; Re — критерий Рейнольдса; Sc — критерий Шмидта; L — плотность орошения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$; a_3 — эффективная поверхность контакта фаз, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Влияние критерия Рейнольдса на ВЕП показано на рис. I-70. Показатель степени p в уравнении (I-51) оказывается переменной величиной.

В соответствии с аналогией J -фактора, получено уравнение³, подобное зависимостям (I-51) и (I-52):

$$\frac{H_{ж}}{(\mu_{ж}^2/\rho_{ж}^2 g)^{1/4}} = \frac{1}{0,021} \left(\frac{L}{a_3 \mu_{ж}} \right)^{0,51} (\text{Sc})^{0,5} \quad (I-53)$$

Это уравнение справедливо для колец Рашига. Величина a_3 — эффективная поверхность контакта фаз, равная общей геометрической поверхности насадки, остальные обозначения см. в уравнении (I-52).

На основании теории проникания жидких пленок для колец Рашига получено следующее уравнение:

$$\frac{H_{ж}}{(\mu_{ж}^2/\rho_{ж}^2 g)^{1/4}} = \frac{1}{0,013} \left(\frac{L}{a_3 \mu_{ж}} \right)^{0,5} (\text{Sc})^{0,5} \quad (I-54)$$

Уравнение дает совпадение в пределах 20% расчетной величины ВЕП в жидкой фазе с опытными данными для жидких пленок, полученными на кольцах размером 12—50 мм (см. 4), 12×12 мм (см. 5), 25×25 мм (см. 6), 15×15 мм и 25×25 мм (см. 7).

¹ Yoshida, Koyanagi, Ind. Eng. Chem., 50, 365 (1958).
² Van Krevelen, Hofstijzer, Chem. Eng. Progr., 44, 529 (1948).
³ Onda, Sada, Murase, Am. Inst. Chem. Engrs J., 5, 235 (1959).
⁴ Sherwood, Holloway, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 36, 39 (1940).
⁵ Deed et al., Ind. Eng. Chem., 39, 766 (1947).
⁶ Vivian, Whitney, Chem. Eng. Progr., 43, 691 (1947).
⁷ Hikita, Chem. Eng. Japan, 20, 113 (1956).

¹ Sherwood, Holloway, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 36, 39 (1940).

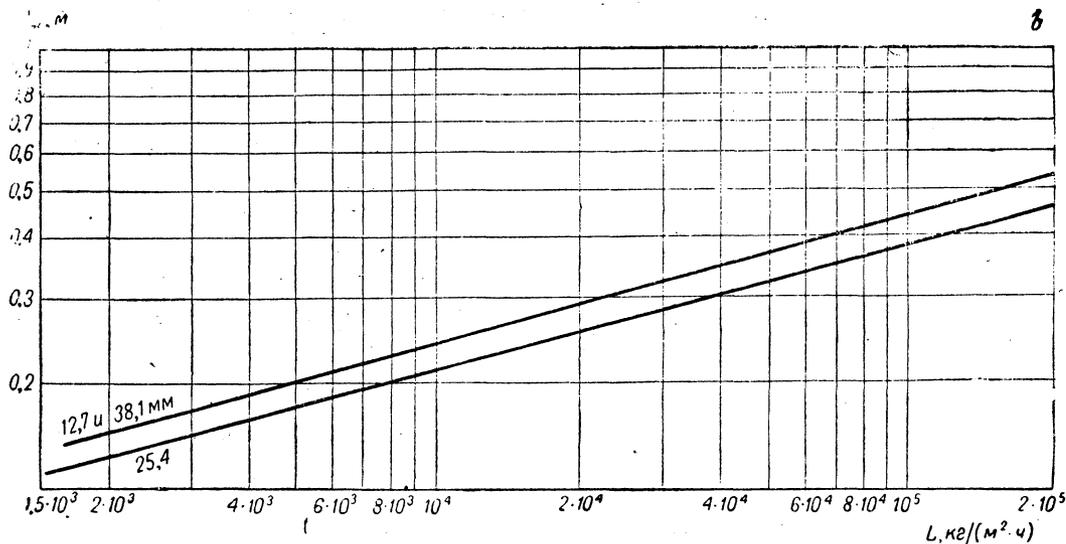
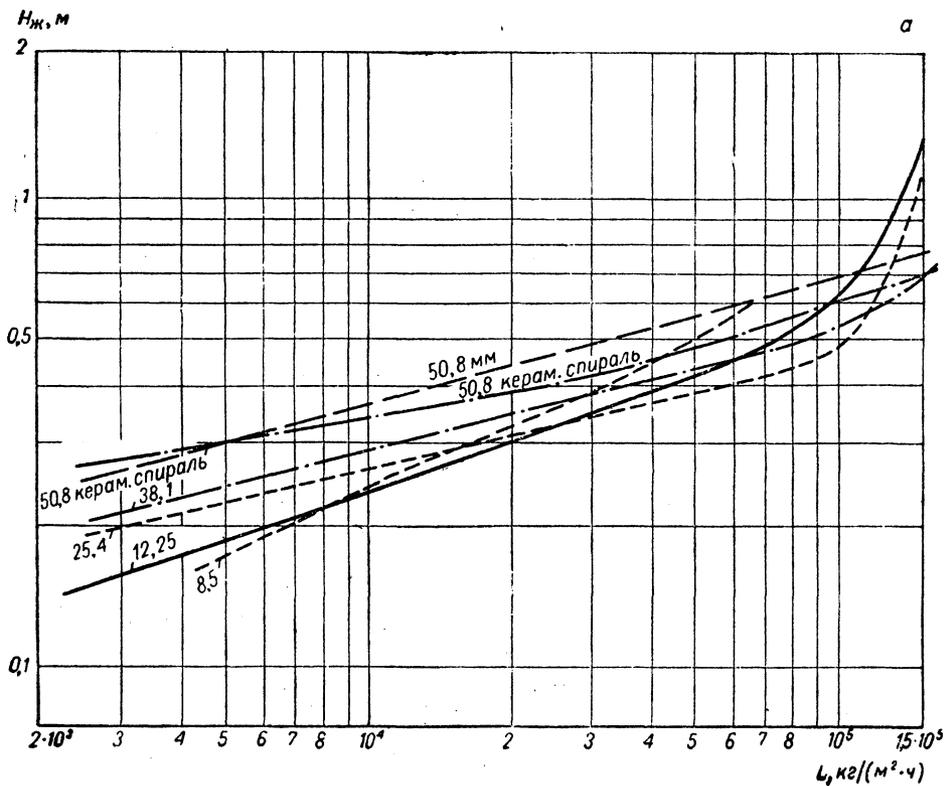


Рис. I-68. Зависимость высоты единицы переноса в жидкой фазе $H_{ж}$ от плотности орошения L . Десорбция O_2 , H_2 и CO_2 из воды при $25^\circ C$ на колонне диаметром 500 мм:

a — керамическая кольцевая насадка, высота слоя насадки 330—1250 мм; кривые для спиралей 50 мм. Справедливы при загрузке насадки регулярно и навалом, остальные — только для насадки, загруженной навалом; **b** — керамические седла Берля, высота слоя насадки 380—360 мм.

Шульман и др.¹ для колец Рашига и седел Берля предлагают следующее уравнение:

$$\frac{k_{ж}d_s}{D_{ж}} = 25,1 \left(\frac{D_{ж}L}{\mu_{ж}} \right)^{0,45} (Sc)^{0,5} \quad (I-55)$$

где $D_{ж}$ — коэффициент диффузии в жидкой фазе, $m^2/сек$; d_s — диаметр сферы, поверхность которой равна

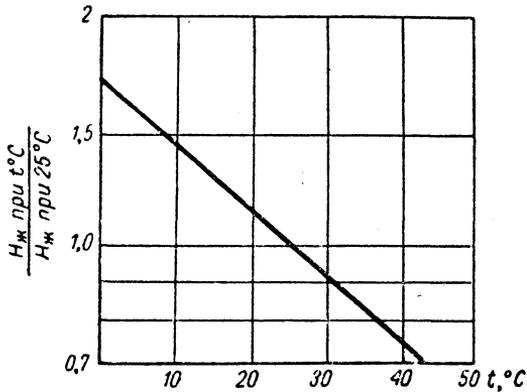


Рис. I-69. График пересчета величин $H_{ж}$ при 25°С на другие температуры.

поверхности элемента насадки, m ; $k_{ж}$ — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, $кмоль/(сек \cdot м^2 \cdot кмоль/м^3)$; L — плотность орошения, $кг/(сек \cdot м^2)$.

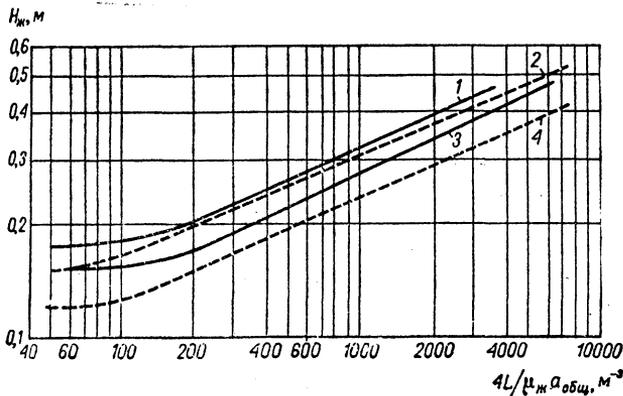


Рис. I-70. Высота единицы переноса $H_{ж}$ для системы CO_2 — воздух — вода:

Кривая	Насадка		
	тип	размер, мм	высота слоя, мм
1	Седла Берля	12,5	400
2	Кольца Рашига	15 и 25	400
3	Седла Берля	25	400
4	Кольца Рашига	15 и 25	200

Влияние скорости газа в перечисленных работах не обнаружено, однако плотность орошения при экспериментальной оценке влияния скорости газа не превы-

шала 29000 $кг/(ч \cdot м^2)$. При большей плотности орошения [65000—270000 $кг/(ч \cdot м^2)$] на системе CO_2 — воздух — вода было обнаружено¹ существенное влияние скорости газа на величину $H_{о.ж}$. Полученные данные показывают, что на насадке из колец Рашига 50 мм при $L > 65000$ $кг/(м^2 \cdot ч)$ $H_{о.ж}$ уменьшается с возрастанием скорости газа. Авторы предположили, что при чрезвычайно больших плотностях орошения имеет место значительная внутренняя рециркуляция газа, выравнивающая концентрационный градиент по высоте колонны. Это приводит к снижению скорости переноса массы. Степень обратного перемешивания уменьшается при увеличении скорости газа. Установлено, что эффект обратного перемешивания становится значительным, когда отношение средних скоростей жидкости и газа больше единицы (рис. I-71).

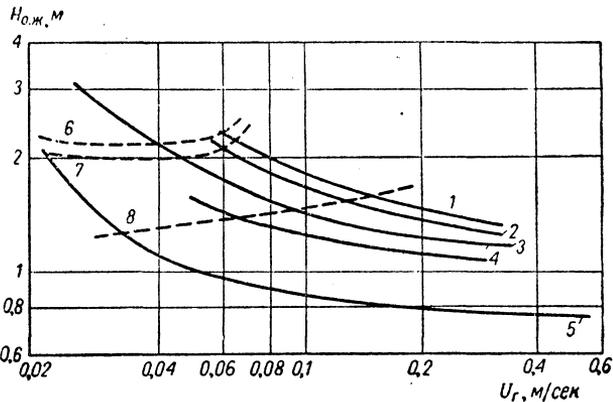


Рис. I-71. Влияние скорости газа $U_{г}$ на $H_{о.ж}$ при больших плотностях орошения.

Абсорбция CO_2 водой; насадка из стальных колец Рашига 50 мм; G и L выражены в $кмоль/(м^2 \cdot ч)$, $t = 18^\circ C$;

$$\begin{aligned} 1 - L &= 272 \cdot 10^3 \text{ кг}/(м^2 \cdot ч) & 6 - \frac{mG}{L} &= 0,9 \\ 2 - L &= 223 \cdot 10^3 & 7 - \frac{mG}{L} &= 1,0 \\ 3 - L &= 166 \cdot 10^3 & 8 - \frac{mG}{L} &= 2,0 \\ 4 - L &= 121 \cdot 10^3 & & \\ 5 - L &= 66,3 \cdot 10^3 & & \end{aligned}$$

По данным, полученным на колонне диаметром 150 мм с насадкой Стедмена, составлено эмпирическое уравнение² для общего коэффициента массопередачи в жидкой фазе $K_{жл}$:

$$K_{жл} = 3,46 \cdot 10^5 D_{ж} L^{0,77} \times \left(\frac{\mu_{ж}}{\rho_{ж} D_{ж}} \right)^{0,53} \text{ кмоль}/(сек \cdot м^3 \cdot кмоль/м^3) \quad (I-56)$$

Массопередача в газовой фазе

В настоящее время нет достаточно удовлетворительных обобщающих уравнений для предсказания поведения газовой фазы в колоннах при различных

¹ Cooper, Christl, Perry, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 37, 979 (1941).

² Knoedler, Bonilla, Ind. Eng. Chem., 50, 125 (1956).

геометрических характеристиках насадки. Принципиальные трудности на пути разработки таких уравнений — это, во-первых, зависимость действительной поверхности контакта фаз от плотности орошения и поверхностного натяжения и, во-вторых, отсутствие реальных систем с

нарушению пленки и изменению действительной поверхности массопередачи¹. В последнем случае положение осложняется тем, что на общую скорость процесса могут влиять скорость химической реакции или скорость диффузии реагирующих компонентов в жид-

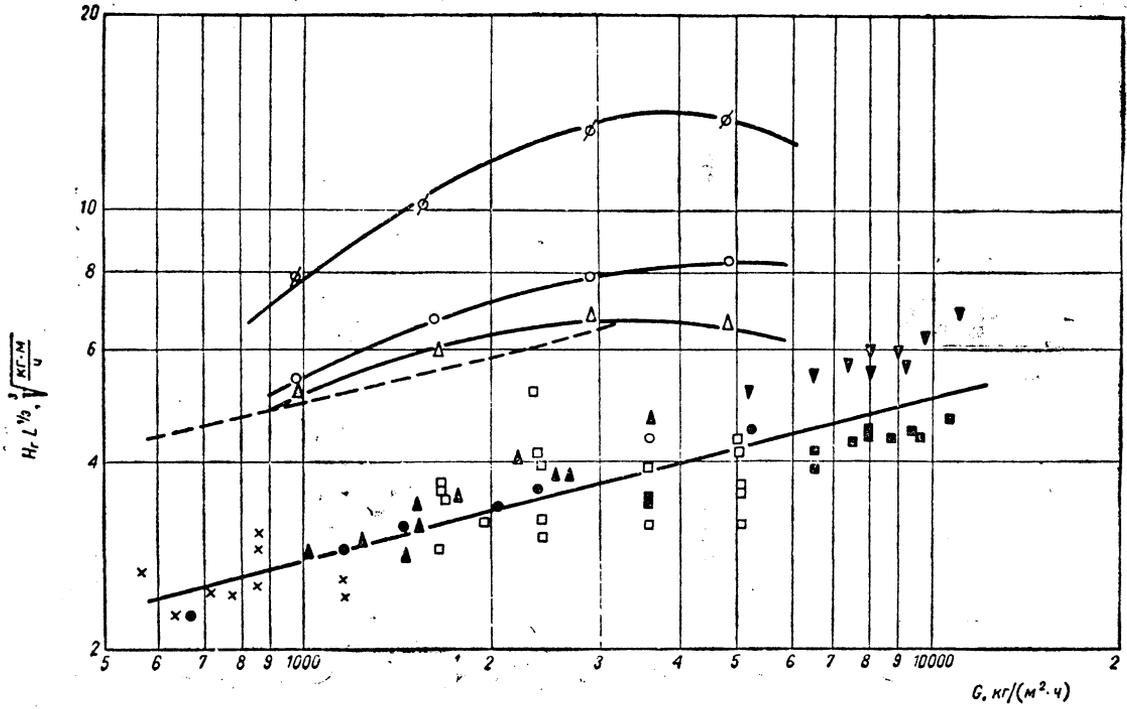


Рис. I-72. Корреляция данных по сопротивлению массопередаче в газовой фазе для насадочных колонн (Sherwood, Pigford, Absorption and Extraction, New York, 1952):

○ — испарение воды, кольца 38 мм, $820 < L < 2980 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; × — абсорбция NH_3 , спиральная насадка 75 мм; ■ — абсорбция SO_2 раствором каустика, регулярно уложенная спиральная насадка 75 мм; ▼ — спиральная насадка, навалом; φ — абсорбция NH_3 водой, кольца 38 мм, $L = 2500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; ○ — то же, $L = 7500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; △ — то же, $L = 22\ 500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; ▲ — абсорбция Cl_2 раствором NaOH , $L = 60\ 000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, поправка на $D_r^{0.5}$; □ — адиабатическое испарение воды, графитовые кольца 25 мм, высота слоя насадки 300 мм, диаметр колонны 100 мм.

сопротивлением массопередаче только в газовой фазе, не осложненных влиянием теплообмена или химической реакции.

Исследование поведения газовых пленок проводилось на следующих системах:

- 1) испарение чистых жидкостей в поток газа;
- 2) абсорбция легко растворимого газа жидкостью с высокой поглотительной способностью;
- 3) абсорбция легко растворимого газа жидкостью, равновесное парциальное давление над которой равно нулю в связи с необратимой химической реакцией.

В первых двух случаях теплоты испарения и растворения могут повлиять таким образом, что локальные температурные изменения отразятся на константе равновесия и местные равновесные условия не будут соответствовать средним по объему, а локальные изменения поверхностного натяжения могут привести к

кости, поэтому скорость абсорбции может определяться сопротивлением в жидкой фазе.

Была сделана попытка² обобщить данные по газовой фазе в орошаемой колонне на основе зависимости следующего вида:

$$H_r = \frac{0,27G^{0,31}}{L^{0,33}} \cdot m \tag{I-57}$$

где H_r — высота единицы переноса в газовой фазе, м; G — скорость газа, $\text{кг}/(\text{сек} \cdot \text{м}^2)$; L — плотность орошения, $\text{кг}/(\text{сек} \cdot \text{м}^2)$.

Графически эта зависимость представлена на рис. I-72.

¹ Bond, Donald, Chem. Eng. Sci., 6, 237 (1957).
² Sherwood, Holloway, Trans, Am. Inst. Chem. Engrs, 36, 21 (1940).

Отклонение расчетной кривой от опытных данных оказалось очень большим, причем максимальное отклонение наблюдается для системы аммиачно-воздушная смесь — вода. Поправка на изменение критерия Шмидта для различных систем в уравнение не введена. Кроме того, корреляция ограничена областью изменения нагрузок в пределах 60%, выше которой резкое изменение поверхности контакта фаз приводит к снижению H_r при увеличении скорости пара.

Влияние плотности орошения на массопередачу в газовой фазе, отражающее эффект изменения поверхности массообмена, показано на рис. 1-73.

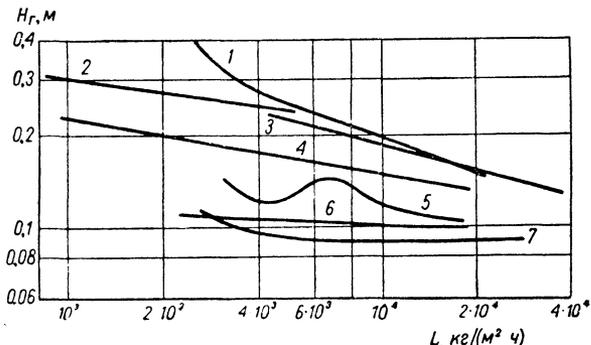


Рис. 1-73. Зависимость высоты единицы переноса в газовой фазе H_r от плотности орошения L , по данным разных авторов:

1 — Fellingner; 2 — Dryer, Dodge; 3 — Whitney, Vivian; 4 — Yoshida, Tanaka; 5 — Lynch, Wilke; 6 — McAdams, Pohlenz, St. John, 7 — Surosky, Dodge.

Наиболее обширные работы по массопередаче в газовой фазе в насадочных колоннах проведены на системах с постоянной поверхностью контакта при массопередаче от насадки, предварительно насыщенной жидкостью. Сопоставляя поверхность массообмена, определенную по опытным данным для орошаемой насадочной колонны, с обобщениями по скорости массопередачи на системах с постоянной поверхностью контакта, можно получить действительный коэффициент массопередачи.

При исследовании¹ режимов работы колонн с насадкой из седел и сфер получены уравнения для определения факторов массо- и теплопередачи:

$$J_D = \frac{k_r \rho_{г.пл} M_{ср}}{G} \left(\frac{\mu_r}{\rho_r D_r} \right)^{2/3} = 0,99 \left(\frac{d_3 G}{\mu_r} \right)^{-0,41} \quad (I-58)$$

$$J_H = \frac{\alpha_r}{c_p G} \left(\frac{c_p \mu_r}{\lambda} \right)^{2/3} = 1,064 \left(\frac{d_3 G}{\mu_r} \right)^{-0,41} \quad (I-59)$$

Уравнения (I-58) и (I-59) справедливы при $Re > 350$. Аналогичные уравнения получены² для $70 < Re < 3000$ ($Re = \frac{G \sqrt{F_H}}{\mu_r}$). Для седел Берля:

$$J_D = 0,855 \left(\frac{G \sqrt{F_H}}{\mu_r} \right)^{-0,34} = \frac{k_r \rho_{г.пл} M_{ср}}{G} \left(\frac{\mu_r}{\rho_r D_r} \right)^{2/3} \quad (I-60)$$

$$J_H = 0,920 \left(\frac{G \sqrt{F_H}}{\mu_r} \right)^{-0,34} = \frac{\alpha_r}{c_p G} \left(\frac{c_p \mu_r}{\lambda} \right)^{2/3} \quad (I-61)$$

Для колец Рашига:

$$J_D = 1,070 \left(\frac{G \sqrt{F_H}}{\mu_r} \right)^{-0,41} = \frac{k_r \rho_{г.пл} M_{ср}}{G} \left(\frac{\mu_r}{\rho_r D_r} \right)^{2/3} \quad (I-62)$$

$$J_H = 1,148 \left(\frac{G \sqrt{F_H}}{\mu_r} \right)^{-0,41} = \frac{\alpha_r}{c_p G} \left(\frac{c_p \mu_r}{\lambda} \right)^{2/3} \quad (I-63)$$

Шульман и Марголис¹ на основании аналогии Чилтона — Кольборна (J -фактора), используя данные, полученные на системе нафталин — воздух, а также данные других авторов², получили следующее уравнение:

$$J_D = \frac{k_r M_{ср} \rho_{вср}}{G} \left(\frac{\mu_r}{\rho_r D_r} \right)^{2/3} = 1,195 \left[\frac{d_3 G}{\mu_r (1 - \epsilon)} \right]^{-0,36} \quad (I-64)$$

Авторы утверждают, что путем сопоставления с известной действительной поверхностью массопередачи можно с достоверностью предсказывать физический тип коэффициента массоотдачи в газовой пленке.

В уравнениях (I-58) — (I-64): F_H — внешняя поверхность элемента насадки, m^2 ; c_p — теплоемкость газа, $дж/(кг \cdot град)$; J — безразмерный фактор тепло- или массопередачи по Чилтону и Кольборну; D_r — коэффициент диффузии в газовой фазе, $m^2/сек$; d_3 — эквивалентный диаметр насадки, m ; G — скорость газа, $кг/(сек \cdot m^2)$; λ — теплопроводность газа, $вт/(м \cdot град)$; k_r — коэффициент массоотдачи в газовой фазе, $кмоль/(сек \cdot m^2 \cdot атм)$; $M_{ср}$ — средний молекулярный вес газа, $кг/кмоль$; $\rho_{вср}$ — среднелогарифмическое парциальное давление инертного газа; $\rho_{г.пл}$ — парциальное давление инертного газа в газовой пленке, $атм$; μ_r — вязкость газа, $кг/(м \cdot сек)$; ρ_r — плотность газа, $кг/м^3$; ϵ — доля пустот (свободный объем); α_r — коэффициент теплоотдачи газа, $вт/(м^2 \cdot град)$.

Тонес и Крамерс³, рассмотрев вопрос о применимости обобщенной J -функции к насадочным колоннам, отмечают, что при изменении условий массопередачи меняется относительное влияние критериев Рейнольдса и Шмидта. Этот вывод согласуется с данными других авторов⁴, которые исследовали массопередачу в жидкой фазе в насадочной колонне в турбулентном режиме. Тонес и Крамерс считают, что процесс массопередачи осуществляется с помощью трех механизмов: турбулентного, ламинарного и в застойных зонах. Для сферической насадки с плотной упаковкой получено эмпирическое уравнение:

$$Sh = (k_1 Re^{1/3} Sc^{1/3}) + (k_2 Re^{0,8} Sc^{0,4}) + k_3 Re \quad (I-65)$$

турбулентный ламинарный застойный

где $Sh = \frac{E \lambda d_3}{(1 - E) \epsilon D_r}$ — критерий Шервуда; ϵ — доля пустот; $E = \frac{\pi d^2}{4}$ — площадь поперечного сечения; D_r — коэффициент диффузии; d_3 — эквивалентный диаметр элемента насадки; k_1, k_2, k_3 — константы.

¹ Shulman, Margolis, Am. Inst. Chem. Engrs J., 3, 157 (1957).

² Lynch, Wilke, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 18 (1955). — Yoshida, Chem. Eng. Progr., Symp. Ser. 16, 51, 59 (1955).

³ Thoenes, Kramers, Chem. Eng. Sci., 8, 271 (1953).

⁴ Goffney, Drew, Ind. Eng. Chem., 42, 1126 (1950).

¹ Gamson, Thodos, Hougén, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 39, 1 (1943).

² Tacker, Hougén, Chem. Eng. Progr., 44, 529 (1948).

Абсорбция, сопровождаемая химической реакцией

Для более глубокого ознакомления с теорией этого вопроса см. т. I, гл. VI.

Анализ влияния реакции первого порядка и быстрой необратимой реакции второго порядка на скорость массопередачи был проведен с использованием двух-плечной теории Уитмена, теории проникания Хигби и теории обновления поверхности Данквертса, являющейся модификацией теории проникания. Если абсорбция сопровождается реакцией первого порядка, все три теории дают совпадающий результат.

Данквертс¹ сравнил эффективные коэффициенты массоотдачи (отнесенные к единице поверхности), рассчитанные тремя методами.

Двулученная теория Шервуда и Пигфорда:

$$k'_{ж} = \frac{D_{ж}k}{\text{th}(D_{ж}k/k_{ж})} \quad (\text{I-66})$$

Теория проникания Хигби:

$$k'_{ж} = \sqrt{D_{ж}k} \left(1 + \frac{k_{ж}^2}{8D_{ж}k} \right) \text{erf} \frac{2}{k_{ж}} \sqrt{\frac{D_{ж}k}{\pi}} + \frac{2}{k_{ж}} D_{ж}k \exp\left(-\frac{4D_{ж}k}{\pi k_{ж}^2}\right) \quad (\text{I-67})$$

Теория обновления поверхности Данквертса:

$$k'_{ж} = \sqrt{D_{ж}k + k_{ж}^2} \quad (\text{I-68})$$

Здесь $k'_{ж}$ — средний эффективный коэффициент массоотдачи; k — константа скорости химической реакции; $k_{ж}$ — коэффициент массоотдачи при физической абсорбции; $D_{ж}$ — коэффициент диффузии в жидкой фазе

$$\text{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Установлено, что влияние скорости реакции на общую скорость процесса однозначно определяется значением параметра $D_{ж}k/k_{ж}^2$ для всех трех моделей. Сравнение скоростей абсорбции, сопровождающейся химической реакцией, и простой физической абсорбции при нулевой концентрации абсорбируемого газа в объеме растворителя показало, что во всех трех случаях при низкой скорости реакции, когда $\frac{D_{ж}k}{k_{ж}^2} \rightarrow 0$,

скорость процесса равна скорости физической абсорбции, а при больших скоростях по сравнению с $k_{ж}$ (при больших значениях $D_{ж}k/k_{ж}^2$) абсорбция определяется сопротивлением в газовой фазе.

Случай абсорбции, сопровождающейся химической реакцией второго порядка, не решен аналитически за исключением некоторых частных случаев. Шервуд и Пигфорд² на основе двулученной теории и теории проникания проанализировали процесс с быстрой не-

обратимой реакцией второго порядка. Двулученная теория привела к следующему уравнению:

$$k'_{ж} = k_{ж} \left(1 + \frac{D_B}{D_A} \cdot \frac{q}{c_{ai}} \right) \quad (\text{I-69})$$

Теория проникания дает уравнение:

$$k'_{ж} = \frac{k_{ж}}{\text{erf}(\alpha/D_A)^{1/2}} \quad (\text{I-70})$$

Здесь D_A — коэффициент диффузии абсорбируемого газа в жидкости, $\text{м}^2/\text{сек}$; D_B — коэффициент диффузии

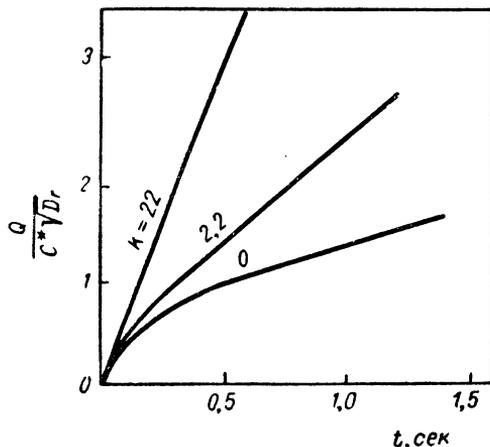


Рис. I-74. Влияние реакции первого порядка на неустановившуюся абсорбцию:

Q — количество газа, абсорбированного за время t ; c^* — концентрация несвязанного растворенного газа на поверхности жидкости; $D_{г}$ — коэффициент диффузии газа в жидкости; k — константа скорости реакции первого порядка (в сек^{-1}).

реагентов в жидкой фазе, $\text{м}^2/\text{сек}$; c_{ai} — концентрация абсорбируемого газа на межфазовой поверхности, $\text{кмоль}/\text{м}^3$; q — концентрация непрореагировавшего реагента в объеме жидкости, $\text{кмоль}/\text{м}^3$; $\alpha = \frac{x_2}{4}$; x_2 — эффективное расстояние в жидкой пленке от межфазовой поверхности до зоны реакции, м ; $k_{ж}$ — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе для физической абсорбции, $\text{кмоль}/(\text{сек} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кмоль}/\text{м}^3)$; $k'_{ж}$ — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе для абсорбции, сопровождающейся химической реакцией.

Для простейшего случая, когда скорости диффузии абсорбируемого газа и реагентов в жидкой фазе равны, т. е. $D_A/D_B=1$, получаем:

$$k'_{ж} = k_{ж} \left(1 + \frac{q}{c_{ai}} \right) \quad (\text{I-71})$$

С достаточной степенью точности можно принять также:

$$k'_{ж} = k_{ж} \left(1 + \frac{D_A}{D_B} \cdot \frac{q}{c_{ai}} \right) \quad (\text{I-72})$$

¹ Danckwerts, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 456 (1955).

² Sherwood, Pigford, Absorption and Extraction, New York, 1962.

Из уравнений (1-69) и (1-70) следует, что анализ процесса на основе моделей Уитмена и Хигби приводит к одинаковым результатам. Из этих уравнений видно, что скорость абсорбции, сопровождающейся быстрой необратимой химической реакцией второго порядка, линейно зависит от величины q/c_{a1} .

Жидкость в застойных зонах используется более эффективно, увеличивая активную межфазовую поверхность, и скорость массопередачи в этом случае менее чувствительна к изменению плотности орошения, чем в случае простой физической абсорбции (рис. 1-75).

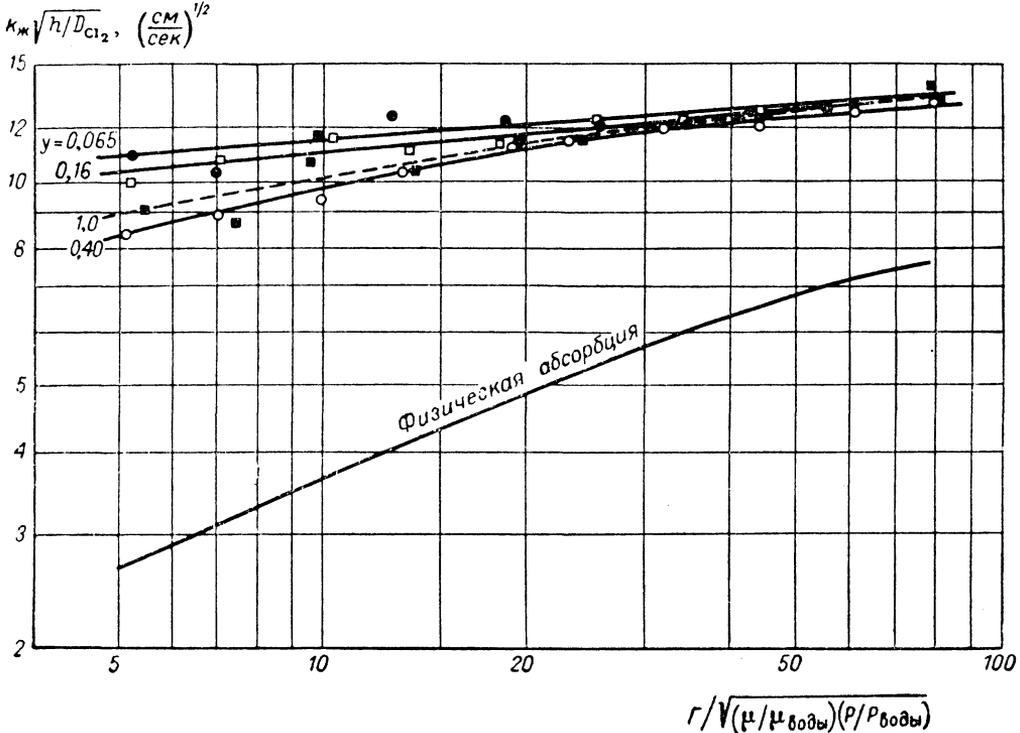


Рис. 1-75. Абсорбция хлора раствором хлорида железа [Gilliland, Baddour, Am. Inst. Chem. Engrs J., 4, 223 (1958)];

Γ — линейная плотность орошения, г/(см · мин); h — высота пленочной колонны, см; B_C — начальная концентрация нелетучего компонента в жидкой фазе, реагирующего с абсорбируемым газом ($B_C = 0,177$ во всех случаях); y — мольная доля абсорбируемого компонента в газовой фазе; $q = B_C/2C^*$

Точка	y	q	Точка	y	q
●	0,065	24,3—24,7	○	0,40	3,89—3,97
□	0,16	9,8—9,85	■	1,0	1,55—1,64

Более общий анализ процесса абсорбции, сопровождающейся химической реакцией на основе модели проникания, был проведен Перри и Пигфордом¹.

На более полное использование жидкости в застойных зонах при абсорбции, сопровождающейся химической реакцией, по сравнению с физической абсорбцией указывает Данквертс². При быстром связывании абсорбируемого газа его концентрационный градиент в жидкости, рассчитанный по теории проникания, оказывается отрицательным. Следовательно, время контакта, предшествующее обновлению поверхности, влияет на скорость абсорбции с химической реакцией не в той же степени, как в случае физической абсорбции (рис. 1-74). Поэтому, если абсорбция сопровождается реак-

Особенности систем и насадок

Ввиду того, что разработка теории массопередачи в настоящее время еще не завершена, скорость массопередачи в большинстве случаев определяется путем сопоставления с уже исследованными системами. Сопоставление обычно проводится при одинаковых режимах работы колонны и насадке с эквивалентными геометрическими характеристиками, поэтому различия обуславливаются главным образом физическими свойствами сравниваемых систем.

Ниже излагаются особенности наиболее характерных систем.

Аммиачно-воздушная смесь — вода. В результате исследований имеется возможность провести оценку сравнительной эффективности насадочных тел с различными

¹ Perry, Pigford, Ind. Eng. Chem., 45, 1247 (1953).

² Danckwerts, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 456 (1955).

геометрическими характеристиками. Сначала исходили из гипотезы, что определяющее сопротивление этой системы сосредоточено в газовой фазе, однако более поздние работы показали, что сопротивление жидкой фазы может составлять 5—40% при 25°С. ВЕП для системы аммиачно-воздушная смесь — вода больше, чем это можно ожидать для простой физической абсорбции. Полагают, что такое anomальное поведение системы обусловлено выделением тепла на межфазовой

$K_{га}, \text{кмоль}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм})$

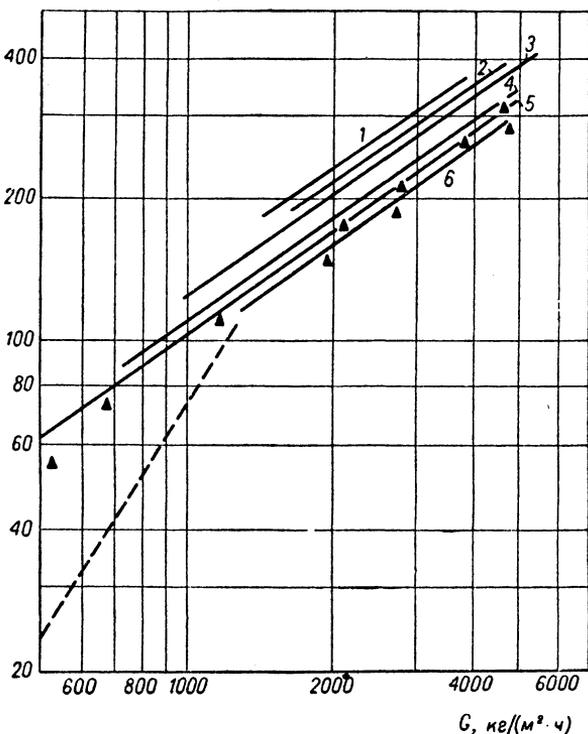


Рис. I-76. Зависимость коэффициента массопередачи $K_{га}$ от скорости газа G при абсорбции NH_3 водой на блочной насадке № 6295 высотой 0,685 мм:

Кривая	$L, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Кривая	$L, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$
1	51 300	4	20 000
2	73 200	5 (▲)	14 650
3	33 000	6	9 300

поверхности, что приводит к местным изменениям поверхностного натяжения (это, в свою очередь, вызывает уменьшение действительной поверхности контакта) и к местным отклонениям равновесной концентрации от среднеобъемных условий.

Феллингер¹ провел обширное исследование этой системы на насадке из колец Рашига, седел Берля и спиральных тел и не обнаружил существенного различия в форме зависимости эффективности массопередачи от размера насадки. Оптимальный размер насадки

оказался 25 мм. Седла Берля (размером до 25 мм) примерно на 25% эффективнее колец Рашига такого же размера.

Во всех случаях максимум $H_{ог}$ достигался до наступления режима подвисяния. Возрастания $H_{ог}$ со скоростью газа следует ожидать, так как $K_{га} \propto G^{0,5-0,8}$ для постоянной поверхности, а $H_{г} \propto G/K_{га}(1-y)$. Таким образом, быстрое увеличение действительной межфазовой поверхности до режима подвисяния перекрывает снижение эффективности массопередачи, отнесенной к постоянной поверхности.

При обширном исследовании этой системы на блочной насадке¹ установлено, что $K_{га} \propto G^{0,83}$ и $L^{0,17}$ при $L < 50\,000 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ (рис. I-76). Однако при увеличении L до $72\,000 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ коэффициент массопередачи уменьшается. Такой характер изменения коэффициента массопередачи можно объяснить явлением обратного перемешивания.

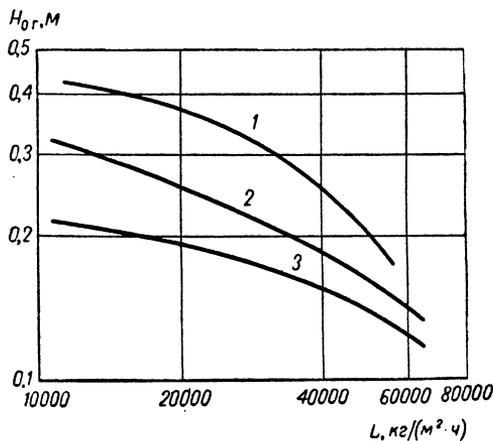


Рис. I-77. Сравнительные данные по абсорбции NH_3 водой при $G = 2440 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$:

1 — кольца Рашига 25 мм; 2 — седла Берля керамические 25 мм; 3 — седла «Инталокс» керамические 25 мм.

Сравнение эффективности массопередачи для седел «Инталокс» с другими типами насадки (рис. I-77) показало, что более равномерное распределение жидкости на седлах «Инталокс» приводит к повышенной эффективности насадки этого типа².

Установлено³ (рис. I-78), что на насадке «Фибerglass» в колонне диаметром 150 мм эффективный массоперен достигается при $L > 9600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Полиэтиленовые розетки Теллера 25 мм обладают меньшей чувствительностью к плотности орошения, чем кольца Рашига 20 мм из того же материала (рис. I-79). Из-за гидрофобности полиэтилена процесс массопередачи происходил главным образом при быстрой агрегации и обновлении поверхности, что лишний раз подтверждает теорию проницания Хигби⁴. Про-

¹ Parsely et al., Chem. Eng. Progr., 46, 17 (1950). — Molstad et al., Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 39, 605 (1953).

² Wen, M. S. Thesis, Univ. of West Virginia, 1953.

³ Williams, Akell, Talbot, Chem. Eng. Progr., 43, 585 (1947).

⁴ Teller, Chem. Eng. Progr., 50, 65 (1954).

¹ Fellingner, Sc. D. Thesis, M. I. T., 1941.

верка этого явления¹ показала, что коэффициент массопередачи к капле в 10—13 раз больше, чем от газа к плоской поверхности.

Воздух — вода. Целью обширных исследований поверхностного испарения воды в воздух на различной

массопередачи¹. Это явление отражает, по-видимому, тот факт, что теплообмен не в такой степени зависит от образования застойных зон жидкости, как массообмен, объясняемый с позиций теории проникания.

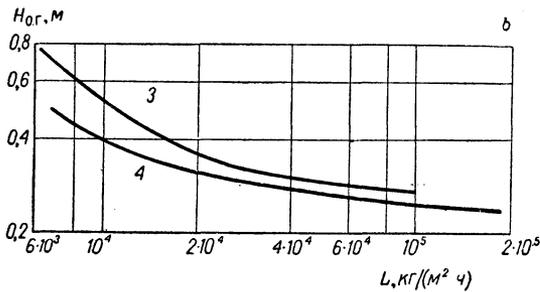
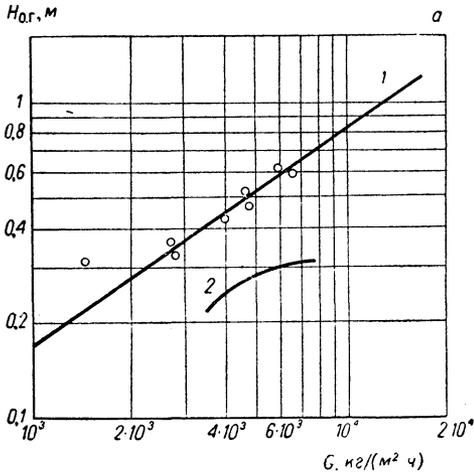


Рис. I-78. Высота единицы переноса при абсорбции NH_3 из воздуха водой. Насадка из стекловолокна, расположение волокон вертикальное, насыпная плотность $75,3 \text{ кг/м}^3$:

a — при различной плотности орошения [1 — $L = 7750 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$, 2 — $L = 31\,000 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$]; b — при различной скорости воздуха [3 — $G = 7270 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$; 4 — $G = 4880 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$].

насадке было не только изучение диффузионного сопротивления в газовой фазе, но и накопление данных для расчета градирен и систем увлажнения.

Норман² сравнил характеристики колец Рашига, седел Берля, деревянной хордовой насадки и насадки «Парагрид». Для каждого типа насадки построены графики зависимости высоты единицы переноса от массовой скорости газа. В исследованных пределах изменения скорости газа увеличение плотности орошения приводило к повышению эффективности массообмена (рис. I-80).

Сравнительная эффективность колец Рашига, розеток Теллера и насадки «Даупак» в охлаждающих башнях показана на рис. I-81. В литературе отмечено, что коэффициент теплопередачи выше коэффициента

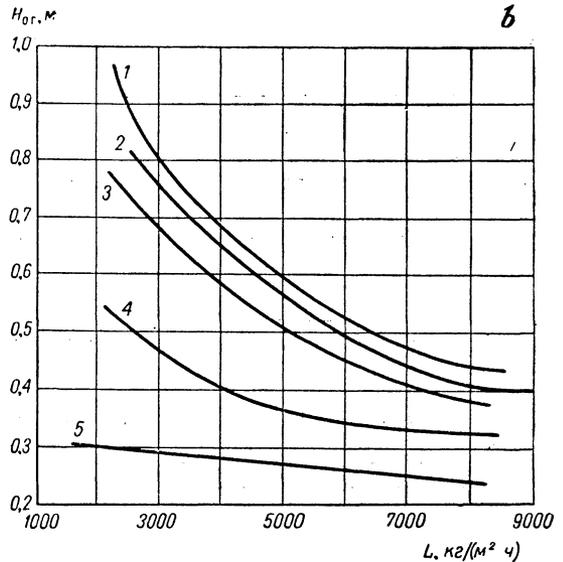
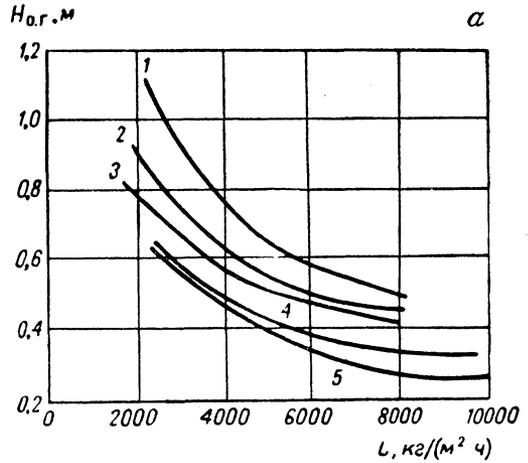


Рис. I-79. Сравнение эффективности различных насадок на системе NH_3 — воздух — вода:

a — $G = 2440 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$; b — $G = 3420 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$;
1 — кольца Рашига 38 мм; 2 — стеклянные кольца Рашига 19 мм; 3 — седла Берля 38 мм; 4 — розетки Теллера 25 мм; 5 — розетки Теллера 25 мм, колонна облицована несмачивающимся покрытием.

Для решетчатой керамической насадки² в пределах $9100 < L < 72\,000 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ и $480 < G < 4800 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ $K_{га}$ не зависит от плотности орошения и пропорционален $G^{0,839}$.

При изучении характеристик графитовых колец Рашига 25 мм в колонне диаметром 200 мм в пределах

¹ Халиф и др. РЖХ. 8843 (1955).

² Norman, Trans. Inst. Chem. Engrs, 29 (2), 226 (1951).

¹ Hensel, Treybal, Chem. Eng. Progr., 48, 352 (1952).
² Parsely, Molstad, Cress, Bauer, Chem. Eng. Progr., 46, 17 (1950).

$2400 < L < 12\,500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $1680 < G < 4800 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ установлено¹, что концевой эффект эквивалентен слою насадки высотой 185 мм. Влияние плотности орошения на коэффициенты тепло- и массоотдачи в газовой фазе оказалось необычно слабым.

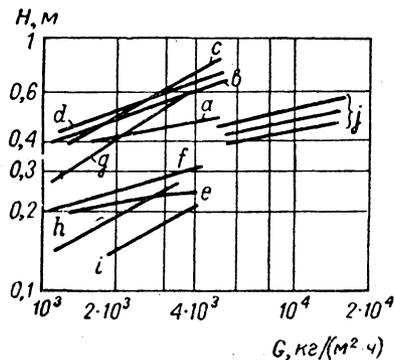


Рис. I-80. Сравнение эффективности насадок на системе воздух — вода:

Кривая	Насадка	Плотность орошения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Литература
a	Блочная 6295	14 650	Molstad, McKinney, Abbey, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 39, 605 (1943); Chem. Eng. Progr., 46, 17 (1950)
b	> 6146	14 650	
c	> 6897	14 650	
d	Деревянная хордовая	14 650	Carey, Williams, Proc. Inst. Mech. Engrs (London), 163, 41 (1950)
e	Кольца Рашига 25 мм	14 650	То же, что для a, b, c
f	Седла Берля 25 мм	14 650	
g	Кольца Рашига 25 мм	2 440	
h	> > 25 мм	7 325	
i	> > 25 мм	14 650	
j	Графитовая блочная	6 850	Mehta, Parekh, M. S. Thesis, M. I. T., 1939
		9 750	
		14 750	
			Norman, Trans. Inst. Chem. Engrs, 29, (2), 226 (1951)

Кроме того, необходимо отметить значительное сопротивление теплопередаче со стороны пленки жидкости (27—46% от общего сопротивления).

Крибб², исследовав относительное сопротивление в жидкой фазе, установил, что эта величина не превышает 20%. Далее указывается, что на насадке из колец Рашига $100 \times 100 \text{ мм}$ $\alpha_{жa} \propto L^{1,5}$, что хорошо согласуется с данными³, по которым $\alpha_{жa} \propto L^{1,36}$. Крибб установил, что плотность орошения в работе Мак-Адамса, Поленца и др.¹ была ниже минимальной эффективной скорости жидкости и поэтому данные этих авторов в отношении нагрузок по жидкости не воспроизводят действительных промышленных условий, при которых проявляется более высокая чувствительность к плотности орошения.

Смесь двуокиси серы с воздухом — вода. При абсорбции SO_2 водой значительны сопротивления как в жидкой, так и в газовой фазах. Исследовалась массопередача на насадке из колец Рашига 25 мм при

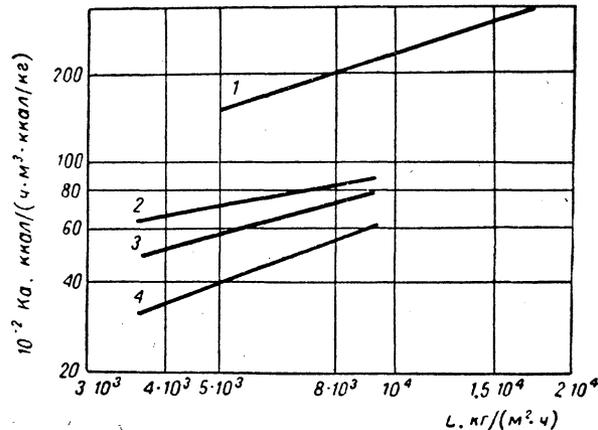


Рис. I-81. Зависимость коэффициента теплопередачи K_a от плотности орошения L [$G = 5860 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$]: 1 — розетки Теллера 25 мм; 2 — кольца Рашига 50 мм; 3 — насадка «Даупак FN-90»; 4 — насадка «Даупак HCS».

$4400 < L < 56\,000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $310 < G < 3850 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Уравнения, полученные в предположении, что скорость

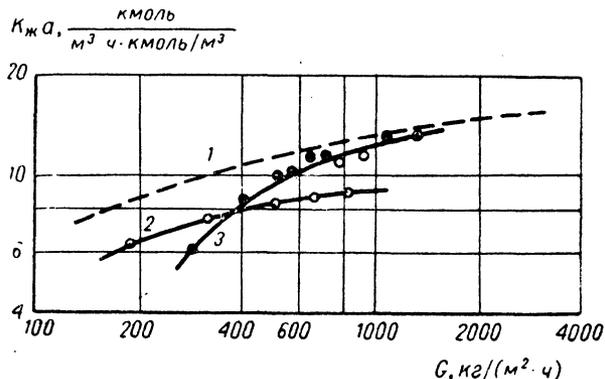


Рис. I-82. Сравнение коэффициента массопередачи $K_{жа}$ при абсорбции сернистого газа водой на различных насадках:

1 — кольца Рашига 25 мм; 2 — спиральная насадка 75 мм; 3 — кокс 25 мм.

газа не оказывает влияния на перенос массы в пленке жидкости, имеют следующий вид¹:

$$\frac{1}{K_{жа}} = \frac{A_1}{L^{0,82}} + \frac{A_2 H'}{G^{0,7} L^{0,5}} \quad (\text{I-73})$$

$$H_{о, ж} = \frac{L^{0,18}}{A_3} + \frac{H' L^{0,5}}{G^{0,7} A_4} \quad (\text{I-74})$$

Здесь $K_{жа}$ — общий коэффициент массопередачи; $H' = 0,107$ при 21°C ; L — плотность орошения; G —

¹ Whitney, Vivian, Chem. Eng. Progr., 45, 323 (1949).

¹ McAdams, Pohlentz, St. John, Chem. Eng. Progr., 45, 241 (1949).

² Cribb, Brit. Chem. Eng., 4 (5), 264 (1959).

³ Inazumi, Chem. Eng. Japan, 19, 579 (1955).

ТАБЛИЦА 1-8

Коэффициенты скорости абсорбции CO₂ в различных растворителях [для L = 1220 кг/(м²·ч)]

Растворитель	Насадка	G, кг/(м ² ·ч)	K _{жа} , кмоль/(ч·м ³) (Δу)	Литература
Вода	Кольца Рашига 25 мм	1465	0,8	1
1 н. Na ₂ CO ₃ , 20% в виде NaHCO ₃	То же	1465	0,48	2
2 н. диэтанол-амин, конверсия до 50% карбоната	Кольца Рашига 16 мм	1465	6,4	3
2 н. NaOH, конверсия до 20% карбоната	Кольца Рашига 25 мм	1465	37	4
2 н. NaOH	Седла Берля 25 мм	1285	30,4	5
2,5 н. моноэтаноламин, конверсия до 40% карбоната	Розетки Теллера 25 мм	4200	78,5	6
	Седла Берля 25 мм	4200	49,6	6
	Кольца Рашига 25 мм	4200	48,0	6
40% K ₂ CO ₃ , конверсия до 50% карбоната	Кольца Рашига 12 мм	1950	1,6—9,6 + (PCO ₂)	7

скорость газа; A₁, A₂, A₃, A₄ — постоянные коэффициенты. Первый член уравнения отражает влияние жидкой фазы, второй — газовой.

На рис. 1-82 сравниваются результаты Уитни и Вивiana с опытными данными¹, полученными на насадке из кускового кокса и на спиральной насадке.

Результаты Пирсона и др.² для насадки из колец Рашига 25 мм высотой 7,3 м в колонне диаметром 300 мм хорошо согласуются с приведенными выше опытными данными. Это указывает на возможность использования лабораторных данных для определения параметров промышленных установок при условии хорошего распределения жидкости и с учетом концевго эффекта.

Абсорбция двуокиси углерода

В промышленных условиях выделение двуокиси углерода из газов осуществляется водой при высоких давлениях (нормальная физическая абсорбция), а также щелочными растворами при рабочих давлениях в пределах 1—10 ат.

Смесь CO₂ с воздухом — вода. Характеристики насадочных колонн на этой системе приводятся на рис. 1-68—1-71, а также в работе Коха и др.³ Установлено, что H_ж не зависит от скорости газа, если U_ж/U_г < 1. При U_ж/U_г > 1 обратное перемешивание газа приводит к снижению эффективности массопередачи. Шервуд и Холлоуэй указывают, что H_ж ∝ L^{0,22-0,46} в зависимости от типа и размера насадки (см. рис. 1-68 и табл. 1-8).

Кох и др. (см. выше) изучили массопередачу на насадке из колец Рашига (10, 12, и 25 мм) высотой 1,2 м в колоннах диаметром 150 и 250 мм. В противовес данным Шервуда и Холлоуэй, авторы получили, что H_ж не зависит от размера насадки и поэтому:

$$K_{жа} = 0,039L^{0,96} \quad (1-75)$$

$$H_{ж} : : L^{0,04} \quad (1-76)$$

где K_{жа} — коэффициент массопередачи в жидкой фазе, кмоль/(сек·м³·кмоль/м³); L — плотность орошения, кмоль/(сек·м²); H_ж — высота единицы переноса, м.

На рис. 1-83 данные Коха сравниваются с результатами других исследователей.

Щелочные растворы. Поглощение двуокиси углерода щелочными растворами (карбонатами натрия и калия, едкой щелочью, этаноламинами) является примером абсорбции, сопровождающейся химической реакцией. Сложность явления, вытекающая из различия в механизме и скорости реакции, поверхностного натяжения растворов и действительной межфазовой поверхности, ограничивает анализ процесса по существу только эмпирическими методами. В последнее время разработан метод извлечения CO₂ из предварительно сжатых газов (10—20 ат) горячими растворами карбонатов⁴. Применение этого метода ограничено концентрацией CO₂ в газе не ниже, чем 0,5%, однако применять его совместно с другими процессами щелочной абсорбции экономически выгодно.

Скорость абсорбции двуокиси углерода зависит от применяемого растворителя, так как природа раство-

1. Sherwood, Holloway, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 36, 39 (1940).—2. Furnas, Bellinger, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 34, 251 (1938).—3. Cryder, Maloney, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 37, 287 (1941).—4. Теpe, Dodge, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 39, 255 (1943).—5. Spector, Dodge, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 42, 827 (1946).—6. Teller, Ford, Ind. Eng. Chem., 50, 1201 (1958).—7. Benson, Field, Jameson, Chem. Eng. Progr., 50, 356 (1954).

рителя определяет скорость реакции, коэффициенты диффузии реагентов и вязкость раствора. Коэффициенты скорости абсорбции для различных систем и насадок приводятся в табл. 1-8.

Сравнительные характеристики систем, приведенные в табл. 1-8, условны, так как скорость массопередачи зависит от парциального давления CO₂ в газовой фазе и концентрации несвязанного реагента.

Растворы едкой щелочи. По данным Типа и Должа¹, исследовавшим эту систему на насадке из колец Рашига размером 12 и 25 мм, величина K_{жа} не зависит от скорости газа и пропорциональна L^{0,28}. Обнаружено существенное влияние концентрации NaOH на коэффициент массопередачи: при повышении концентрации до 2 н. K_{жа} увеличивается, а затем уменьшается.

¹ Haslam, Ryan, Weber, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 15, 177 (1923).

² Pearson et al., Chem. Eng. Progr., 47, 257 (1951).

³ Koch et al., Chem. Eng. Progr., 45, 677 (1949).

⁴ Benson, Field, Haynes, Chem. Eng. Progr., 52, 33 (1956).

¹ Теpe, Dodge, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 39, 255 (1943).

Шервуд и Пигфорд¹ показали, что ступенью, определяющей общую скорость процесса, является медленная обратимая реакция псевдопервого порядка между растворенным CO_2 и ионами OH^- и что $K_{га} \propto (q/\mu_{ж})^{1/2}$ (где q — концентрация несвязанного реагента). На рис. I-84 приведены опытные и расчетные данные по коэффициентам массопередачи. Расхождение объясняет-

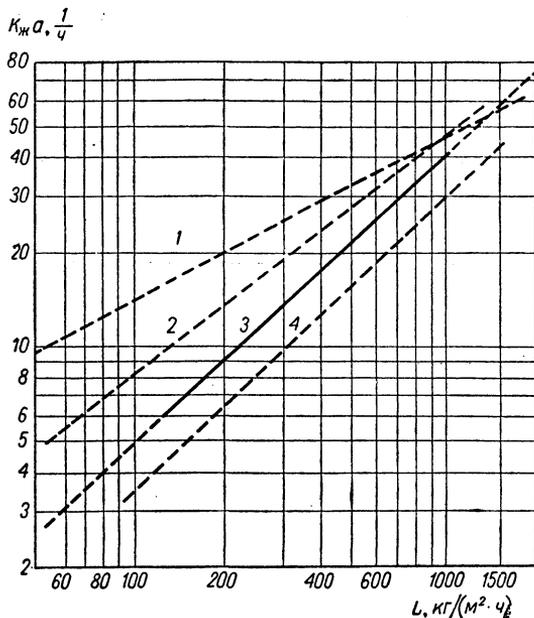


Рис. I-83. Зависимость коэффициента массопередачи $K_{жа}$ от плотности орошения L при абсорбции CO_2 насадке из колец Рашига, по данным разных исследователей:

Кривая	Размер насадки, мм	Автор
1	9,5	Sherwood, Hollo way, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 36, 39 (1940).
2	25	
3	10, 12, 20, 25	Koch et al. Chem. Eng. Progr., 45, 681 (1949).
4	25	Draemel et al., Chem. Eng. Progr., 45, 681 (1949)

ся уменьшением поверхности контакта при увеличении вязкости для более высоких концентраций NaOH .

Растворы карбоната натрия. Комшток и Додж² не обнаружили влияния скорости газа на коэффициент массопередачи при абсорбции CO_2 раствором NaHCO_3 в колонне с насадкой из колец Рашига 10 мм. Однако они отмечают, что снижение коэффициента массопередачи при увеличении степени конверсии происходит в соответствии с уравнением для абсорбции, сопровождающейся химической реакцией второго порядка (рис. I-85).

По данным исследования¹, проведенного в колонне диаметром 300 мм на насадке из колец Рашига 9,5

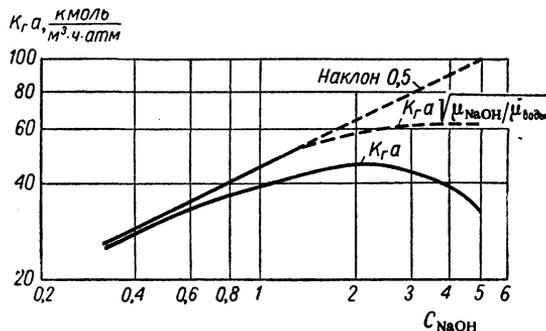


Рис. I-84. Зависимость коэффициента абсорбции двуокиси углерода $K_{га}$ от нормальности раствора едкого натра C [$L = 7320 + 8000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $G = 488 + 976 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; насадка — кольца 12,5 мм)].

и 25 мм и из седел Берля 25 мм, коэффициент массопередачи не зависит от скорости газа. Сравнение этих

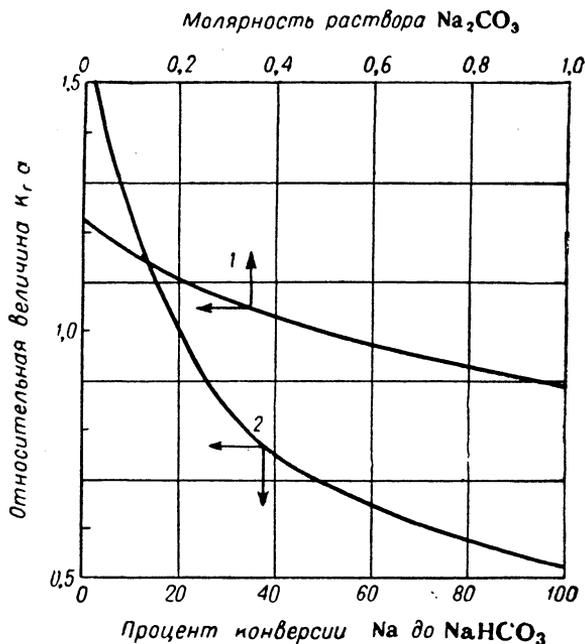


Рис. I-85. Зависимость $K_{га}$ от мольной концентрации и процента конверсии Na_2CO_3 до NaHCO_3 для системы водный раствор Na_2CO_3 — смесь воздуха с CO_2 :

1 — данные Комштока и Доджа; 2 — данные Харта и Бейкера.

данных с результатами работы Комштока и Доджа (см. выше) приведено на рис. I-86. Нагревание, снижая вязкость жидкости и увеличивая коэффициенты

¹ Sherwood, Pigford, Absorption and Extraction, New York, 1952.

² Comstock, Dodge, Ind. Eng. Chem., 29, 520 (1937).

¹ Furnas, Bellinger, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 34, 251 (1938).

диффузии реагентов, оказывает значительное влияние на коэффициент массопередачи (рис. 1-87).

Растворы этаноламинов. Абсорбция двуокиси углерода растворами этаноламинов сопровождается обратной реакцией второго порядка. Для обеспечения оптимальных условий по равновесию и вязкости жидкости концентрация раствора поддерживается обычно в

На основе данных Лейбуш и Шнеерсона (см. выше) составлено эмпирическое уравнение для абсорбции CO_2 моноэтаноламином¹:

$$K_{га} = \frac{B}{\mu^{0,68}} [1 - B' (0,5 - C) M e^{0,214 + 0,012t - 3,4p}] \quad (I-77)$$

где B и B' — константы взаимодействующей системы; C — концентрация CO_2 в растворе, моль/моль амина

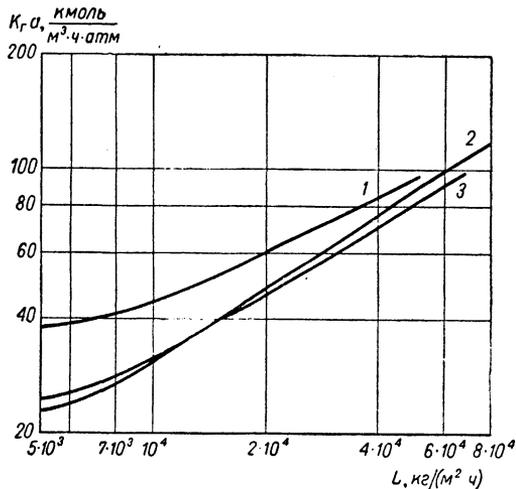


Рис. 1-86. Зависимость коэффициента массопередачи $K_{га}$ от плотности орошения L для системы смесь воздуха с CO_2 — водный раствор Na_2CO_3 :

1 — кольца 9,5 мм; 2 — кольца 25 мм; 3 — седла 25 мм.

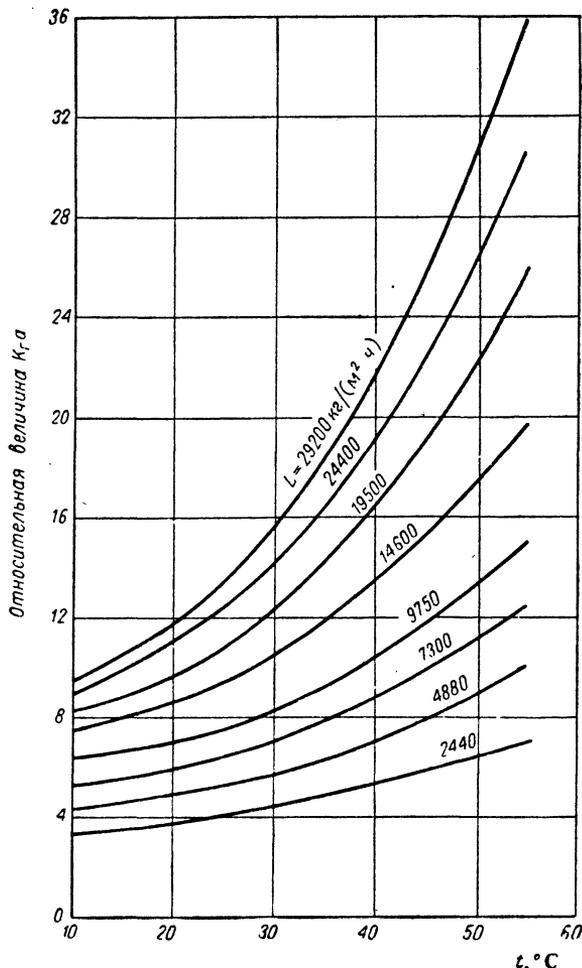


Рис. 1-87. Влияние температуры на коэффициент абсорбции для системы смесь воздуха с CO_2 — водный раствор Na_2CO_3 .

пределах от 2 н. до 5 н., а температура процесса 38—54°С. Шнеерсон и Лейбуш¹ сравнили скорости массопередачи при поглощении CO_2 различными этаноламинами, но эта работа проведена на колонне диаметром 25 мм с кольцами Рашига 5—6 мм, поэтому приведенные ниже данные не могут быть перенесены на промышленные аппараты. Исследования проводились при $L = 3400 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $t = 50^\circ \text{C}$; концентрация CO_2 0,03—0,05 моль на 1 моль амина при 5%-ном превращении в карбонат.

Получены следующие результаты:

$$K_{га}, \frac{\text{кмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{атм}}$$

Моноэтаноламин 2M . . .	33,6
Диэтаноламин 2M . . .	13,8
Триэтаноламин 3,5M . . .	1,44

(меньше 0,5); M — молярность моноэтаноламина; t — температура, °С; p — парциальное давление CO_2 , атм; μ — вязкость раствора, спз.

Величина $(0,5 - C)$ эквивалентна концентрации несвязанного реагента q . Постоянная 0,5 представляет собой максимальное содержание CO_2 в растворе при атмосферном давлении. Максимальное значение этой константы при повышенном давлении составляет 0,65.

При исследовании на системе с диэтаноламином в колонне диаметром 150 мм с кольцами Рашига 19 мм не обнаружено существенного влияния скорости газа на коэффициент массопередачи². Отмечается снижение скорости массопередачи при увеличении парциального давления CO_2 и повышении степени конверсии этаноламина в соответствии с ожидаемым поведением реакции второго порядка (рис. 1-88).

¹ Шнеерсон, Лейбуш, ЖПХ, 19 (9), 869 (1946).
² Snyder, Maloney, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 37, 827 (1941).

¹ Kohl, Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 264 (1956).

Коэффициент $e^{-3,4p}$, учитывающий парциальное давление CO_2 , справедлив для $p_{\text{CO}_2} > 0,6 \text{ атм}$. В этих пределах парциальное давление CO_2 оказывает меньшее влияние на коэффициент массопередачи, чем показывает теоретический расчет для реакции второго порядка, по которому $K_{ra} :: 1/c_{ai}$, ввиду того, что реакция переходит в псевдопервый порядок. Экспери-

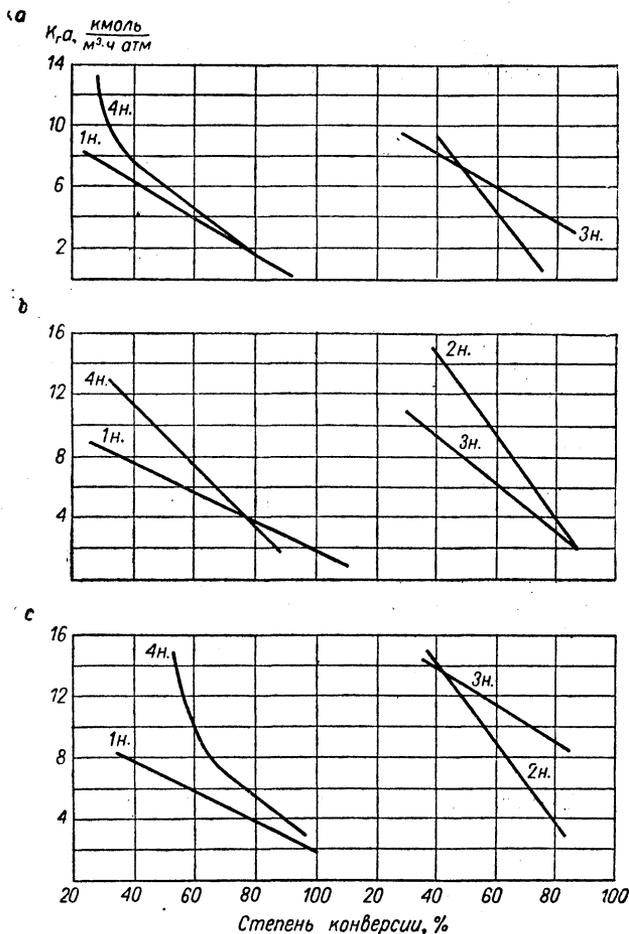


Рис. 1-88. Зависимость коэффициента массопередачи K_{ra} от степени конверсии амина при абсорбции CO_2 раствором диэтанолamina:

$a-L=4780 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $b-L=6950 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $c-L=12000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.
На кривых указана концентрация амина.

ментальные данные, полученные в условиях повышенных давлений¹, показали, что при $p_{\text{CO}_2} > 1 \text{ атм}$ между K_{ra} и c_{ai} выдерживается обратная линейная зависимость.

Теллер и Форд² сравнили характеристики различных насадок при абсорбции CO_2 моноэтанолaminом в колонне диаметром 200 мм, облицованной полиэтиленом (рис. 1-89 и 1-90). Установлено, что $H_{ог} :: L^{0,57}$. Этот результат совпадает с данными, полученными для рас-

твора соды¹. При парциальном давлении $\text{CO}_2 < 0,11 \text{ атм}$ наблюдалось значительное влияние скорости газа, что подтверждается и другими данными². Эта зависимость от газовой фазы может дать частичное объяснение пониженной чувствительности к концентрации растворяющегося газа на межфазовой поверхности c_{ai} (наблюдалась в опытах Шнейерсона и Лейбуш) по сравнению с системами, у которых все сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе.

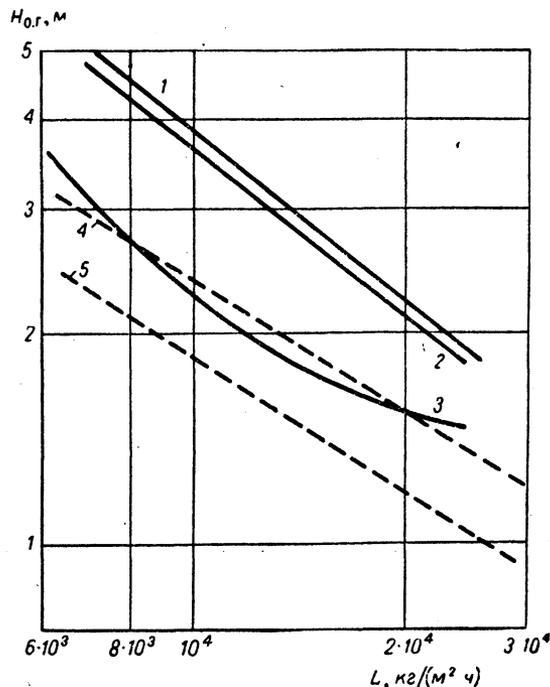


Рис. 1-89. Характеристики различных насадок на системе смесь CO_2 с воздухом — моноэтанолamin. Скорость газа на входе в колонну: — $G_{вх} = 4200 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ — — $G_{вх} = 2780 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.
1 — кольца Рашига 25 мм; 2 — седла Берля 25 мм; 3 и 5 — розетки Теллера 25 мм; 4 — кольца Рашига и розетки Теллера 25 мм.

С помощью метода Хатта получено полуэмпирическое уравнение³ для абсорбции CO_2 . Хотя корреляция была установлена с использованием безразмерных величин по уравнению

$$\frac{k_{ж} \left(\frac{\mu_{ж}^2}{g \rho_{ж}^2} \right)^{1/3}}{D_{ж}} = 0,015 \left(\frac{L}{a \mu_{ж}} \right) S_c^{1/3} \quad (\text{I-78})$$

в случае абсорбции для получения действительного значения коэффициента массопередачи величину $k_{ж}$ необходимо умножить на отношение $x/\text{th}x$. Здесь

$$x = \left(\frac{\mu_{ж}^2}{g \rho_{ж}^2} \right)^{1/3} \left(\frac{k}{D_{ж}} \right)^{1/2} \quad (\text{I-79})$$

¹ Furnas, Bellinger, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 34, 251 (1938).

² Spector, Dodge, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs. 42, 827 (1946).

³ Van Krevelen, Hoffijzer, Chem. Eng. Progr., 44, 529 (1948).

¹ Gregory, Scharman, Ind. Eng. Chem., 29, 514 (1937).

² Teller, Ford, Ind. Eng. Chem., 50, 1201 (1958).

$k_{ж}$ — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, $кмоль/(сек \cdot м^2 \cdot кмоль/м^3)$; k — константа скорости реакции первого порядка, $сек^{-1}$; g — ускорение силы тяжести, $м/сек^2$; $D_{ж}$ — коэффициент диффузии газа в жидкости, $м^2/сек$; L — плотность орошения, $кг/(м^2 \cdot сек)$; Sc — критерий Шмидта; a — поверхность межфазового контакта, $м^2/м^3$; $\mu_{ж}$ — вязкость жидкости, $кг/(м \cdot сек)$; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, $кг/м^3$.

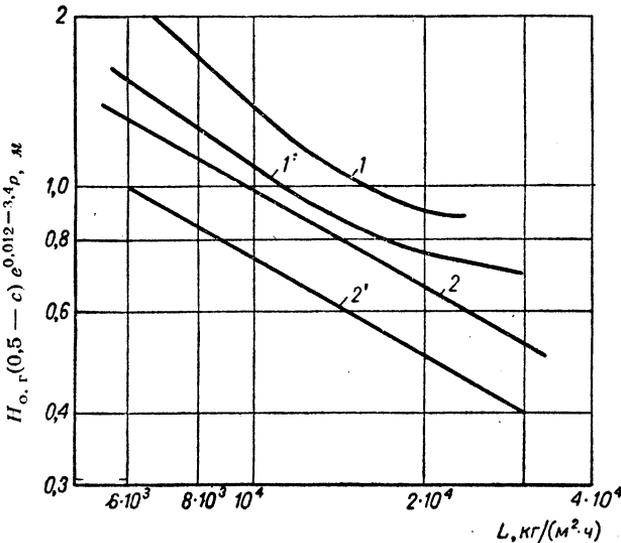


Рис. I-90. Зависимость высоты единицы переноса $H_{0,г}$ от плотности орошения L на системе смесь CO_2 с воздухом — моноэтаноламин с учетом влияния концентрации реагентов, парциального давления CO_2 и температуры.

Скорость газа на входе: 1 и 2 — $G = 4200$ $кг/(м^2 \cdot ч)$; 1' и 2' — $G = 2780$ $кг/(м^2 \cdot ч)$.

1 и 1' — кольца Рашига и седла Берля 25 мм; 2 и 2' — розетки Теллера 25 мм. Для розеток Теллера:

$$H_{0,г} = \frac{197 L - 0,57}{(0,5 - c) e^{0,012 t - 3,4 p}} \quad (\text{кривая } 2)$$

$$H_{0,г} = \frac{146 L - 0,57}{(0,5 - c) e^{0,012 t - 3,4 p}} \quad (\text{кривая } 2')$$

Применение уравнений типа Хатта в случае реакции первого порядка в жидкой фазе приводит к ошибке в определении коэффициента массоотдачи в пределах 50—100%.

Абсорбция четырехфтористого кремния водой

Поглощение четырехфтористого кремния водой является примером абсорбции, сопровождаемой химической реакцией с образованием твердого соединения. Общая стехиометрия этой реакции может быть представлена следующим уравнением:



Установлено¹, что в случае распределения жидкости в виде дискретных частиц (как, например, в распылительных колоннах) поверхность частиц жидкости, пред-

ставляющая собой поверхность массообмена, инкрустируется гелем кремния, тормозя дальнейшую абсорбцию. Эксперименты на пленочных колоннах показали, что скорость абсорбции определяется диффузией в газовой фазе:

$$K_r = 6,65 \cdot 10^{-5} Re^{0,8} \quad (I-81)$$

где K_r — коэффициент массопередачи в газовой фазе, $кмоль/(сек \cdot м^2 \cdot атм)$; Re — критерий Рейнольдса в трубчатой колонне.

Характерные данные по поглощению четырехфтористого кремния представлены в табл. I-9.

ТАБЛИЦА I-9

Характеристики абсорбционного оборудования на системе SiF_4 —воздух—вода

Колонна	L , моль/м ² ·ч	G , моль/ч	$\frac{K_r a}{ч \cdot м^2 \cdot атм}$	$\frac{K_r a}{L}$
Распылительная пульсирующая	33,4	417	7,85	0,235
	96,5	292	10,2	0,106
	45,5	250	15,05	0,331
Распылительная непрерывно действующая	87,7	201	16,65	0,19
Насадочная	673	501	59,0	0,088
Инжекционная	43400	501	250	0,00578

Форд и Арндт в частном сообщении указывают, что для данного процесса абсорбции эффективна насадка, загруженная навалом (благодаря стабильности работы в области захлебывания). В тех местах, где произошло отложение осадка, происходит локальная инверсия фаз, приводящая к вымыванию геля кремния.

Дистилляция

Диаметр насадочных колонн, применяемых в процессах дистилляции, как правило, не превышает 0,6 м, а высота — 6 м. Ограничения связаны с трудностью поддержания равномерного распределения жидкости для больших колонн.

В литературе мало обобщений, позволяющих определять характеристики насадочных колонн в условиях дистилляции. Исследование¹ на системе этанол—вода с насадкой из колец Рашига и седел Берля показало, что поведение системы не зависит от типа насадки. Опытные данные представлены на рис. I-91. Подразаумевается, что сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе, так как скорость переноса вещества не зависит от скорости газа.

Мерч², анализируя ранее накопленные данные по дистилляции в насадочных колоннах, получил уравнение:

$$ВЭТТ = k_1 G^{k_2} D_K^{k_3} \frac{\alpha_{иж}}{\rho_{жg}} \quad (I-82)$$

где ВЭТТ — высота насадки, эквивалентная теоретической тарелке; G — скорость пара в свободном сечении

¹ Furnas, Taylor, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 36, 135 (1940).

² Murch, Ind. Eng. Chem., 45, 2616 (1953).

⁴ Whynes, Trans. Inst. Chem. Engrs, 34, 117 (1956).

колонны; D_k — диаметр колонны; h — высота насадки; α — относительная летучесть; $\mu_{ж}$ — вязкость жидкости; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости; k_1, k_2, k_3 — константы, зависящие от типа насадки.

Достоинство этого уравнения состоит в том, что оно учитывает влияние растекания жидкости к стенкам колонны на массообмен, показывая повышение ВЭТТ при увеличении диаметра колонны и высоты насадки.

Может возникнуть сомнение в справедливости уравнения, так как оно не принимает во внимание плотность орошения и коэффициенты диффузии, хотя доказано, что в процессе дистилляции основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе. Однако использованные в обработке данные были взяты при больших флегмовых числах или при бесконечной флегме, так что $G=L$, и, кроме того, подавляющее число данных в корреляции Мерча получено на

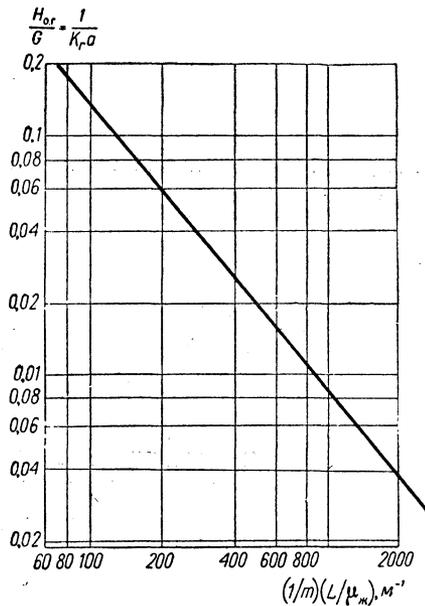


Рис. I-91. Характеристики насадочной колонны (насадка кольца Рашига и седла Берля) при дистилляции смеси этанол — вода.

системах 1,2-дихлорэтан—бензол и гептан—метилциклогексан, коэффициенты диффузии которых различались не более чем на 10%. Поэтому при использовании этого уравнения необходимо вводить соответствующую поправку на коэффициенты диффузии.

Гранвилль¹ отметил пределы применимости уравнений Фурнаса, Тейлора и Мерча, так как в режиме подвисяния ВЭТТ обычно уменьшается и затем остается постоянной или увеличивается в области, предшествующей захлебыванию, как показано на рис. I-92.

Поэтому уравнения (I-81) и (I-82), не дающие прогиба кривой на графике, имеют ограниченное применение. Гранвилль по экспериментальным данным работ, приведенных в табл. I-10, получил эмпирическую зависимость для ВЭТТ в режиме подвисяния для слоя

насадки высотой 2,4 м (в предположении, что ВЭТТ пропорциональна $h^{1/3}$). Уравнение имеет вид:

$$\text{ВЭТТ} = 336d_n M_{ср} \frac{G}{L} \text{ м} \quad (\text{I-83})$$

где d_n — номинальный размер насадки, м; $M_{ср}$ — средний угол наклона кривой равновесия, равный $\frac{\sum nM}{\sum n}$; M — угол наклона кривой равновесия; n — число тарелок; G, L — скорость газа и жидкости, моль/(сек · м²).

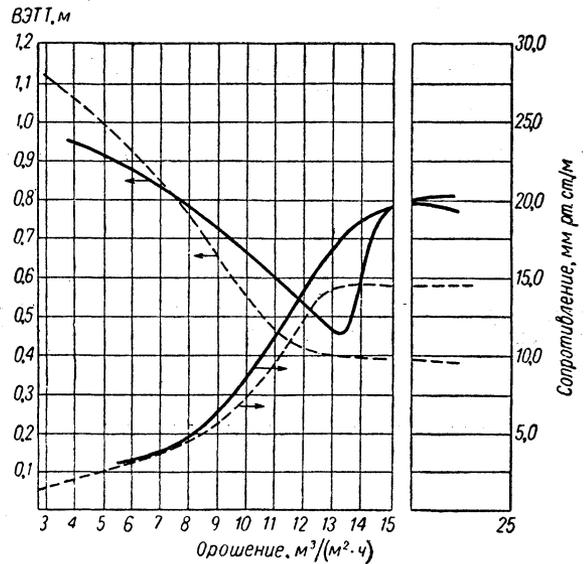


Рис. I-92. Сопоставление ВЭТТ насадки разных типов на смеси бензол — дихлорэтан при бесконечном флегмовом числе [Teller Chem. Eng., 61 (9), 185 (1954)]:
— кольца Рашига 38 мм; --- седла Берля 38 мм.

Это уравнение дает достаточно надежные результаты для колец Рашига, однако для других типов насадки его следует применять осторожно.

Обобщенное уравнение для насадочных колонн¹ имеет вид:

$$\text{ВЭТТ} = \frac{d}{M_n} \left[AG^{0.2} + \frac{BG}{HPD_{ж} (L/\mu_{ж})^{0.75} (\mu_{ж}/\rho_{ж} D_{ж})^{0.5}} \right] \quad (\text{I-84})$$

где d — диаметр колонны; M_n — средний молекулярный вес пара; G и L — скорость пара в жидкости; H — константа Генри; P — общее давление; $D_{ж}$ — коэффициент диффузии в жидкой фазе; $\mu_{ж}$ — вязкость; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости; A и B — константы.

При исследовании² влияния рабочего давления на эффективность разделения насадки из спиралей, спиральных решеток, седел Берля и шаров на системе гептан — метилциклогексан оптимальное рабочее давление оказалось равным 200 мм рт. ст. для всех типов

¹ Robinson, Gilliland, Elements of Fractional Distillation, New York, 1950.

² Myles, Feldman, Wender, Orchin, Ind. Eng. Chem., 43, 1452 (1951).

¹ Granville, Brit. Chem. Eng., 2, 70 (1957).

ТАБЛИЦА 1-10

Библиография по дистилляции некоторых систем на насадке различных типов

Насадка	Система	Литература
Насадка Мак-Магона 12 мм	Бензол-1,2-дихлорэтан	Fisher, Bowen, Chem. Eng. Progr., 45, 359 (1949).
Кольца Рашига 12 мм	Изопропиловый спирт - вода CH ₃ OH-H ₂ O, CCl ₄ -C ₆ H ₆	Deed, Schutz, Drew, Ind. Eng. Chem., 39, 770 (1947). Duncan, Koffolt, Withrow, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 38, 259 (1942).
Кольца Рашига 10-25 мм, седла Берля 12 мм	C ₂ H ₅ OH-H ₂ O	Furnas, Taylor, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 36, 135 (1940).
Кольца Рашига 8-35 мм	C ₂ H ₅ OH-H ₂ O	Kirschbaum, Distillation and Rectification, New York, 1948.
Кольца Рашига 6 мм	Метилциклогексан - толуол	Johnson, Ph. D. Thesis, Univ. of Birmingham, 1954.
Кольца Рашига 6 мм, спирали Фенске 10 мм	Метилциклогексан - толуол	Granville, Ph. D. Thesis, Univ. of Birmingham, 1954.

насадки (рис. I-93). Плотность орошения выбиралась как средняя величина между предельной нагрузкой по жидкости в условиях захлебывания и минимальной плотностью орошения.

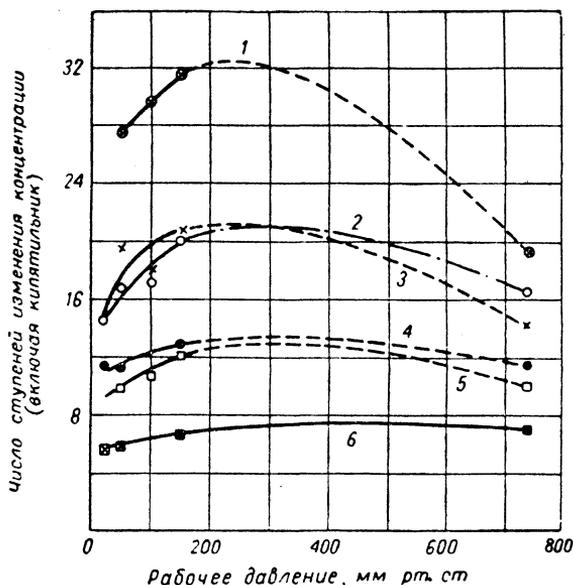


Рис. I-93. Влияние рабочего давления на эффективность насадки (высота слоя насадки 1 м):

1 - геликоидальная насадка; 2 - шары, плотная упаковка; 3 - шары, неплотная упаковка; 4 - однозаходная спираль; 5 - седла Берля; 6 - трехзаходная спираль.

Однако другие исследователи¹ не обнаружили влияния рабочего давления в пределах 20-760 мм рт. ст. на эффективность разделения спиральной насадки Фенске 3,2 мм на системе октан - толуол.

Исследование¹ эффективности разделения колец Рашига, спиралей, насадки Кеннона и Мак-Магона в колонне диаметром 19 мм при давлениях в пределах от 10 мм рт. ст. до атмосферного показало, что оптимальная область рабочих давлений оказалась в пределах от 50 до 100 мм рт. ст. (рис. I-94).

Мортон и Брегг² сообщают об эффективности разделения насадки из проволоочной сетки Стедмена и Гудлоя. Мортон отмечает, что высота колонны оказывает слабое воздействие или совсем не влияет на

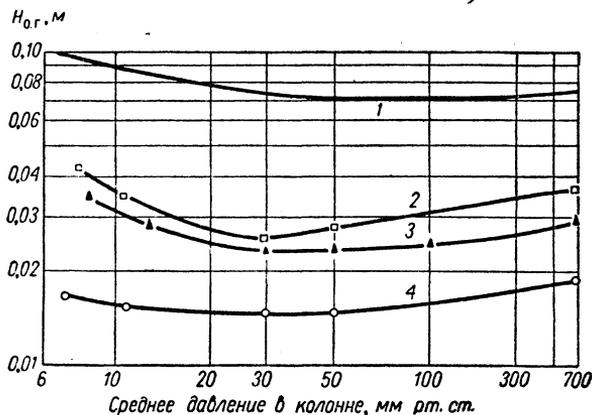


Рис. I-94. Зависимость ВЭП от усредненного давления в колонне при постоянной линейной скорости газа:

1 - кольца Рашига; 2 - спирали; 3 - насадка Кеннона; 4 - насадка Мак-Магона.

ВЭТТ насадки Стедмена; а при увеличении диаметра колонны с 0,3 до 3,6 м наблюдалось снижение эффективности только на 20-25%. Оба типа насадки показывают низкие ВЭТТ, обычно не более 75 мм

¹ Stock, Kinney, Ind. Eng. Chem., 42, 77 (1950).

² Morton, Trans. Inst. Chem. Engrs, 23, 240 (1951). - Bragg, Ind. Eng. Chem., 49, 1062 (1957).

¹ Berg, Popovic, Chem. Eng. Progr., 45, 683 (1949).

(рис. I-95). Брегг¹ обобщил данные по разделению на гексагональной насадке Стедмена систем бензол — 1,2-дихлорэтан, 2,2,4-метилпентан — метилциклогексан и

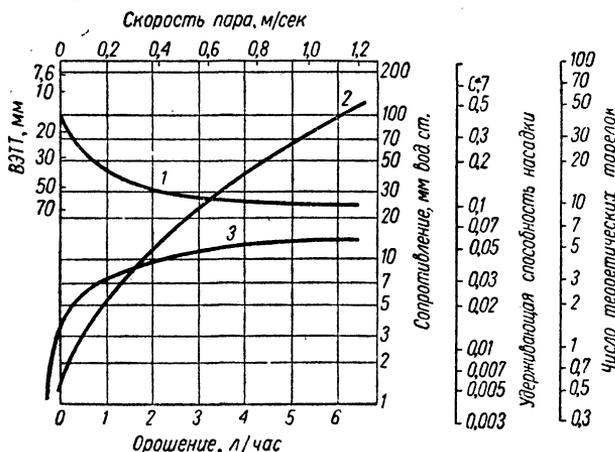


Рис. I-95. Характеристики насадки Гудля 25 мм (высота слоя насадки 600 мм):

1 — число теоретических тарелок или ВЭТТ; 2 — сопротивление; 3 — удерживающая способность насадки.

смесь изомеров гептана. Получено следующее уравнение:

$$n_T = 9,2 + \frac{30,6}{R^{0,27}} + \frac{5,45}{R^{0,9}} \quad (I-85)$$

где n_T — число теоретических тарелок на 1 м насадки; R — количество флегмы, л/ч.

Выбор оптимальных размеров насадочных колонн

Оптimum при конструировании насадочных колонн зависит от правильного выбора концентрации газа и жидкости на выходе из аппарата, а также от диаметра колонны. Выводы, полученные на основе приведенных ниже обобщений для расчета оптимальных характеристик, следует использовать главным образом для установления порядка величины параметров процесса.

Кольборн² получил уравнение для расчета оптимальной скорости в насадочной колонне в зависимости от средних цен переработки, независимо от влияния скорости материальных потоков на коэффициент массопередачи.

Уравнение для определения экономически оптимальной скорости пара в насадочной колонне имеет следующий вид³:

$$U_{\text{опт}} = 0,79 \left(\frac{C_K}{nC_{\text{эл}} \right)^{1/3} \frac{м}{сек} \quad (I-86)$$

где C_K — основные капиталовложения в колонну, отнесенные к 1 м³ ее объема; $C_{\text{эл}}$ — стоимость электроэнергии (1 кВт·ч); n — гидравлические потери, выра-

женные в числе скоростных напоров на 1 м высоты насадки.

Уравнение (I-86) следует использовать только для ориентировочных расчетов и с учетом предположений, которые были приняты автором при его выводе: 1) плотность орошения превышает М. Э. С. Ж., установленную Праттом (стр. 46); 2) сопротивление массопередаче сосредоточено в газовой фазе; величина H_T постоянна при плотности орошения выше М. Э. С. Ж.; 3) рабочее время колонны составляет 8400 ч/год; 4) к. п. д. вентилятора и электродвигателя равен 50%.

Высота колонны (концентрация уходящего газа). При данной величине mG/L необходима высота колонны зависит от выбранного значения концентрации газа на выходе из колонны, которая может быть определена из экономического баланса между стоимостью потерь абсорбируемого газа и стоимостью добавочной высоты колонны. Годовая стоимость потерь абсорбируемого газа, отнесенная к единице площади поперечного сечения колонны, может быть представлена произведением $C_4 \theta G y_2$, а годовая амортизация колонны и гидравлическое сопротивление как $C_3 H_{o.r} N_{o.r}$. Выражая $N_{o.r}$ через mG/L , y_1 и y_2 и решая уравнение относительно y_2 , при котором сумма стоимостей будет минимальной, получим в результате приближенное выражение для насадочных колонн:

$$y_2 - m x_2 = \frac{C_3 H_{o.r}}{C_4 \theta G (1 - mG/L)} \quad (I-87)$$

где C_2 — годовая стоимость оборудования и энергии, необходимой для преодоления сопротивления, отнесенная к 1 м³ объема колонны; C_4 — стоимость абсорбируемого газа при его концентрации в выходящей из колонны жидкости, отнесенная к 1 кмоль абсорбируемого газа; θ — рабочее время, ч/год.

Подобное выражение можно получить для тарельчатых колонн:

$$y_2 - m x_2 = \frac{C_5}{C_4 \theta G E [2,3 \lg (L/mG)]} \quad (I-88)$$

Здесь C_5 — годовая стоимость колонны и потерь энергии, отнесенная к единице площади тарелки; E — эффективность разделения тарелки.

Тиллер¹ дал подобное уравнение для оптимального числа тарелок в абсорбере.

Оптимальная концентрация жидкости на выходе из десорбционной колонны зависит от баланса между стоимостью потерь растворенного газа в выходящей из колонны жидкости и стоимостью добавочной высоты колонны, необходимой для повышения степени десорбции. Уравнения аналогичны выведенным при оценке величины концентрации в выходящем газе абсорбционных колонн.

Для насадочных колонн:

$$\left(x_2 - \frac{y_2}{m} \right)_{\text{опт}} = \frac{C_3 H_{o.r} \text{ ж}}{C_4 L \theta (1 - L/mG)} \quad (I-89)$$

Для тарельчатых колонн:

$$\left(x_2 - \frac{y_2}{m} \right)_{\text{опт}} = \frac{C_5}{C_4 L \theta E \ln (mG/L)} \quad (I-90)$$

¹ Bragg, Ind. Eng. Chem., 45, 1676 (1953).
² Colburn, Unit Operation Notes, Univ. of Delaware, 1936.
³ Williamson, Trans. Inst. Chem. Engrs, 29, 215 (1951).

¹ Tiller, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 40, 331 (1944).

Стоимость насадочных колонн

Обобщения по стоимости насадочных колонн осложняются тем, что изменение типа насадки существенно влияет на общие капиталовложения.

Большое расхождение в ценах единицы объема различных типов насадок и различие в эффективности их работы позволяет разрабатывать обобщения для определения стоимости колонн лишь применительно к конкретным типам насадок.

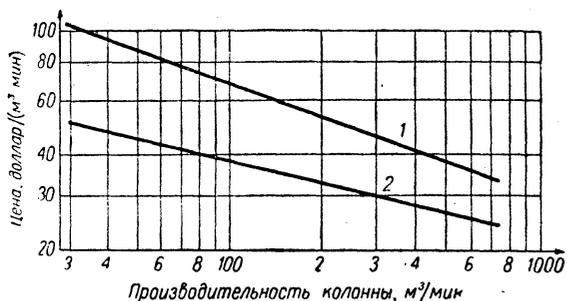


Рис. I-96. Отпускная цена пластмассовых насадочных скрубберных колонн для хвостовых газов. Вспомогательное оборудование включает в себя вентилятор, мотор, редуктор, циркуляционный насос, трубопровод между колонной и вентилятором:

1 — колонна с вспомогательным оборудованием; 2 — только насадочная колонна.

Арднт¹ изучал стоимость колонн с пластмассовым корпусом, с комбинированной полиэтиленовой насадкой из розеток Теллера и насадочных тел «Даупак». Цены получены, исходя из обеспечения пяти единиц переноса или коэффициента извлечения 95% (рис. I-96).

Чилтон² определял стоимость насадочных колонн в зависимости от их диаметра.

АППАРАТЫ С РАСПЫЛЕНИЕМ ЖИДКОСТИ

Массообменные аппараты, в которых газ контактирует с распыленной жидкостью, представляют собой обычно наименее дорогие установки. Однако в результате перемешивания распыленной жидкости потоком газа, уноса капель жидкости газовым потоком и прямого тока фаз в большинстве аппаратов абсорбционных установок распылительного типа обычно неприменимы на системах, требующих строгого противоточного движения фаз.

Аппараты с распылением жидкости применяются для абсорбции хорошо растворимых газов, так как достижимое число единиц переноса в таких установках ограничено. Распылительные установки нашли применение для систем, которые помимо хорошо растворимого газа содержат твердые частицы, подлежащие выделению из газового потока.

В промышленной практике применяются следующие типы распылительных установок: распылительные колонны (рис. I-97), циклонные распылители (рис. I-98) и скрубберы Вентури (рис. I-99), которые обычно об-

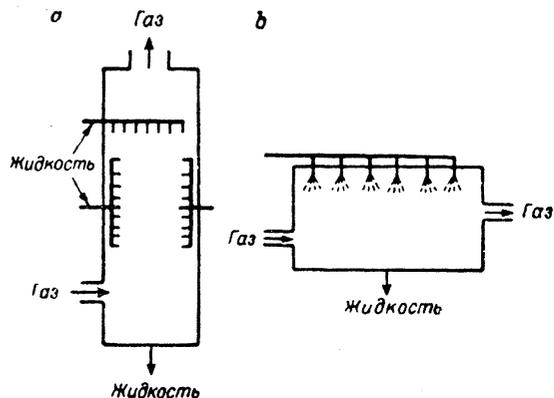


Рис. I-97. Схема распылительной колонны с комбинированным распределением жидкости (а) и поперечный разрез распылительного абсорбера с перекрестным током (б) — видны параллельные ряды распылительных насадок.

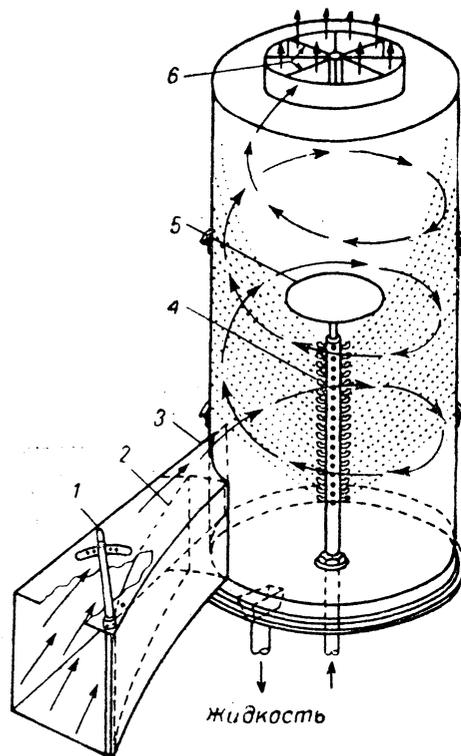


Рис. I-98. Схема циклонного распылительного скруббера:

1 — рукав; 2 — шибер на входе газа; 3 — тангенциальный патрубок на входе газа; 4 — трубопровод с распылительными насадками; 5 — центральный отражательный диск; 6 — раскручиватель потока.

¹ Arndt, Am. Inst. Chem. Engrs Atlanta Meeting, Febr., 1959.

² Chilton, Chem. Eng., 56 (6), (1949).

единяются с сепаратором циклонного типа, а также инжекционные струйные скрубберы.

Диспергирование жидкости в распылительных колоннах и циклонных распылителях осуществляется за счет механической энергии жидкой фазы, а в скрубберах Вентури — за счет энергии газовой фазы. В ин-

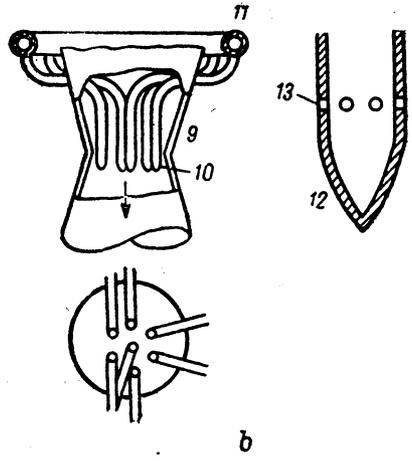
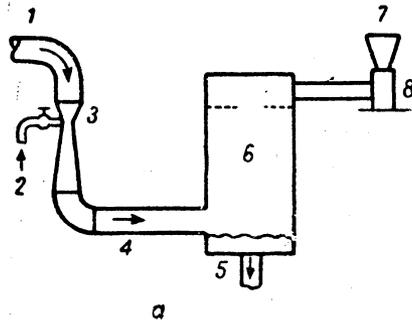


Рис. I-99. Скруббер Вентури (а) и центральные распылительные насадки (б):

- 1 — вход загрязненного воздуха; 2 — вход воды; 3 — труба Вентури; 4 — промытый газ; 5 — вывод скрубберной воды; 6 — сепаратор; 7 — выход газа; 8 — вентилятор; 9 — горловина трубы Вентури; 10 — распылительные насадки; 11 — напорный коллектор воды; 12 — распылительная насадка в разрезе; 13 — отверстия диаметром 6 мм.

жекционных струйных скрубберах энергия для распыления жидкости и перемещения газа подводится к жидкой фазе.

Лунде¹ установил, что в аппаратах с распылением жидкости число единиц переноса зависит от энергии, подводимой к жидкой или газовой фазе ($E_{ж}$ и $E_{г}$ соответственно):

Распылительные колонны	$N_T :: \frac{E_{ж}^{-1}}{E_{г}^{0,1}}$
Циклонные распылительные башни	$N_T :: E_{ж}^{0,9}$
Скрубберы Вентури	$N_T :: E_{ж}^{0,3} E_{г}^{0,8}$

Сравнение потребляемой энергии в циклонном скруббере и скруббере Вентури, проведенное Лунде (см. выше), показано на рис. I-100, а для распылительной колонны и скруббера Вентури — на рис. I-101.

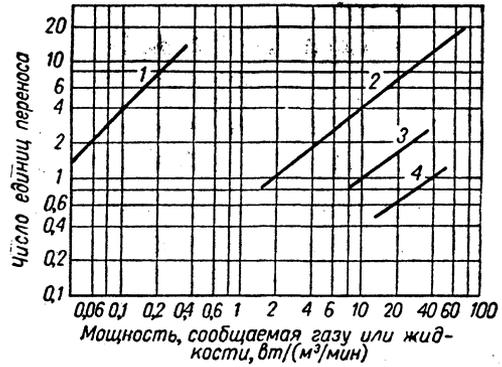


Рис. I-100. Потребление энергии при абсорбции SO₂:

- 1 — решетчатая колонна; 2 — циклонный скруббер; 3 и 4 — скруббер Вентури (кривая 4 для мощности в 30 раз меньшей, чем для кривой 3).

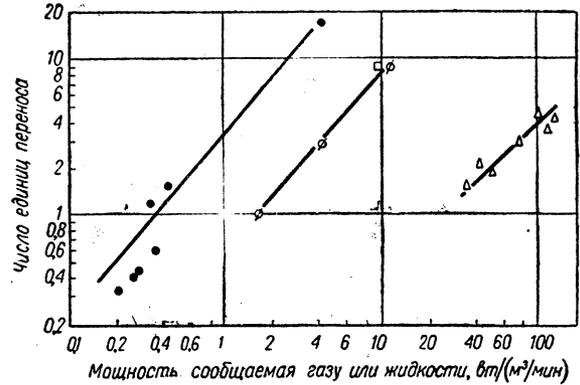


Рис. I-101. Потребление энергии при абсорбции HF:

- — распылительная колонна; △ — скруббер Вентури; □ — мокрый скруббер; ○ — мокрый скруббер (твердые частицы + туман).

Полые распылительные колонны¹

Можно ожидать, что массопередача в распылительных колоннах, где капли жидкости падают под действием силы тяжести, протекает в жидкой фазе по механизму проникания; тогда для систем с определенным сопротивлением массопередаче в жидкой фазе $W :: t^{1/2}$ (где W — количество переданной массы, а t — время контакта фаз).

Исследуя абсорбцию CO₂ распыленным вязким сахарным раствором, содержащим известь, в колонне диаметром 300 мм, снабженной разбрызгивателем, рас-

¹ Lunde, Ind. Eng. Chem., 50, 293 (1958).

¹ См. также «Распылительные устройства», стр. 76 настоящего тома.

пылительная головка которого имела 85 отверстий диаметром 1,58 мм, Босворт¹ установил, что количество абсорбируемого вещества прямо пропорционально длине пути падения в степени 1/4 или времени контакта капель с газом в степени 1/2.

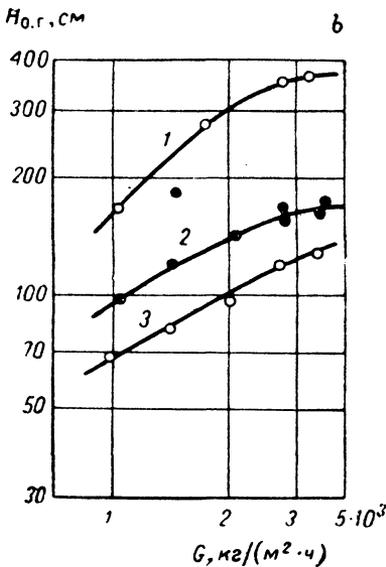
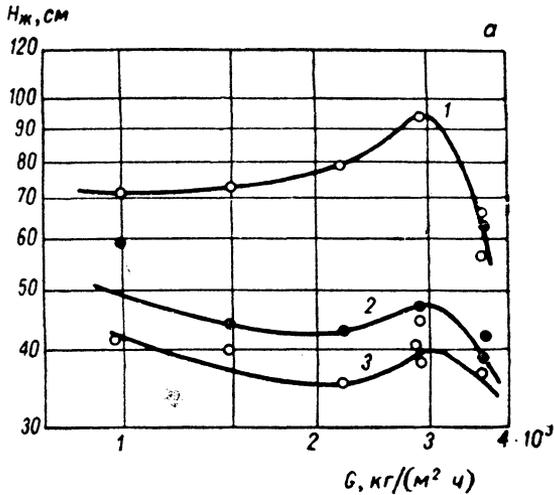


Рис. I-102. Зависимость высоты единицы переноса H от скорости газа G в распылительном абсорбере:

a — десорбция O_2 из воды при $30^\circ C$; b — теплообмен и конденсация воды из воздуха; 1 — $L = 1460 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2 — $L = 2920 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 3 — $L = 3900 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Пигфорд и Пайл² исследовали массопередачу при десорбции кислорода, конденсации воды (рис. I-102) и при абсорбции аммиака (рис. I-103) на колонне диаметром 800 мм и высотой 660 и 1320 мм с шестью распылительными насадками «Спрейко 5-В». Опыты по десорбции кислорода показали, что высота едини-

цы переноса примерно обратно пропорциональна плотности орошения или прямо пропорциональна времени пребывания жидкости в колонне. Для систем с определяющим сопротивлением в газовой фазе (воздух — вода) или с преобладанием сопротивления в газовой фазе (NH_3 — воздух — вода) при $G < 2440 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ $H_{o.g.} \propto G^{0,5}$ или $1/L$. При $G > 2440 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ влияние увеличения скорости газа на $H_{o.g.}$ уменьшается.

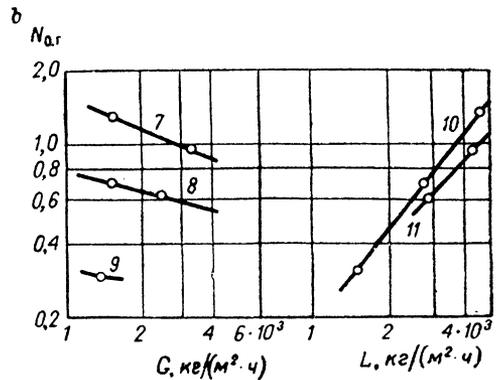
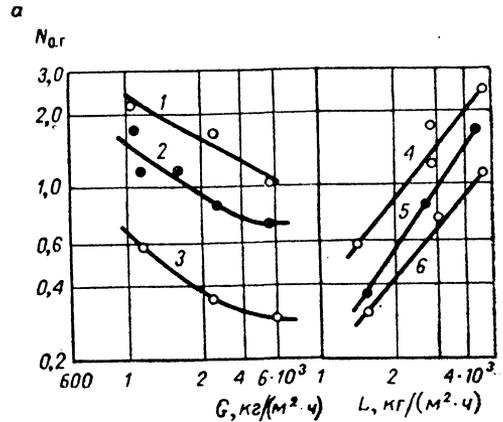


Рис. I-103. Абсорбция NH_3 в распылительной колонне. Шесть насадок «Спрейко 5-В» расположены на кольцевом коллекторе диаметром 300 мм на вершину колонны:

a — высота рабочей части колонны 1320 мм; b — высота рабочей части колонны 660 мм;

Кривая	$L, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Кривая	$L, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$
1 и 7	4380	6	3900
2	2920	8	2720
3	1460	9	1390
4	1120	10	1460
5	2290	11	3210

Факторы, определяющие эффективность работы распылительных колонн, приведены на рис. I-103. Число единиц переноса не прямо пропорционально высоте колонны (так, при удвоении высоты колонны с 660 до 1320 мм число единиц переноса возрастает только на 47%). Это явление отражает недостаток, свойственный распылительным колоннам: при падении капель не про-

¹ Bosworth, Austral. Chem. Inst. J. a. Proc., 13, 53 (1946).
² Pigford, Pyle, Ind. Eng. Chem., 43, 1049 (1951).

исходит обновления их поверхности, и скорость переноса массы поэтому уменьшается с течением времени контакта фаз. Кроме того, турбулентность течения газа в колонне приводит к обратному перемешиванию, что нарушает противоток фаз.

Предельная скорость газа в распылительных колоннах, при которой начинается интенсивный унос жидкости, оказалась равной $3900 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (рис. I-102 и I-103).

Данные по работе распылительной колонны диаметром 200 мм и высотой 760 мм на системе SO_2 — воздух — вода при 15°C и 1 атм обобщены в виде уравнения 1

$$\frac{1}{K_r a} = \frac{2,9}{U_c^{0,8}} + 58,4 \quad (\text{I-91})$$

где $K_r a$ — коэффициент массопередачи, $\text{кг}/(\text{сек} \cdot \text{м}^3 \times \text{X}/\text{м}^2)$; U_c — скорость газа в свободном сечении колонны, $\text{м}/\text{сек}$.

Джонстон и Вильямс² рассчитывали коэффициенты массопередачи в распылительной колонне к каплям с установленным распределением по размеру. При этом принималось, что все капли выбрасываются вертикально вниз по постоянным траекториям и испарения жидкости не происходит. Коалесценция капель учитывалась. Получено хорошее совпадение с экспериментальными данными по абсорбции SO_2 раствором сульфит — бисульфит аммония. Величины $K_r a$, полученные в опытах на колонне внутренним диаметром 1070 мм и высотой 2650 мм , находились в пределах 12 — $33,6 \text{ кмоль}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{атм})$ при плотности орошения $L = 1390 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и скорости газа $G = 1320 \div 2630 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Циклонные распылительные колонны

Циклонные распылительные колонны обладают более высокой пропускной способностью по газу, чем полые³. Предельная пропускная способность составляет $11700 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Ее можно повысить, заставляя газ двигаться по спирали внутри колонны. Распыленная жидкость, поступая в объем колонны из распределителя, расположенного по ее оси, контактирует с газом и затем сепарируется под действием центробежной силы, отбрасываемой капли к стенкам аппарата, по которым жидкость стекает в виде пленки. Вследствие этого резко уменьшается унос жидкости.

Было проведено исследование абсорбции SO_2 раствором соды в циклонном скруббере⁴. Жидкость распылялась распределителем длиной 1830 мм , расположенным по оси аппарата. На нем было от 20 до 50 форсунок с полым конусом распыла (диаметр входного отверстия форсунки $1,18 \text{ мм}$). Аппарат имел высоту $4,3 \text{ м}$, внутренний диаметр нижней части аппарата 725 мм , а верхней — 520 мм . Опытные данные, полученные на этой установке, приведены на рис. I-104. Эти данные, а также результаты опытов, полученные

на установке внутренним диаметром $3,2 \text{ м}$, обобщаются уравнением:

$$N_{o,r} = \frac{ALD_k \Pi}{G^{0,8} S d S c^{2/3}} + \frac{BA_m \Pi}{G^{0,37} S S c^{2/3}} \quad (\text{I-92})$$

где $N_{o,r}$ — общее число единиц переноса в газовой фазе; L — расход жидкости; D_k — диаметр колонны;

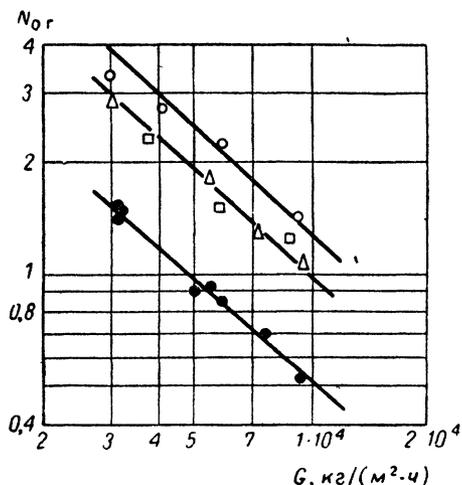


Рис. I-104. Абсорбция SO_2 раствором Na_2CO_3 в циклонной распылительной колонне диаметром 700 мм .

Плотность орошения $L = 9,06 \div 25 \text{ кг}/\text{ч}$, или $0,453 \text{ кг}/\text{мин}$ на одну форсунку; \circ — 20 насадок внизу; \triangle — 35 насадок внизу; \square — 35 насадок по высоте колонны; \bullet — 50 насадок внизу.

Π — общее давление; G — массовая скорость газа во входном патрубке; S — поперечное сечение входного патрубка; A_m — смоченная поверхность колонны; d — средневесовой диаметр капли; $S c$ — критерий Шмидта; A, B — постоянные коэффициенты.

Скрубберы Вентури

Скрубберы Вентури были разработаны для целей газоочистки. Диспергирование жидкости (подаваемой в горловину трубы Вентури под давлением $0,35$ — $1,75 \text{ ат}$) высокоскоростным газовым потоком приводит к тому, что образуется огромная поверхность межфазового контакта. Это в свою очередь создает благоприятные условия для массообмена. Обратное перемешивание и прямая фаза ограничивают максимально достижимое число единиц переноса в таких установках. Рекомендуется¹ принимать скорость газа в горловине трубы Вентури в пределах 38 — $92 \text{ м}/\text{сек}$, а орошение — $0,27$ — $1,2 \text{ л}$ на 1 м^3 газа.

Сопротивление скрубберов Вентури, как правило, велико и колеблется у нормально действующих промышленных установок в пределах от 200 до 500 мм вод. ст . Зависимость сопротивления от рабочих условий показана на рис. I-105.

¹ Вурд, Dewey, Chem. Eng. Progr., 53, 447 (1957).

¹ Haslam, Ryan, Weber, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 15, 177 (1923).

² Johnstone, Williams, Ind. Eng. Chem., 31, 993 (1939).

³ Kleinschmidt, Anthony, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., 63, 349 (1941).

⁴ Johnstone, Silcox, Ind. Eng. Chem., 39, 808 (1947). — Johnstone, Kleinschmidt, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 34, 181 (1938).

Установлено¹, что оптимальный размер частиц для абсорбции в системе SO₂ — воздух — вода равен 100 мкм.

Интенсивность массопередачи в скруббере Вентури на этой системе может быть установлена по опытным

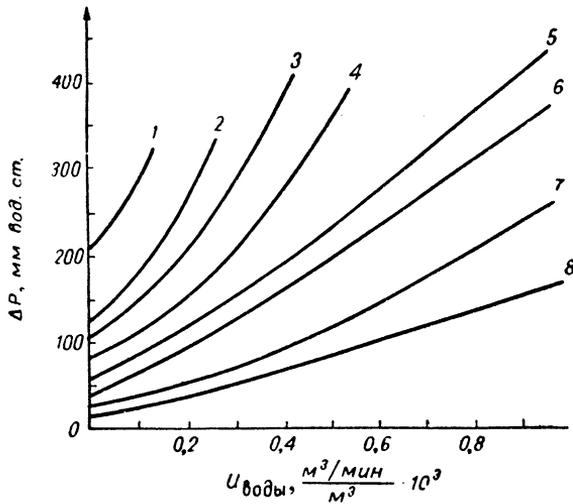


Рис. I-105. Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури ΔP в зависимости от скорости воды U_{вод}:

Кривая	Скорость газа, м/сек	Кривая	Скорость газа, м/сек
1	103	5	60,4
2	81	6	51,8
3	73,8	7	44,3
4	66,5	8	36,9

данным, отнесенным к развиваемой межфазовой поверхности:

$$N_{расп} = 0,052S \quad (I-93)$$

где N_{расп} — число единиц переноса, полученное при распылении жидкости; S — поверхность капель, м²/м³ газа.

Ввиду того, что межфазовая поверхность определялась по уравнению, экспериментально проверенному Льюисом и др.², число единиц переноса для этой системы в скруббере Вентури может быть представлено так же, как:

$$N_{расп} = \frac{311L}{\frac{4900}{U_r} + 28,8L^{1,5}} \quad (I-94)$$

где L — количество орошающей жидкости, дм³/м³; U_r — скорость газа в горловине трубы Вентури, м/сек.

При практически применяемых скоростях газа и величинах орошения в скруббере Вентури величина 28,8L^{1,5} мала по сравнению с величиной 4900/U_r. По-

этому Ka должен быть пропорционален L. Как показано на рис. I-106, это соотношение выдерживается. В исследованной области скоростей газа U_r = 41,8 ÷ 70 м/сек оптимальной оказалась величина 56,5 м/сек.

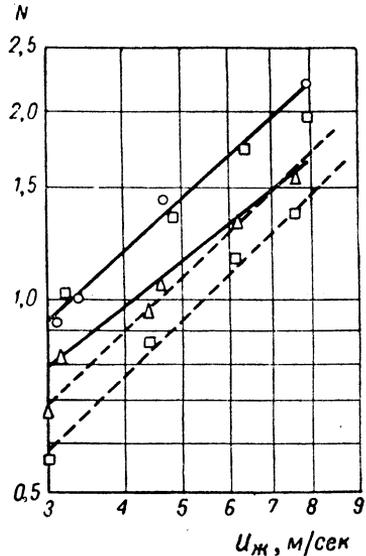


Рис. I-106. Зависимость числа единиц переноса N от скорости жидкости U_ж.

В скруббере восемь распылительных насадок внутренним диаметром 2,38 мм (сплошные кривые) и 1,78 мм (пунктир); скорость газа в горловине трубы Вентури: Δ — 41,8 м/сек, □ — 56,4 м/сек; ○ — 67 ÷ 70 м/сек.

Расход энергии в скрубберах Вентури составляет 3—8 квт на 1 м³ газа в час¹.

Инжекционные скрубберы

Скруббер Вентури, создающий тягу, или инжекционный скруббер, по принципу работы представляет собой обращенный «стандартный» скруббер Вентури. Перемещение газа через аппарат и дробление жидкости осуществляется за счет энергии струн жидкости. Производительность по газу в зависимости от необходимой тяги и скорости подачи воды показана на рис. I-107.

ПЛЕНОЧНЫЕ КОЛОННЫ

Пленочные абсорберы, называемые также абсорберами с орошаемыми стенками или с падающей жидкой пленкой, применяются в тех случаях, когда одновременно с массопередачей требуется обеспечить высокие скорости переноса тепла. Характерные черты пленочных колонн — это низкие скорости массопередачи и наличие больших открытых поверхностей, обеспечивающих хороший теплообмен при данной скорости переноса массы. Кроме того, этот тип аппаратов может конструироваться как холодильник типа «труба в трубе».

¹ Johnstone, Roberts, Ind. Eng. Chem., 41, 2417 (1949).

² Lewis et al., Ind. Eng. Chem., 40, 67 (1948).

¹ В а с е е, J. A. P. C. A., 6, 218 (1957).

При исследовании испарения чистых жидкостей в поток воздуха для ламинарного течения жидкости без волнообразования было найдено¹:

$$\frac{k_r d_{вн}}{D_r} \cdot \frac{p_{вср}}{\Pi} = 0,023 \text{ Re}^{0,83} \text{ Sc}^{0,44} \quad (I-95)$$

Здесь D_r — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{сек}$; $d_{вн}$ — внутренний диаметр трубы, м ; k_r — коэффициент мас-

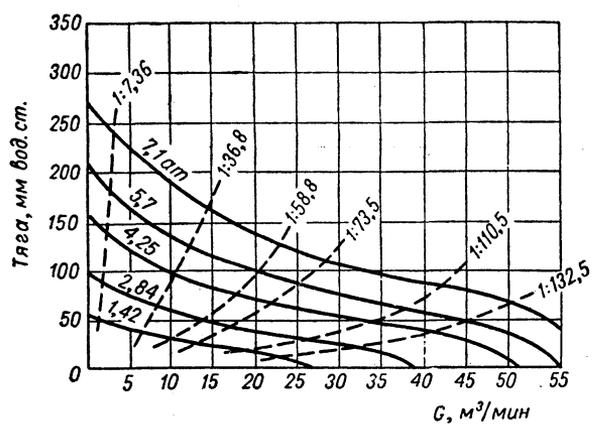


Рис. I-107. Производительность скруббера хвостовых газов инжекционного типа.

Сплошные линии — давление воды перед насадкой; пунктир — расход жидкости, $\frac{\text{м}^3}{\text{сек}} / \frac{\text{м}^3 \text{ газа}}{\text{сек}}$.

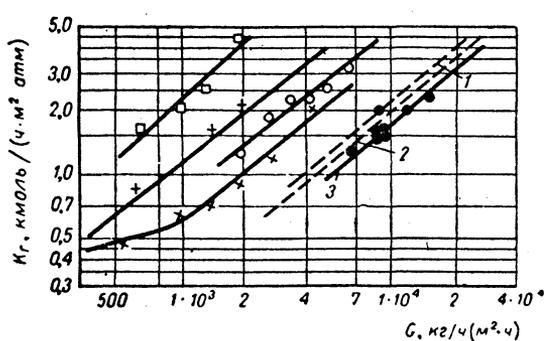


Рис. I-108. Коэффициенты массопередачи K_r в пленочной колонне с турбулизаторами.

Конденсация водяных паров: □ — насадка С малая со сверленной головкой; + — насадка А с расширяющейся выходной трубкой; ○ — насадка диаметром 6 мм, гладкое выходное отверстие; × — насадка типа трубы Вентури.

Абсорбция аммиака (обозначена ●): 1 — расчетная зависимость по абсорбции аммиака в трубке диаметром 40 мм; 2 — расчетная зависимость по массопередаче при конденсации водяных паров из воздуха в трубке диаметром 50 мм; 3 — примерная критическая скорость массопередачи в гладкой круглой трубке диаметром 50 мм.

соотдачи в газовой фазе, $\text{кмоль}/(\text{сек} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кмоль}/\text{м}^3)$; Re — критерий Рейнольдса, газовая фаза; Sc — крите-

рий Шмидта, газовая фаза; $p_{вср}$ — среднегарифмическое парциальное давление инертного газа, $\text{н}/\text{м}^2$; Π — общее давление, $\text{н}/\text{м}^2$.

При изучении абсорбции водяных паров серной кислотой¹ было установлено, что использование турбулизаторов потока газа на входном участке трубы повышает коэффициент массоотдачи в газовой фазе, а при изучении абсорбции аммиака² — что при наличии

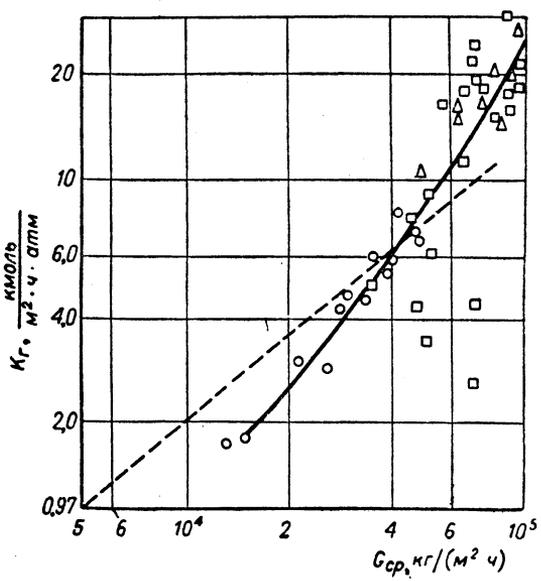


Рис. I-109. Зависимость коэффициента массопередачи K_r от скорости газа G при абсорбции NH_3 в пленочной колонне:

Точка	Высота трубчатого абсорбера, м	Диаметр трубы, мм
□	1,83	25
△	3,35	22
○	2,75	38

Пунктиром показана корреляция Гиллиленда.

успокоительного участка на входе газа в трубу опытные коэффициенты массоотдачи оказываются ниже рассчитанных по уравнению (I-95) — (см. рис. I-108).

На системе хлористый водород — воздух — вода при прямом движении фаз установлено³, что $k_r : G^{1,8}$ (рис. I-109), в то время как в уравнении Гиллиленда показатель степени равен 0,8. В этой работе определены коэффициенты теплоотдачи. Резкое увеличение коэффициента теплоотдачи при $G = 98000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ было подобно тому, что наблюдали Тип и Мюллер⁴ при конденсации внутри труб.

¹ Greenewalt, Ind. Eng. Chem., 18, 1291 (1926).
² Cogan, Cogan, M. I. T. Thesis, 1932.
³ Dobratz, Moore, Barnard, Meyer, Chem. Eng. Progr., 49, 611 (1953).
⁴ Tepe, Mueller, Chem. Eng. Progr., 43, 267 (1947).

¹ Gilliland, Sherwood, Ind. Eng. Chem., 26, 516 (1934).

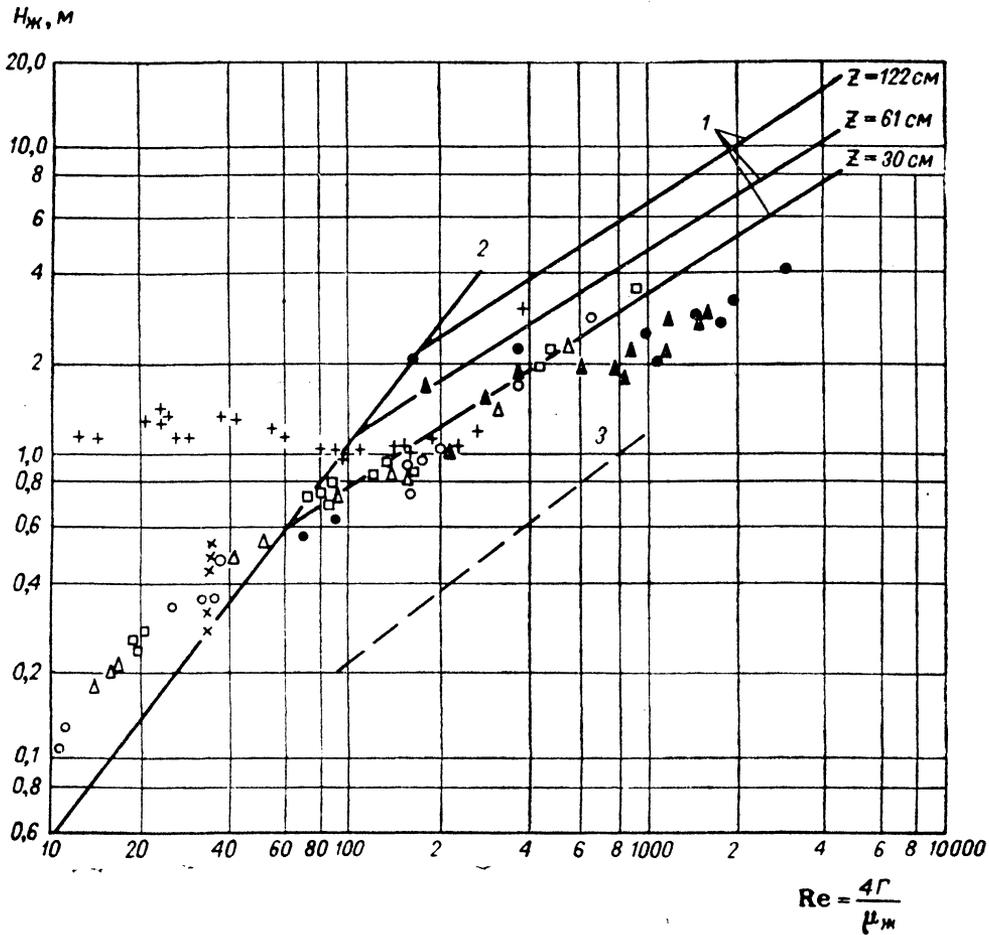


Рис. I-110. Сопротивление в жидкой фазе при абсорбции газов в пленочных колоннах. Теоретические линии рассчитаны для абсорбции кислорода водой:

1 — теоретические асимптоты для больших Re:

$$\frac{H_{ж}}{l} = 0,72 \sqrt{\frac{\Gamma B F}{\rho_{ж} D_{ж} z}}$$

2 — теоретическая асимптота для малых Re:

$$H_{ж} = 0,089 \left(\frac{\Gamma B F}{\rho_{ж} D_{ж}} \right)$$

3 — корреляция Ходсона.

Точка	Автор	Сущность процесса	Положение поверхности	Длина поверхности, мм
▲	Миллер	Абсорбция O ₂ водой при 12,2° С	Вертикальная	730
●	»	То же	»	1160
○	Вязовов	Абсорбция CO ₂ водой при 13° С	Наклонная (17,5°)	192
△	»	То же	» (17,5°)	376
□	»	»	» (17,5°)	730
×	Хатта, Катори	Абсорбция CO ₂ водой	Наклонная	152 и 342
+	Гримлей	Абсорбция CO ₂ водой при 24° С	Вертикальная труба	.....

Гейлорд и Миранда¹ для абсорбции хлористого водорода водой в нисходящем потоке в многотрубном аппарате нашли:

$$K_{\Gamma} = \frac{1,66 \cdot 10^{-10}}{M_{\text{ср}}^{1,75}} \cdot \frac{d_{\text{тр}} G}{\mu_{\Gamma}} \quad (\text{I-96})$$

где K_{Γ} — общий коэффициент массопередачи, $\text{кмоль}/(\text{сек} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{н}/\text{м}^2)$; $M_{\text{ср}}$ — средний молекулярный вес газового потока на входе в трубу; $d_{\text{тр}}$ — диаметр трубы, м ; G — массовая скорость газа на входе в трубу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$; μ_{Γ} — вязкость газа, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$.

Это уравнение хорошо удовлетворяет также данным, полученным для той же системы на одиночной трубе².

Скорость массопередачи в жидкой фазе в пленочных аппаратах в сильной степени зависит от состояния поверхности жидкости. При ламинарном течении и отсутствии волнообразования справедлива ламинарная теория проницания. Однако, когда на поверхности жидкости образуются волны, а они могут возникнуть при $Re > 4$, развивается значительная скорость обновления поверхности, вызывающая увеличение скорости переноса массы.

Хатта и Катори³, проведя анализ механизма переноса массы в жидкой фазе в отсутствие волнообразования, показали, что:

$$k_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \sqrt{\frac{D_{\text{ж}} \Gamma}{\rho_{\text{ж}} B_{\text{F}}^2}} \quad (\text{I-97})$$

где

$$B_{\text{F}} = \left(\frac{3z\Gamma}{\rho_{\text{ж}}^2} \right)^{1/3} \quad (\text{I-98})$$

$D_{\text{ж}}$ — коэффициент диффузии в жидкой фазе, $\text{м}^2/\text{сек}$; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; z — длина поверхности, м ; $k_{\text{ж}}$ — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, $\text{кмоль}/(\text{сек} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кмоль}/\text{м}^3)$; Γ — скорость жидкости, $\text{кг}/(\text{сек} \cdot \text{м} \text{ смоченного периметра})$; $\mu_{\text{ж}}$ — вязкость жидкости, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$.

Когда z велика, или $\Gamma/\rho_{\text{ж}} B_{\text{F}}$ мало настолько, что жидкость проникает на всю глубину,

$$k_{\text{ж}} = 3,41 \frac{D_{\text{ж}}}{B_{\text{F}}} \quad (\text{I-99})$$

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ФАЗ

Газо-жидкостные смеси подразделяются на три типа. В смесях первого типа газовая фаза сплошная, а жидкая находится в ней в виде капель или частиц. В смесях второго типа жидкая фаза сплошная, а газ распределен в ней в виде пузырьков. В смесях третьего типа обе фазы сплошные, но вместе с тем образуют относительно большую межфазовую поверхность, или наоборот, обе фазы могут оказаться дисперсными, в зависимости от местных условий в смеси. Примером последнего случая может служить движение в трубе высокотурбулентного двухфазового потока (газ и жидкость в соответствующих соотношениях).

¹ Gaylord, Miranda, Chem. Eng. Progr., 53, 139 M (1957).

² Coull, Bishop, Gaylord, Chem. Eng. Progr., 45, 506 (1949).

³ Hatta, Katori, J. Soc. Chem. Ind., 37, 280B (1934).

и

$$N_{\text{ж}} = 0,29 \frac{\Gamma B_{\text{F}}}{D_{\text{ж}}} \quad (\text{I-100})$$

Шервуд и Пигфорд¹ провели сравнение экспериментальных данных по абсорбции двуокиси углерода, кислорода и водорода (рис. I-110), полученных рядом исследователей².

Обычно коэффициенты массоотдачи, полученные из опыта, выше рассчитанных теоретическим путем. Это можно объяснить развитием волн на поверхности жидкости, нарастающим при увеличении длины пути жидкости.

При изучении массопередачи в пленочной колонне на системах CO_2 — вода и Cl_2 — HCl — вода было установлено³, что скорость газа не влияет на коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при $Re < 2200$. Выше этой скорости явления, связанные с волнообразованием, значительно увеличивают скорость массопередачи в жидкой фазе. Авторы предложили зависимость, выведенную путем анализа размерностей, но отмечают, что необходима осторожность при пользовании уравнениями такого типа. Они утверждают, что увеличение длины колонны возбуждает волнообразование, которое ускоряет процесс переноса массы, но в то же время увеличивает время контакта фаз, а это, в соответствии с теорией проницания, снижает среднюю скорость массопередачи в жидкой фазе. Уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{k_{\text{ж}} h}{D_{\text{ж}}} = 0,433 \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} D_{\text{ж}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_{\text{ж}}^2 g h^3}{\mu_{\text{ж}}^2} \right)^{1/6} \left(\frac{4\Gamma}{\mu_{\text{ж}}} \right)^{0,4} \quad (\text{I-101})$$

где $k_{\text{ж}}$ — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, $\text{м}/\text{сек}$; $D_{\text{ж}}$ — коэффициент диффузии газа в жидкости, $\text{м}^2/\text{сек}$; h — длина смоченной части стенки колонны, м ; Γ — массовая скорость жидкости, $\text{кг}/(\text{сек} \cdot \text{м} \text{ смоченного периметра})$.

Гиллиланд и др.⁴ при изучении скорости поглощения хлора растворами хлорида железа в пленочной колонне показали, что в ламинарном режиме движения химическая реакция в жидкой фазе приводит к снижению влияния скорости жидкости на коэффициент массоотдачи (рис. I-75).

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ЖИДКОСТИ В ГАЗЕ

Жидкость может быть распределена в газовой среде в нескольких состояниях. Она может течь или падать в виде сплошного потока, струи или пленки, покоиться на поддерживающей поверхности в виде статической

¹ Sherwood, Pigford, Absorption and Extraction New York, 1952.

² Hatta, Katori, J. Soc. Chem. Ind., 37, 280B (1934). — Grimley, Trans. Inst. Chem. Engrs, 23, 228 (1945). — Вязовов, ЖТФ, 10, 1519 (1940). — Hodgson, S. M. Thesis, M. I. T. 1949. — Henley, B. S. Thesis, Univ. of Delaware, 1949. — Miller, B. S. Thesis, Univ. of Delaware, 1949. — Richards, B. S. Thesis, Univ. of Delaware, 1950.

³ Vivian, Peaceman, Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 437 (1956).

⁴ Gilliland et al., Am. Inst. Chem. Engrs J., 4, 323 (1958).

пленки, обращенной одной из поверхностей к газу. Она может быть превращена в отдельные капли (часто микроскопических размеров), которые быстро осаждаются в газовой среде или динамически поддерживаются в диспергированном состоянии. Отчетливой границы между этими двумя крайними случаями нет, но практически струя или пленка ясно отличаются от брызг, тумана, дыма или свободных капель.

Теория образования капли

Капли могут образовываться при механическом дроблении массы жидкости (при разрушении струи или пленки) или при конденсации из паровой фазы. Конденсация пара в мелкодисперсную жидкую фазу происходит при пересыщении газа парами жидкости, иногда она стимулируется наличием центров конденсации или веществ, способствующих их появлению. Пересыщение может быть результатом переохлаждения насыщенной смеси (например, при смешении с потоком холодного газа или при внезапном расширении смеси) или химической реакции между газообразными компонентами, ведущей к образованию жидкого продукта (например, при образовании капелек серной кислоты из водяного пара и SO_3). Сначала получаются очень маленькие ($<0,1$ мкм) капли, и такая дисперсия относится к классу аэрозолей, или туманов, часто чрезвычайно устойчивых.

Разрушение струй и пленок. Струя жидкости механически неустойчива, и чем меньше ее диаметр, тем выше чувствительность к малым разрушающим силам. Она разрушается при возникновении местных утолщений и сужений (из утолщений образуются первичные капли, а затем вторичные), при волнообразовании (гребни волны становятся нестабильными и разрушаются). В момент образования струи возможны оба механизма ее разрушения, но при низких скоростях истечения разрушение, вероятно, вызывается местными расширениями и сужениями. При увеличении скорости и быстром росте сопротивления воздуха становится более вероятным волновое разрушение. При очень высоких скоростях инерция струи становится слишком значительной, чтобы на ее поверхности появились колебания того или иного типа¹. В отличие от взаимодействия двух смешивающихся жидкостей, газ образует в жидкости пузырь, а жидкость в газе — капли, которые отрываются от поверхности жидкости.

Струя может разрушиться и под воздействием внешнего источника, увеличивающего ее нестабильность, ускоряющего распад и делающего распыление полным. Если струя представляет собой ламинарный поток, она должна быть обязательно выведена из равновесия. Это может быть сделано как в форсунке, так и после выхода из нее.

Тонкие пленки, свободно движущиеся в газе, а не по твердой поверхности, нестабильны, как струи, и распадаются на капли. Фрезер² описывает четыре механизма разрушения пленки.

1. Краевое разрушение. Струйки жидкости отрываются от кромок пленки в виде первичных капелек. Затем эти капли разрушаются на более мелкие.

2. Перфорационное разрушение. Тонкие участки пленки прорываются из-за турбулентности. При появ-

лении такого «прокола» пленки в одном месте разрушение быстро распространяется на остальную поверхность под действием поверхностного натяжения.

3. Волновое разрушение. Если пленка с высокой скоростью входит в газую среду, вихревое движение газовой фазы заставляет ее колебаться. В результате в ней возникают большие напряжения, которые могут привести к отрыву частиц жидкости или заставить пленку свернуться в полые струи, которые нестабильны и распадаются на полые капли.

4. Разрушение пленки большой толщины. В результате взаимодействия с атмосферой при высоких скоростях пленка жидкости может распасться вблизи образующего ее отверстия. Получаются сравнительно большие первичные капли.

Механические свойства жидкости и газовой среды, в которой она распыляется, влияют на разрушение струй или пленок. Особенно важно учитывать вязкость и поверхностное натяжение жидкости. Высокая вязкость способствует удлинению пленки, большое поверхностное натяжение — получению более короткой и прочной пленки, оба фактора вместе — получению более гладкой и устойчивой пленки. При прочих равных условиях низкая вязкость и малое поверхностное натяжение желательны для облегчения диспергирования и получения капелек минимального размера. Влияние свойств газа, в который вводится жидкость, менее определено. Фрезер (см. выше) указывает, что средний размер капелек, получаемых в простой механической форсунке при распылении воды в воздухе, медленно возрастает, если давление окружающего воздуха уменьшается по сравнению с атмосферным, резко увеличивается при давлении 450 мм рт. ст., а затем начинает уменьшаться при дальнейшем понижении давления.

Затраты энергии. Разделение массы жидкости на капли приводит к увеличению межфазовой поверхности, а удельная поверхность находится в обратной пропорциональной зависимости от величины капелек (если их форма одинакова). Следовательно, при разделении капли диаметром 1 мм на одинаковые капли диаметром 1 мкм поверхность увеличивается от 0,0314 до 31,4 см².

Количество энергии, необходимое для увеличения поверхности раздела фаз, определяется удельной поверхностной энергией получаемой системы жидкость — газ (численно равной поверхностному натяжению) и площадью вновь образуемой поверхности. Это сравнительно малая величина. Например, чтобы разделить массу воды на капельки по 1 мкм требуется ~0,1 кал/г или 360 дж/кг распыленной воды.

Теоретически при распылении энергия затрачивается только на увеличение поверхностной энергии. Практически следует учитывать дополнительные энергетические потери в процессе диспергирования.

1. Инерционные потери. Обычно в процессе распыления движущие жидкости ускоряются и энергия ускорения частично теряется как на пути жидкости перед ее распылением, так и в виде остаточной кинетической энергии капелек после того, как они образуются. Диссипация энергии за счет инерции невелика: потери при увеличении скорости до 30 м/сек составляют ~0,1 кал/г.

2. Потери на вязкость. Скорость деформации жидкости при образовании капелек высока. Рассматривая модель достаточно идеализированную, чтобы иметь возможность провести вычисления, Монк¹ установил, что энергия, теряемая на преодоление сил вязкости

¹ Richardson, в кн. Herman «Flow Properties of Disperse Systems», Amsterdam, 1953.

² Fraser, Sixth Symposium on Combustion, New York, 1956.

при дроблении 1 г воды в секунду на капли величиной 1 мкм составляет 10^4 — 10^6 кал. Это соответствует затратам мощности 75—7500 квт.

3. Механические потери. Поведение необходимой энергии к жидкости при ее распылении само по себе требует затрат энергии. Механические потери связаны с использованием для диспергирования насосов, а также с движением жидкостей, вводимых в систему. Механические потери наиболее высоки в случае использования двухжидкостных форсунок и вращающихся дисков и минимальны при использовании удачно спроектированной простой форсунки в сочетании с высокоэффективным насосом.

Потери энергии, связанные с получением капли, в целом не поддаются подсчету, и энергетические потребности систем распыления должны определяться из опыта.

Теоретический размер капли и коалесценция. Механические свойства капель представляются весьма сложными. Капля может распасться на более мелкие частицы в результате инерционного взаимодействия с окружающим газом, как описано еще Гельмгольцем¹. Максимальный размер капли, противостоящей инерционному разрушению, может быть вычислен с учетом свойств жидкостей и относительной скорости капли². Доказано, что влияние вязкости и турбулентности газа незначительно. Капли, падающие с конечной максимальной скоростью, обладают стабильностью Гельмгольца вплоть до относительно больших диаметров (для воды в воздухе эта величина порядка 1 см). Меньшие капли требуют высоких относительных скоростей для достижения неустойчивости — для капли воды величиной 1 мм в воздухе эта скорость составляет ~15 м/сек, при уменьшении размера капли на порядок скорость увеличивается в $\sqrt{10}$ раз.

Одновременное воздействие других факторов, особенно сил вязкости и турбулентности газа, делает определение размера капли на основании принципа стабильности Гельмгольца неточным и серьезно осложняет теорию.

Эффективный размер капель, составляющих дисперсную систему, зависит от скорости коалесценции капель по отношению к отрезку времени их нахождения в системе. Капли объединяются, если возможен их физический контакт (исключая случаи их взаимной изоляции, как, например, в случае капелек ртути, покрытых пылью). Физический контакт капелек аэрозолей может явиться результатом броуновского движения, и частицы тумана объединяются с постоянно уменьшающейся скоростью, которая хорошо описывается простым законом³:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = kt \quad (I-102)$$

где n_0 и n — число диспергированных частиц в 1 см³ в первоначальный момент и во время t соответственно. Коэффициент k зависит от свойств аэрозоля, но для многих систем $k \approx 10^{-9}$ см³/сек. Если $n = 10^5$ частиц/см³, то для уменьшения числа частиц за счет коалесценции наполовину необходимо ~3 ч. Аэрозоли такой концентрации (и более низких) могут рассматриваться как практически стабильные.

Механически инициированный контакт также ускоряет коалесценцию. Так, было обнаружено резкое увеличение скорости коагуляции хлористого аммония при перемешивании аэрозоля мешалкой¹. Большой практический интерес представляют наблюдения Клейншмидта², который на основании закона Стокса показал, что знание распределения капель по размеру позволяет установить скорость столкновения, а следовательно, и скорость коалесценции капель. Ввиду того, что размер и распределение капель по величине редко известны точно, такие выкладки не позволяют получить количественных результатов, однако дают возможность качественно оценить положительное влияние движения газа вдоль оси форсунки или другого типа распылителя на снижение рекомбинации.

Скопление однородных по величине капель менее склонно к коалесценции, чем скопление капель различных размеров. В этом смысле перегородчатая конструкция медицинского распылителя позволяет получить системы не только относительно однородные, но и сравнительно стабильные, благодаря сепарации и возврату слишком больших капель.

Брызги, дымы, туманы

Брызгами обычно называют полученные механическим путем нестабильные взвеси относительно больших капель.

Дымы и туманы представляют собой стабильные композиции малых частиц, обычно рассматриваются как случайные, порой нежелательные явления, наиболее часто они наблюдаются в атмосфере. Дымы и туманы чаще образуются за счет конденсации, чем путем распыления.

Дым может состоять из взвеси пыли или тумана, характеризуется большой стабильностью и малым размером частиц (<5 мкм, а часто <0,1 мкм) и возникает путем конденсации, особенно при горении и других химических реакциях.

Термин аэрозоль, появившийся для обозначения коллоидных воздушных дисперсий, широко применяется для любых взвесей в воздухе.

Капель называется малая отдельная частица жидкости, приблизительно сферической формы. Миниатюрные капли, обычно более близкие к сферической форме, называются капельками.

Частицей называют любую отдельную часть тонко измельченного материала, твердого или жидкого, хотя обычно это слово используется для твердых веществ, в то время как термин глобула служит для обозначения исключительно жидких частиц.

Свойства и характеристики. Плотность газа, плотность, вязкость и поверхностное натяжение жидкости влияют на величину получаемых капель и их распределение по размерам, а также на степень трудности диспергирования струи или пленки. Точно оценить влияние этих свойств на отрыв и дальнейшее поведение капель можно только при самых упрощенных теоретических предположениях, но опыт показывает, что оно весьма значительно. Давая качественную оценку, можно сказать, что увеличение плотности жидкости приводит к большей устойчивости струи, но вместе с тем возрастают силы инерции, а поэтому уменьшается максимальный размер капли, устойчивой в гравитационном поле. С увеличением плотности газа уменьшается ста-

¹ См. библиографию на стр. 97—98.

² Birkhoff, Z. arantonello, Yefs, Wakes and Cavities New York, 1957, p. 330.

³ Whytlaw-Gray, Patterson, Smoke, London, 1932.

¹ Langstroth, Gillespie, Can. J. Res., B25, 445 (1947).

² Kleinschmidt, Chem. Met. Eng., 48, 487 (1939).

бильность как струи, так и капли и образуются более мелкие капли. Увеличение вязкости, затрудняя процесс дробления массы и значительно увеличивая энергетические затраты, приводит к возрастанию роли сил вязкости, делая их практически важными для образования капли. Повышение поверхностного натяжения (или, более строго, межфазового натяжения двухфазной системы) приводит к увеличению стабильности капли и затрудняет образование более мелких капель.

Давление пара не влияет прямо на механизм образования капли, но его косвенное влияние представляет интерес. Например, в процессе распада на капли жидкость часто переходит из зоны высокого давления в зону с низким давлением, и при определенных условиях она может быстро испариться или вскипеть. Такой процесс способствует разрушению струи или пленки. Распыленная жидкость или туман, имеющие развитую поверхность раздела фаз, быстро достигают состояния физического равновесия, и в газе, первоначально насыщенном жидкостью, может происходить энергичное испарение из капель легколетучего компонента. В зависимости от соотношения потоков жидкость — газ капли чистого вещества могут испариться полностью, а капли раствора могут превратиться в частицы твердого вещества. Испарение из капельного состояния является принципом, на котором основаны сушка и увлажнение распылением.

Очень малые капли будут продолжать испаряться и после того, как испарение больших прекратится, так как давление пара увеличивается с увеличением кривизны поверхности. Согласно уравнению Томсона — Гиббса:

$$\ln \left(\frac{p}{p_\infty} \right) = \frac{2\sigma M}{RT r \rho_{ж}} \quad (I-103)$$

где p — давление пара при температуре T , образовавшегося из капли радиуса r , которая состоит из жидкости с молекулярным весом M , поверхностным натяжением σ и плотностью $\rho_{ж}$, а p_∞ — давление пара той же жидкости при той же температуре над плоской поверхностью. Уравнение (I-103) было подтверждено экспериментально¹ для капель в системах диоктилфталат — толуол и оленовая кислота — хлороформ диаметром 0,16—1,4 мкм. Для капель воды крупнее 0,1 мкм давление пара увеличивается менее чем на 4%, но для жидкостей с высоким молекулярным весом и капель размером в 1 мкм оно может возрасти гораздо значительнее. На рис. I-111 демонстрируется этот эффект для диоктилфталата по сравнению с водой.

Температура, давление и состав жидкости и газа влияют на значения плотности, поверхностного натяжения, вязкости и давления паров, причем последние два параметра особенно чувствительны к температуре. Состав жидкости может сильно влиять на величину и форму капель, так как взвеси или растворы могут становиться концентрированными благодаря испарению или изменять свои свойства в результате химических реакций.

Характерными чертами смеси жидкостей в газах являются их гетерогенность и неустойчивость. Эффективная вязкость смеси равняется вязкости сплошной среды, в то время как плотность равна средней плотности смеси. Оптические характеристики (светопроницаемость, отражение, рассеивание, поляризация и специфическая окраска) представляют интерес с точки зрения анализа дисперсии.

Такие свойства капель и скоплений капель, как форма, размер, распределение по величине и пространственное распределение, электрический заряд, оказывают серьезное влияние на характеристики взвесей и туманов. Хотя очень крупные брызги могут состоять из капель с диаметром ~1 см, большинство дисперсий, представляющих промышленный интерес, имеют капли мельче 1 мм, а часто и мельче 200 мкм. Частицы очень тонких аэрозолей могут быть ~0,01 мкм. Такие капли

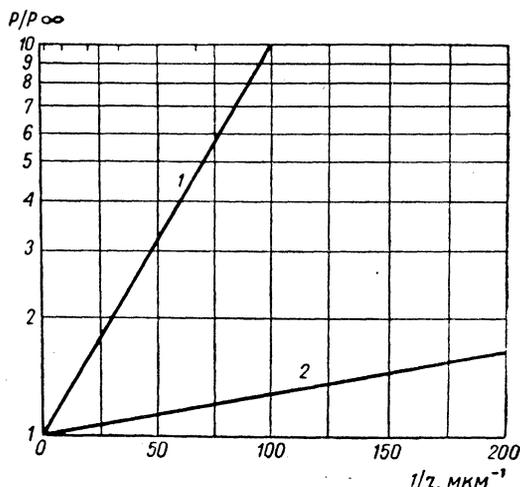


Рис. I-111. Зависимость давления пара от радиуса капли жидкости для низко- и высококипящих веществ:

1 — диоктилфталат; 2 — вода.

имеют строго сферическую форму. Распределение капель по величине широко изменяется в зависимости от источника их образования; конденсационная техника позволяет получать совершенно однородные капли (монодисперсные системы), в то время как некоторые методы распыления дают капли с широким диапазоном размеров.

Капли, оказавшиеся в контакте друг с другом, легко объединяются. Такое поведение свойственно только жидким дисперсным системам. Твердые частички, сталкиваясь, могут объединиться или не объединиться, а получившийся агломерат может быть относительно нестабильным. Коалесцирующие капли полностью теряют свою индивидуальность и никогда в точности не восстанавливаются. За исключением коалесценции и способности больших капель распадаться при падении, механика жидких и твердых частиц одинакового размера по существу та же. Этой теме посвящена обширная литература.

Капли часто несут электрический заряд, и его распределение по величине и знаку обычно случайно. Капли, получаемые распылением, приобретают заряд за счет ионов жидкости, из которой они образуются; капли, получаемые при конденсации, могут приобрести заряд за счет ионов из атмосферы естественным (например, от космических лучей) или искусственным образом. Естественные туманы часто несут высокие заряды преимущественно одного знака, которые увеличивают их стабильность¹.

¹ La Mer, Gruen, Trans. Faraday Soc., 48, 410 (1952).

¹ Elton, Chem. a Ind (London), 1953, p. 407.

Исследование дисперсий. Разумное и эффективное использование распыленных жидкостей и туманов требует знания численной и массовой концентрации, размера капель и связанных с ним параметров, а также распределения по величине и концентрации. Такие определения могут быть сделаны либо путем анализа образцов, либо прямым наблюдением за диспергированной массой.

Отбор образцов и исследование капель производится теми же методами, что и для анализа пыли. Обычно образец отбирается фильтрованием или осаждением, взвешивается для определения весовой концентрации, подсчитывается число частиц в единице объема газа и определяются их размеры. Для отбора капель с минимальной погрешностью часто используется пластина, покрытая парафином или жиром. Отбор окрашенных капель иногда производят на фильтровальную бумагу, принимая в расчет расширение следов при впитывании капель в бумагу. Подсчет и измерения можно осуществлять с фотографии или непосредственно с образца с помощью увеличительных линз, оптического или электронного микроскопа. Метод электронного сканирования фотографического негатива для оценки распределения капель по размерам¹, возможно, позволит отказаться от визуального подсчета. Разработан струйный импульсный прибор для экспрессного стандартного определения кумулятивного объемного распределения капель распыленной жидкости²; прибор рекомендуется для работы с каплями крупнее 100 мкм.

Применяемые до сих пор прямые оптические методы включают измерения (с помощью микроскопа или без него) скорости осаждения. Результаты обрабатываются затем с применением закона Стокса (для частиц с $Re < 0,05$) или его модификации Канингэма (для частиц, величина которых порядка длины свободного пробега молекулы). Кроме того, для оценки распределения частиц по размерам используются измерения интенсивного пропускаемого монохроматического света, интенсивности или поляризации рассеянного света, наблюдения порядка чередования цветного спектра в рассеянном свете на дуге 180° , числа сцинтилляций (т. е. концентрации частиц) в образце — последние наблюдаются с помощью ультрамикроскопа. Все эти методы требуют соответствующих оптических приборов и специальной методики, и каждый из них имеет ряд ограничений. Полезный критический обзор этих и других оптических методов дан Гринином и Лейном³.

Для количественной оценки монодисперсных суспензий, состоящих из чрезвычайно малых капель (порядка 0,1 мкм и менее), для которых непосредственные оптические методы неприменимы, разработан простой метод⁴, заключающийся в увеличении размера частиц посредством конденсации на них летучего растворителя. Метод применим только для относительно нелетучих жидкостей.

Имеются обзоры методов исследования распыленных жидкостей⁵.

Распылительные устройства

Распылительной насадкой называется устройство для дробления жидкости на капли. Широкое их применение

привело к большому разнообразию конструкций. Однако распылительная насадка любой конструкции может быть отнесена к одному из следующих типов.

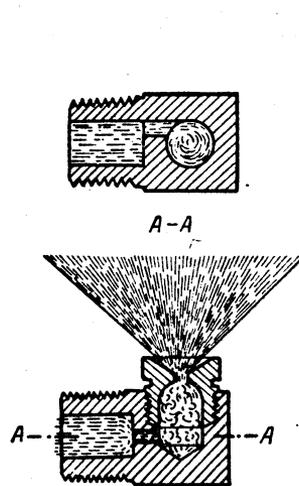


Рис. I-112. Малая форсунка с полым конусом распыла тангенциального типа.

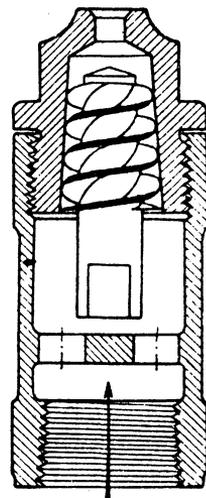


Рис. I-113. Малая форсунка с полым конусом распыла спирального типа.

1. Механические форсунки, в которые жидкость подается под давлением и дробится либо благодаря неустойчивости струи, либо в результате соударения с другой струей (жидкости или воздуха) или с неподвижной пластиной.

2. Во вращающихся насадках (вращающихся распылителях) жидкость подается под незначительным давлением в центр вращающегося с высокой скоростью диска или чаши. Дробление происходит за счет центробежной силы.

3. В пневматических форсунках (двухжидкостных форсунках, пневматических распылителях) жидкость подвергается разрушающему воздействию высокоскоростной струи газа.

Ниже дается описание различных конструкций форсунок перечисленных типов.

Механические форсунки. Форсунки с полым конусом распыла. В этих форсунках жидкость подается в вихревую камеру через тангенциальный канал (рис. I-112) или по центру через помещенную во входном канале спираль (рис. I-113 и I-114), в результате чего она приобретает вихревое движение. Выходное отверстие располагается на оси вихревой камеры, поэтому струя покидает форсунку в виде полого конуса, который распадается на капли.

Диаметр выходного отверстия этих форсунок 0,5—50 мм, производительность 0,04—750 л/мин. Большие

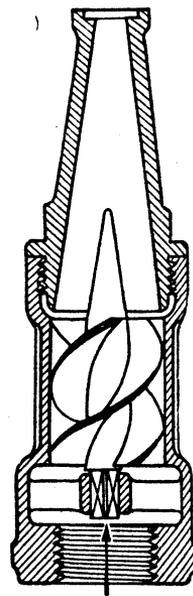


Рис. I-114. Большая форсунка с полым конусом распыла.

¹ Adler et al., Chem. Eng. Progr., 50, 14 (1954).

² Ranz, Hofelt, Ind. Eng. Chem., 49, 288 (1957).

³ Green, Lane, Particulate Clouds, London, 1964, ch. 4

⁴ La Mer et al., J. Colloid Sci., 5, 471 (1950); Science, 118,

516 (1953).

⁵ Ranz, Air Sprays and Spraying, Pennsylvania State Univ., 1956, — Troesch, Chem.-Ing.-Tech., 31, 667 (1959).

форсунки используются для бассейнов охлаждения воды, для промывки гравия и песка, аэрации воды и т. д. и обычно работают при невысоких давлениях. Малые форсунки могут использоваться для сушки распылением, промывки и увлажнения воздуха, в качестве нефтяных форсунок, при абсорбции газа и т. д. и обычно работают при более высоких давлениях. В целом для всех механических форсунок справедливо, что производительность форсунок приблизительно пропорциональна корню квадратному из давления, за исключением случаев чрезвычайно высоких давлений, когда скорость выхода жидкости из форсунки ограничивается трением. Рабочее давление обычно не превышает 20 ат, за исключением особых случаев (например, при получении сухого молока применяется давление в пределах 70—500 ат).

Для форсунки определенной конструкции расход при постоянном давлении приблизительно пропорционален площади сечения выходного отверстия, хотя оно и не используется полностью. Расход через форсунку изменяется незначительно в зависимости от вязкости жидкости, если последняя превышает вязкость воды не более чем в десять раз, хотя размер получаемых капель несколько изменяется.

Угол раскрытия конуса, образуемого распыленной струей, обычно с возрастанием давления медленно увеличивается до максимума, а затем уменьшается, но в основном он определяется соотношением размеров форсунки. Спираль с малым шагом дает конус с широким углом, и наоборот. Угол может составлять от 15 до 135°, но несколько форсунок одной конструкции не обязательно дадут один и тот же угол распыла при фиксированных давлении и расходе. Форсунки с малым углом конуса имеют тенденцию создавать скорее сплошной конус, нежели полый.

Форсунки со сплошным конусом распыла. Эта форсунка (рис. I-115), модификация форсунки с полым конусом, используется в тех случаях, когда необходим полный охват определенной поверхности и предпочтительно иметь более равномерное пространственное распределение капель.

Форсунка, изображенная на рис. I-115, по существу является форсункой с полым конусом, но осевая струя в ней разбивается вращающийся поток жидкости уже внутри выходного отверстия. Распад струи происходит в результате этого удара и возникающей турбулентности. Жидкость покидает выходное отверстие в виде капель, тогда как из форсунки с полым конусом она выходит в виде короткой конической пленки, наблюдаемой у отверстия, которая затем разбивается на капли. Для получения равномерного пространственного распределения необходимо, чтобы соблюдалось соответствующее соотношение между количеством жидкости, подаваемой в центральную струю, количеством вращающейся жидкости и размером выходного отверстия. Обычно большей части жидкости сообщается вращательное движение, а меньшая часть покидает форсунку в виде осевой струи. Последняя может питаться от отдельной линии — таким образом осуществляется взаимное перемешивание двух жидкостей или жидкости и газа.

Угол сплошного конуса распыленной жидкости зависит от конструкции форсунки и почти не зависит от давления. Различные форсунки, применяемые в промышленности, дают угол конуса от 30 до 100°. Выше указывалось, что форсунки с полым конусом при малых (<30°) углах конуса дают сплошной конус и без введения осевой струи. Применяя форсунки специальной конструкции, можно получить без осевой струи сплошной конус распыленной жидкости вплоть до 100°. Форсунки со сплошным конусом обычно не делают таких малых размеров, как форсунки с полым конусом, однако стандартные типы обеспечивают производительность от 3 л/мин до нескольких сотен литров в минуту.

Веерные форсунки. На внутренней части стенки, где расположено выходное отверстие, делают прорезы или каналы. Иногда самому выходному отверстию придают вытянутую форму. Благодаря этому или с помощью двух наклоненных друг к другу струй жидкость заставляют покидать форсунку, образуя плоскую струю в виде веера, которая затем распадается на капли. Типичные веерные форсунки показаны на рис. I-116. Благодаря действию поверхностного натяжения кромки пленки обычно ограничены сплошными струйками (так называемыми «рогами»), что особенно заметно при работе малых форсунок и углах распыления >50°. Эти струйки могут содержать от 0,25 до 0,5 общего количества распыляемой жидкости. Струйки распадутся на большие капли, чем центральная часть пленки. Веерные форсунки используются, когда необходимо распылять жидкость вдоль линии, т. е. при промывке, очистке, покрытии или охлаждении материала в непрерывном процессе. Угол раскрытия струи, создаваемый стандартными форсунками, составляет 10—130°, а производительность 0,4—75,0 л/мин.

Пульсационные форсунки. Пульсационная механическая форсунка показана на рис. I-117. Пока форсунка не работает, выходное отверстие прикрыто конусным клапаном, шток которого проходит через отверстие внутрь корпуса форсунки. Усилие сжатой пружины, надетой на шток клапана, удерживает коническую головку последнего на отверстии до тех пор, пока давление подаваемой в форсунку жидкости не станет достаточным, чтобы поднять клапан, открывая кольцевое отверстие. После того, как жидкость выйдет через открывшееся отверстие и ее давление упадет, пружина стремится вернуть клапан в закрытое положение, однако подпор жидкости таков, что клапан полностью не закрывается. Такое совместное действие пружины и пульсирующего давления создает состояние самопроизвольной вибрации, во время которой головка клапана удерживается на некотором малом расстоянии от отверстия таким образом, что жидкость непрерывно выходит в виде распыляющейся струи.

Пульсационную форсунку испытывали при давлении 28—140 ат. Угол распыляемой струи равен углу наклона конической части клапана при всех давлениях. Работа форсунки зависит от пружины и первоначального давления, площади кольцевого отверстия и отношения диаметра головки клапана к диаметру отверстия, оптимальные соотношения этих величин не опубликованы. Наиболее тонкие и однородные дисперсии получались при отчетливо видимой вибрации клапана.

Преимуществами вибрационных форсунок следует считать возможность получения более тонких дисперсий при данной производительности (или более высокую производительность при данном качестве дисперсии) по сравнению с обычными механическими

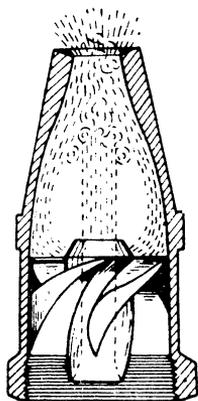


Рис. I-115. Форсунка со сплошным конусом распыла.

форсунками, а также то, что они самоочищаются в процессе работы.

ния потоков жидкости, можно добиться распыления в виде полого конуса, сплошного конуса, веера или ди-

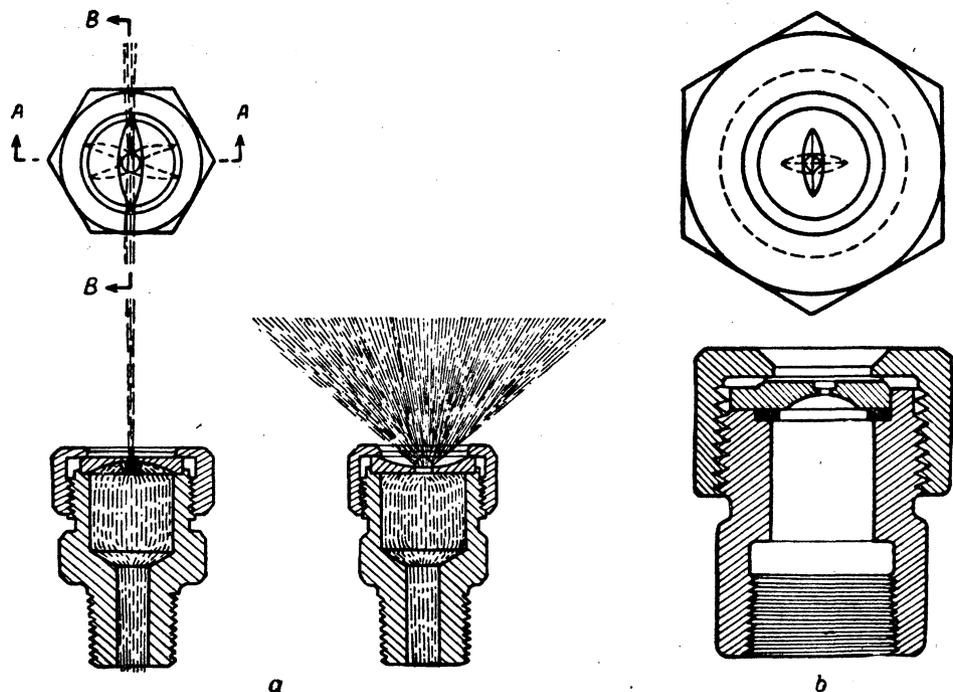


Рис. I-116. Две конструкции веерных форсунок.

Форсунки ударного действия. В некоторых специальных случаях применяются форсунки ударного типа, в

ска. При ламинарном потоке жидкости форсунки ударного типа позволяют получить меньшие капли, чем дают механические форсунки других типов. В форсунках других типов получить ламинарный поток чрезвычайно трудно ввиду наличия крупных внутренних частей. Отверстия форсунок ударного действия, наоборот, приспособлены к тому, чтобы создавать ламинарный поток. Форсунки с ламинарным потоком применяются для непрерывной работы при промывке газа и для проведения химических реакций между газом и жидкостью. Более однородный по размеру состав капель приводит к общей экономии, несмотря на высокую стоимость форсунок.

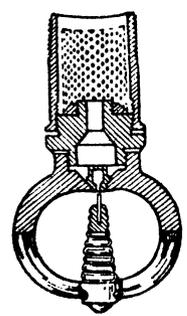
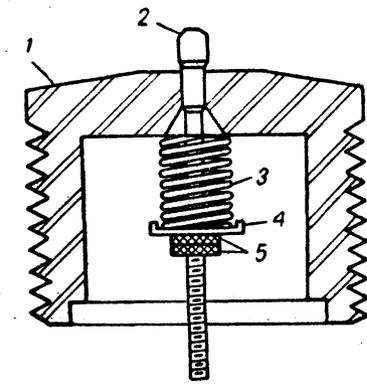


Рис. I-117. Механическая форсунка пульсационного типа [Slipcevic, Consiglio, Kurata, Ind. Eng. Chem., 42, 2353 (1950)]:

Рис. I-118. Малая форсунка ударного типа для прямого увлажнения.

1 — корпус; 2 — шток; 3 — витая пружина; 4 — шайба; 5 — гайка с накаткой.

Малая форсунка ударного типа (рис. I-118) часто используется в оборудовании для увлажнения воздуха.

Механические форсунки отличаются сравнительной простотой, небольшими размерами и невысокой стоимостью, они обычно потребляют меньше энергии, чем форсунки других типов. Они могут использоваться для работы со всеми жидкостями, которые имеют кинематическую вязкость менее $0,00066 - 0,0011 \text{ м}^2/\text{сек}$ и не содержат твердых частиц, больших проходного сечения форсунок.

Данные о производительности форсунок в зависимости от давления приведены в табл. I-11.

Конструктивные материалы. Большие форсунки обычно выполняются литыми из чугуна, бронзы и латуни, а малые — из стали, бронзы и латуни. Вообще же форсунки могут быть изготовлены из любого материала, который может обрабатываться механически, отливаться или прессоваться. Наиболее распространенными специальными материалами являются нержавеющая сталь, монель-металл, стекло и др. Если эре-

которых сплошной поток жидкости под давлением заставляют ударяться о неподвижную поверхность или о другой такой же поток. Подбирая ориентацию и форму поверхности или изменяя размеры и направле-

ТАБЛИЦА 1-11

Производительность и углы распыления механических форсунок различного типа

Тип форсунки	Диаметр выходного отверстия, мм	Производительность Q (в л/мин) и угол распыла β (в град) при различных давлениях							
		0,7 ат		1,73 ат		3,5 ат		7 ат	
		Q	β	Q	β	Q	β	Q	β
Полый конус распыла	1,2	...	...	0,38	65	0,512	68	0,634	75
	3,5	2,02	82	3,06	88	4,17	90	5,7	93
	6,5	4,73	83	7,14	85	9,68	89	13,1	92
Сплошной конус распыла	9,5	27,2	62	44,8	70	62,6	70	...	...
	1,2	...	...	0,635	65	0,689	70	1,29	70
	4,8	6,04	55	9,32	58	13,0	60	18,1	60
Веерный распыл	6,35	12,6	65	20,4	70	28,4	70	39,5	75
	12,7	66	86	105	81	147	73	...	...
	0,79	0,82	40	0,5	90	0,69	110	0,936	110
	2,33	2,64	40	4,25	75	5,95	80	8,55	80
	4,75	8,5	50	14	59	20,3	65	29,2	65
	9,5	30	66	58,4	74	81	75	110,5	75

зионная стойкость является важным требованием, могут использоваться наконечники из твердых сплавов. Форсунок из монель-металла особенно важны для работы при высоких температурах.

Мощность. Мощность, необходимая для прокачивания жидкости через механическую форсунку, подсчитывается по формуле:

$$N = 1,71 Q \Delta p \quad (I-104)$$

где N — мощность, расходуемая форсункой, кВт; Δp — перепад давлений на форсунке, н/м²; Q — расход жидкости через форсунку, м³/сек.

Общие затраты мощности включают также мощность, теряемую вследствие неэффективности нагнетателя и его привода.

Вращающиеся распылители. Основной частью вращающегося распылителя является чаша или, чаще, диск, которые приводятся во вращение со скоростью от нескольких сот до 50 000 об/мин. Распыляемая жидкость приобретает ускорение при малом давлении или даже без него. Она подается под небольшим давлением на диск, в его центральную часть, и скорость подачи может регулироваться независимо от условий работы распылителя. Диск может быть гладким, или иметь ребра по периферии, или быть полым с радиальными ребрами или каналами внутри, через которые распыляемая жидкость выходит под действием центробежной силы. Диаметр диска может быть от 50 мм до 1 м, хотя в большинстве случаев их изготавливают размером 50—300 мм. О точном механизме распада массы жидкости, движущейся по вращающемуся диску и покидающей его, можно лишь строить предположения. Фотографии показывают, что жидкость может покидать диск как в виде капель, так и в виде струй или пленки¹ в зависимости от того, с какой скоростью подается жидкость на диск при заданной скорости вращения. Практический интерес представляют стадии образования струй или пленок. По-видимому для того, чтобы получаемое распределение капель было однородным, необходимо, чтобы и пленки или

струйки жидкости, из которых образуются капли, также были бы однородными. Авторы предполагают, что последнее обеспечивается возникновением центробежных сил, значительно превышающих силы тяжести, равномерной подачей жидкости, отсутствием вибрации диска при вращении и гладкостью поверхности диска. Маршалл¹ показал, что если эти условия не соблюдаются, жидкость покидает диск неравномерно. Форма зоны распыла, образуемой вращающимся распылителем, определяется одновременно несколькими факторами. Силы гравитации и сопротивления со стороны окружающего распылителя газа стремятся разделить траектории капель в зависимости от величины последних — мелкие капли покидают зону распыла быстрее. Поток, возникающие при принудительной циркуляции газа (например, в распылительных сушилках), могут противодействовать или способствовать движению капель из зоны распыла. Кроме того, взаимодействие вращающегося диска с окружающим газом и распыленной жидкости с газом вызывает циркуляцию. В результате форма зоны распыленной жидкости не поддается математическому описанию, и необходимая форма может быть получена только на основании эксперимента.

Энергия, потребляемая вращающимся распылителем, складывается из затрат на транспортировку жидкости по диску, механических потерь в приводе и в системе подшипников, а также потерь, связанных с взаимодействием диска с окружающим его газом. Максимальная мощность, необходимая для подачи жидкости (из условия отсутствия скольжения), может быть подсчитана из выражения:

$$N = 2,5 \cdot 10^{-4} \omega n^2 \left(\frac{D^2 - d_{TP}^2}{2} \right) \quad (I-105)$$

где D — диаметр диска, м; d_{TP} — диаметр трубы, по которой жидкость подается на диск, м; n — скорость вращения диска, рад/сек; N — мощность, кВт; ω — скорость подачи жидкости, кг/сек.

¹ Hinze, Milborn, J. Appl. Mech., 17, 145 (1950).

¹ Marshall, Chem. Eng. Progr., Monograph. Ser., 50 (2), (1954).

ТАБЛИЦА I-12

**Давления механической форсунки
и скорости вращения диска, сообщающие
жидкости одинаковую скорость**

Давление жидкости в форсунке, ат	Скорость (в об/мин) для дисков диаметром		
	101,6 мм	152,4 мм	304,8 мм
0,7	1 260	840	420
7,0	4 160	2 770	1 385
28	9 300	6 200	3 100
70	13 100	8 750	4 375
351	292 000	19 580	9 790

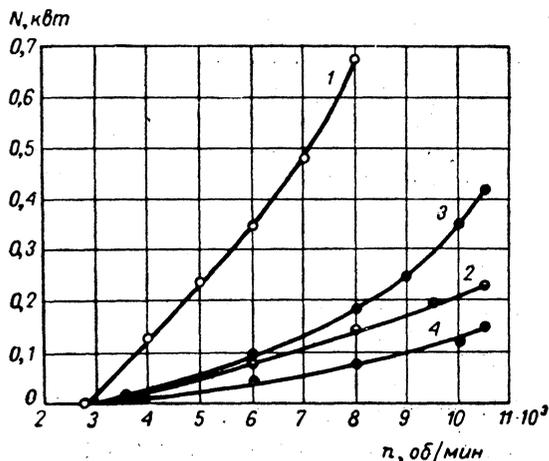


Рис. I-119. Мощность, потребляемая оребренными дисками на перемешивание воздуха:

1 — диск, $D = 178$ мм, 60 ребер длиной 25,4 мм и высотой 10,3 мм, вращается по часовой стрелке; 2 — тот же диск, вращается против часовой стрелки; 3 — диск, $D = 152$ мм; 30 ребер длиной 38 мм и высотой 25,4 мм, вращается против часовой стрелки; 4 — диск, $D = 127$ мм, 24 ребра длиной 25,4 мм и высотой 9,6 мм.

сухие диски, вращающиеся в воздухе (рис. I-119). Механические потери могут быть установлены, если известен к. п. д. привода.

Маршалл (см. выше) подсчитал скорость вращения диска распылителя и рабочее давление механической форсунки, которые сообщают одну и ту же скорость частице жидкости. Типичные результаты приведены в табл. I-12. Для сообщения струям, представляющим потоки с одинаковыми расходами, одной и той же конечной скорости дисковые и механические форсунки потребляют приблизительно одинаковые количества энергии.

Вращающиеся распылители используются для промывки воздуха в небольших установках увлажнения, в бытовых нефтяных печах. Они пригодны для работы с топливом, имеющим высокую вязкость и в первую очередь полезны для распыления суспензий и жидкостей, содержащих твердые частицы, которые забивают форсунки других типов. Вместе с тем, они широко применяются для сушки распылением.

Газораспылительные форсунки. Газораспылительные форсунки, называемые также пневматическими или двухжидкостными, разбивают струю жидкости, приводя ее в соприкосновение с высокоскоростным потоком газа или пара. Жидкость может подаваться под дав-

лением или под небольшим статическим напором, либо засасываться за счет инжектирующего действия газового потока. Наиболее употребительна подача под давлением 3,5—4,2 ат. Примером инжекционной подачи могут служить медицинские распылители (например, ингаляторы).

Жидкость и газ могут соприкасаться вне форсунки или внутри камеры, из которой распыленная жидкость выходит через отверстие. В промышленных форсунках распыление жидкости обычно происходит сразу по выходе из форсунки. Форму зоны распыла можно менять, изменяя конфигурацию выходного отверстия при смещении внутри форсунки или добавляя газовые струи для форсунок с внешним смещением.

Если m кг воздуха необходимо для распыления 1 кг жидкости в пневматической форсунке, в которой воздух изотермически расширяется от давления p_1 до p_2 , то затрачиваемая энергия равна:

$$E = mRT \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (I-106)$$

где T — абсолютная температура расширения. При отношении фаз 1 кг воздуха на 1 кг воды и $p_1/p_2 = 4$ необходимая для распыления энергия равняется $1,21 \cdot 10^6$ Дж/кг распыленной воды; при $p_1/p_2 = 1,5$ эта энергия составит $3,55 \cdot 10^4$ Дж/кг. При заданной производительности энергетические затраты в газораспылительных форсунках в несколько раз выше, чем в механических.

Газораспылительные форсунки обычно применяются, когда необходимо получить капли малого размера. Кроме того, ими можно распылять жидкости, вязкость которых не позволяет сделать это с помощью механических форсунок. Общеизвестно их использование для распыления краски, инсектицидов, для увлажнения воздуха и различных материалов, а также в нефтяных топках. За исключением последнего случая, производительность их очень мала и редко превышает 38 л/ч. Для распыления жидкости при заданном расходе газораспылительная форсунка требует значительно больше энергии, чем механическая.

Газораспылительные форсунки часто используются для прямого увлажнения в производствах, где требуется контролируемая влажность, например в текстильной и бумагоделательной промышленности. Увлажняющие форсунки распыляют от 4 до 40 л/ч и требуют для этого от 0,3 до 0,75 м³ воздуха на 1 л воды. Давление воздуха обычно равно 2 ат, а вода должна всасываться с уровня, несколько меньшего, чем уровень распылителя или подводиться под давлением 0,7—2 ат.

¹ Adler, Marshall, Chem. Eng. Progr., 47, 515, 601 (1951).

Размер капель. Механические форсунки одинаковой производительности дают подобное распределение капель по величине, если они работают при одном и том же давлении. При полом конусе распыла обычно образуются капли с более узким диапазоном размеров, чем при сплошном. Центральная часть распыленной струи, создаваемой веерной форсункой, также особенно хороша в этом отношении, но «рога» по кромкам струи распадаются на гораздо более крупные капли, вследствие чего это преимущество в значительной мере теряется. Как уже отмечалось, капли с минимальным разбросом по размеру при заданных производительности и давлении могут быть получены с помощью форсунки ударного действия. В тех случаях, когда необходим минимально возможный разброс капель по размеру, предпочтительнее использовать большое число малых форсунок, нежели несколько форсунок большой производительности. Для получения максимального числа малых капель, должны применяться форсунки наименьшего доступного размера, работающие при максимально возможном давлении.

Часто выражают размер капель, получаемых с помощью форсунки, посредством среднего или медианного диаметра — единственного числа, которым характеризуют распределение капель по величине. Если известно, что функция распределения плотная (consistent), то средний диаметр является полезным расчетным критерием. Однако, ввиду большого разброса по размерам капель, образуемых форсункой, оказывается трудным выбрать такой средний размер капель, который удовлетворял бы всем целям. Обычно предпочитают иметь более подробную информацию о распределении капель по размерам. В табл. I-13 приведено несколько типичных распределений, которые показывают влияние давления и размеров форсунки.

ТАБЛИЦА I-13

Распределение по размеру капель, полученных на трех форсунках одинаковой конструкции (с полым конусом распыла)

Номинальный диаметр капели, мм	Число капель в каждой размерной группе при диаметре отверстия форсунки					
	0,16 мм		0,218 мм		0,327 мм	
	и давлении					
	3,51 ат	7,03 ат	14,6 ат	7,03 ат	14,6 ат	14,6 ат
10	375	800	1700	100	300	100
25	200	280	580	60	150	50
50	160	180	260	41	100	45
100	50	60	70	26	34	27
150	27	31	35	14	18	15
200	19	23	27	9	12	11
300	8	9	11	5	8	6
400	2	4	4	4	7	3
500	1	1	...	2	1	2
600	1	...	...	1	...	1

Примечание. Номинальный диаметр — средний диаметр группы капель, которая включает определенный диапазон размеров. Группа «25» включает капли диаметром от 17,5 до 37,5, группа «50» — от 37,5 до 75 и т. д. Число капель подобрано в каждом случае таким, что общее количество распыленной жидкости одно и то же для каждого из распределений. Эти цифры могут служить наглядным примером работы форсунки давления. При распылении жидкости с различными физическими свойствами может быть получено одинаковое распределение, но при различных давлениях.

Для графического представления распределения капель по размерам удобно использовать уравнение:

$$F_k = e^{-bd^n} \quad (I-107)$$

где F_k — весовая часть пробы, содержащая капли диаметром больше d ; b и n — константы. Большинство распределений следует этому уравнению, которое дает прямую линию на графике с координатами $\lg d - \lg \lg 1/F_k$. Наклон этой прямой определяет ширину распределения. Часто используются также нормальное и логарифмическое распределения наряду с некоторыми другими функциями распределения. Теоретические обоснования для выбора той или иной из них практически отсутствуют, наиболее простые и удачные для конкретных случаев функции подобраны Маршаллом¹.

Часто важным фактором является общая поверхность капель на единицу распыляемого объема жидкости. Для данной конструкции форсунки поверхность раздела в m^2 на 1 л распыленной жидкости является функцией давления и расхода жидкости (рис. I-120).

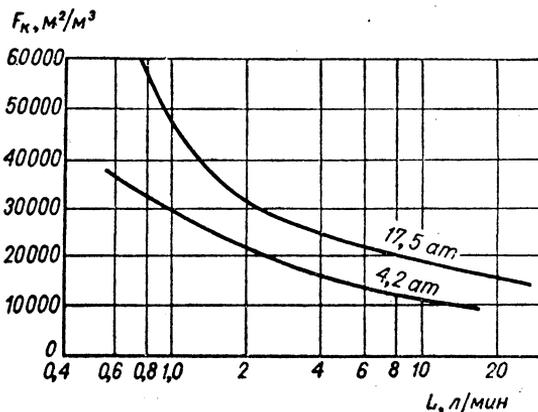


Рис. I-120. Типичные эксплуатационные характеристики правильно сконструированной форсунки. Зависимость удельной поверхности капель F_k от производительности форсунки L .

Кривые получены путем обработки относительно небольшого количества данных лишь для одного типа форсунок с полым конусом. Хотя другие типы стандартных форсунок, возможно, дадут несколько отличные результаты, данные рис. I-120 могут быть приняты в качестве примерной характеристики правильно сконструированной форсунки.

Данные по размеру капель, полученные на механических форсунках, обобщены выражением:

$$d_0 : : \sigma^a v^b (FN)^c \Delta p^d \quad (I-108)$$

где d_0 — средний объемно-поверхностный диаметр капель; FN — фактор потока, равный $Q/\sqrt{\Delta p}$; Δp — перепад давления на форсунке; Q — расход жидкости; v — кинематическая вязкость; σ — поверхностное натяжение; a, b, c, d — эмпирические константы. Например, зависимость для форсунки с полым конусом распыла, угол которого 85° , при распылении нефти, $\sigma = 24 \text{ дин/см}$,

¹ Marshall, Chem. Eng. Progr., Monograph, Ser., 50 (2), (1954).

при значениях фактора FN до 4 и давления до 14 атм имеет следующий вид:

$$d_0 = 76,8 \Delta p^{-0,46} Q^{0,21} v^{0,22} \quad (I-109)$$

где Q выражено в $кг/ч$, а v — в сантистоксах.

Распределение капель для вращающихся распылителей совершенно подобно распределению, полученному с помощью форсунок давления. Поскольку во вращающихся распылителях отсутствуют каналы малого сечения, поток сохраняется при гораздо больших вязкостях, чем для форсунок давления. Влияние вязкости, плотности и поверхностного натяжения не исследовано, и возможно, что здесь действуют несколько иные закономерности. Представляется несомненным, однако, что высокая скорость вращения, низкая вязкость и малые расходы будут способствовать получению мелких капель с минимальным диапазоном размеров.

Хэрринг и Маршалл¹ получили эмпирическое обобщенное распределение для дискового распылителя с ребрами (рис. I-121).

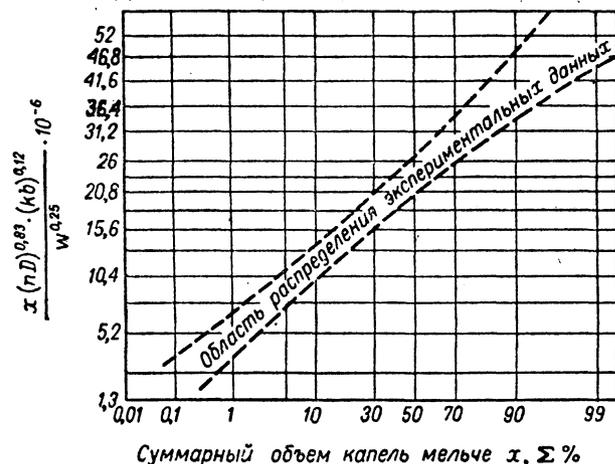


Рис. I-121. Обобщенное распределение капель по размеру для дисковых распылителей с ребрами.

Исследовались пять дисков диаметром 95, 127, 203 мм. Высота ребра $b = 8 \div 32,5$ мм; диаметр частиц x выражается в мкм; скорость вращения диска $n = 5000 \div 9800$ об/мин, число ребер на диске $k = 8 \div 24$; массовый расход $\dot{m} = 9 \div 22,5$ кг/мин.

что и в табл. I-13; таким образом, числа капель в обоих случаях могут сравниваться непосредственно, без пересчета.

Диаметр капель, мкм	Число капель	Диаметр капель, мкм	Число капель
2	390 000	35	1 730
5	340 000	40	1 080
10	165 000	45	650
15	40 000	50	430
20	11 680	60	350
25	4 970	70	220
30	2 160		

Если газа недостаточно, то образуются большие капли, которые наблюдаются визуально, так как они выбрасываются далеко за пределы зоны распыла мелких капель. Количества жидкости и газа должны быть всегда отрегулированы так, чтобы этих крупных капель не было. Когда необходимо сохранять отношение расходов газа и жидкости, размер капель может регулироваться изменением давления газа. Давление жидкости мало влияет на величину капель и по большей части определяет только количество подаваемой жидкости, которое является также функцией давления газа. Эмпирическое уравнение для среднего диаметра капель, получаемых с помощью газораспылительной форсунки¹

$$d_0 = \frac{585}{v} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_{ж}}} + 595 \left(\frac{\mu}{V \sigma \rho_{ж}} \right)^{0,45} \left(\frac{1000 Q_{ж}}{Q_{г}} \right)^{1,5} \quad (I-110)$$

справедливо, когда $\rho_{ж} = 0,7 \div 1,2$ г/см³, $\sigma = 19 \div 73$ дин/см, $\mu = 0,003 \div 0,5$ пз, а скорость газа меньше скорости звука.

В уравнении (I-110) d_0 — средний диаметр капель (в мкм) рассчитывается как диаметр капли, имеющей то же отношение объема к поверхности, что и общая сумма полученных капель; v — относительная скорость газа (по отношению к скорости жидкости), м/сек; $Q_{ж}/Q_{г}$ — отношение объемных расходов жидкости и газа. Так как отношение $Q_{ж}/Q_{г}$ обычно мало, d_0 прежде всего определяется первой частью равенства. Это означает, что d_0 почти не зависит от вязкости в пределах применимости уравнения. Уравнение неприменимо за пределами измененных параметров, для которых оно получено.

Подробное описание устройства и расчета распылительных сушилок и абсорберов приводится в главе III.

Применение распылительных устройств

Ниже перечислены и классифицированы наиболее распространенные случаи применения форсунок. Классификация впервые предложена Кеттерером. Первая цифра в скобках означает тип форсунок, наиболее часто используемых, вторая — тип форсунок, часто используемых, третья — тип форсунок, иногда используемых.

Типы распылительных устройств

1. Форсунка со сплошным конусом и большим углом распыления
2. Форсунка с полым конусом и большим углом распыления
3. Форсунки с малым углом распыления
4. Механические форсунки

¹ Herring, Marshall, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 200 (1955).

¹ Nukiyama, Tanasawa, Trans. Soc. Mech. Engrs (Japan), 5, 18, 63 (1939).

5. Тангенциальные форсунки
6. Форсунки с плоской струей распыливаемой жидкости
7. Отражательные форсунки или форсунки ударного действия
8. Пневматические, или газораспылительные, форсунки
9. Распылители с вращающимся диском

Механические форсунки

- Охлаждение циркуляционной воды для конденсаторов (5, 1, 6)
- Распыление воды в конденсаторе распылительного типа (1, 4, 3)
- Аэрирование или очистка воды (5, 1, 6)
- Очистка и промывка газов (1, 3, 9)
- Увлажнение и осушка (4, 8, 3)
- Охлаждение распылением (5, 1)
- Абсорбция и адсорбция газа (1, 3, 5)
- Сушка распылением (4, 8)
- Химические процессы, в которых требуется развитая свободная поверхность (1, 4, 8)
- Распределение нефти в камере сгорания газовых машин (1)
- Обогащение газа дистиллятом жидкости (1, 4)
- Распыление нефти в топке (4, 8, 9)
- Изменение параметров пара (4)
- Промывка жидкостей (экстракция) (1, 4)
- Промывка и покрытие материалов (4, 2, 8)
- Промывка угля, песка, гравия и т. д. (6, 3)
- Осаждение пены (1, 3, 6)
- Охлаждение рольгангов (1, 4, 6)
- Удаление окалины с горячих заготовок (3, 6)
- Охлаждение кокса и чугунных слитков (5, 1)
- Осаждение пыли (4, 1)
- Распыление инсектицидов; гербицидов и т. д. (1, 7, 8)
- Асфальтирование дорог (1, 7, 6)
- Пожарная техника (7)

Вращающиеся распылители

- Распыление вязких жидкостей и суспензий (7, 8, 9)
- Распыление нефти в топке (4, 8, 9)
- Малые увлажнители воздуха (8)
- Сушка распылением (4, 8)
- Промывка воздуха (4, 1, 9)

Газораспылительные форсунки

- Распыление красок (8)
- Распыление нефти в топке (4, 8, 9)
- Сушка распылением (4, 8)
- Увлажнение воздуха (8, 4)
- Увлажнение материалов водой или другой жидкостью (8, 4)
- Распыление малых количеств инсектицидов и т. д. (8, 4)
- Металлизация (8)
- Нанесение клеев, отражающих материалов и т. д. (8, 7)

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ГАЗА В ЖИДКОСТИ

Применение газовых дисперсий

Дисперсии газа в виде пузырьков в жидкости или в пластмассах создаются в следующих целях: 1) для приведения в контакт газа с жидкостью, что ускоряет процессы абсорбции или десорбции, сопровождающиеся химической реакцией или без нее, 2) для перемешивания жидкой фазы и 3) для получения пены или пенного продукта. Дисперсии газа в жидкости могут также образовываться непроизвольно, иногда это нежелательно.

Контактирование газа с жидкостью. Обычно для этой цели служат стандартные промышленные колонны или распылительные абсорберы (см. предыдущий раздел этой главы).

Газовые диспергаторы могут с успехом применяться для систем, содержащих твердые частицы или смолу (когда велика вероятность забивания колонн), для процессов абсорбции, сопровождающихся экзотермичными реакциями, или для процессов, в которых участвуют легко растворимый газ или конденсирующийся пар.

Перемешивание. Перемешивание потоком пузырьков газа (обычно воздуха), поднимающихся в слое жидкости, применяется в емкостях настолько больших размеров или такой несимметричной формы, что использование механического перемешивания становится невыгодным и малоэффективным. Газовые барботеры

могут заменить механические мешалки также в простых операциях смешивания жидкостей с низкой летучестью и в тех случаях, когда трудно уплотнить вал мешалки.

Получение пены. Этот процесс необыкновенно важен при флотационном разделении, в производстве ячеистых эластомеров, пластика, стекла и в некоторых других случаях (например, в производстве пищевых продуктов, для огнетушителей и т. д.). Нежелательное вспенивание может возникать при работе колонн, в сосудах со смесителями и реакторах, в которых образуется газообразный продукт; в этих случаях пена должна быть разрушена. По мнению некоторых исследователей¹, пена получается только в системах, обладающих соответствующим сочетанием поверхностно-го натяжения, вязкости, летучести и концентрации растворенного вещества и взвешенных частиц. Для того чтобы возникла пена, необходимо наличие мелких пузырьков газа в жидкости, способной образовывать пену.

Теория образования пузырьков и пены

Пузырьком называется частица газа или пара, окруженная массой или тонкой пленкой жидкости. По аналогии пузырьками называются глобулярные пустоты в твердом материале. Пена (foam) представляет собой группу пузырьков, отделенных друг от друга тонкими пленками жидкости, сохраняющуюся в течение значительного времени. Хотя нетехнические словари обычно не проводят различия между обычными пенами (foam) и вспененными жидкостями (froth), в технике это делается часто. Высококонцентрированная дисперсия пузырьков в жидкости рассматривается как вспененная жидкость, даже когда ее существование очень непродолжительно (т. е. если она динамически неустойчива). Следовательно, все пены являются вспененными жидкостями, в то время, как обратное утверждение несправедливо². Тонкие стенки пузырьков, составляющих пену, называют пленкой.

Пузырьки газа в жидкости могут образовываться 1) при выделении газа из пересыщенного раствора или при разложении вещества в жидкости; 2) непосредственно в жидкости с помощью барботера, распылителя или механической мешалки; 3) в результате дробления больших пузырьков, уже имеющихся в жидкости.

Самопроизвольное образование пузырьков газа или пара из гомогенной жидкости теоретически невозможно³. Для появления пузырьков необходимо наличие газовых центров — пустот в жидкости. Эти центры могут представлять собой мельчайшие пузырьки газа или твердое вещество, несущее адсорбированный газ (например, частицы пыли, накипи или твердая стенка). Пустоты в жидкости могут возникнуть в результате кавитации, за счет механического или акустического воздействия.

Образование пузырьков из одиночного отверстия. Образование пузырьков на выходе из одиночного отверстия или капилляра, погруженного в жидкость, было предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований⁴. Различают три режима

¹ Вегман, E. G. Loff, Emulsions and Foams, New York, 1941, pp. 112—152.

² Однако далее вместо термина «вспененная жидкость» для краткости будет употребляться термин «пена». — *Прим. ред.*

³ Вегман, E. G. Loff, Foams. Theory and Industrial Applications, New York, 1953, p. 10.

⁴ Вегман, там же, разд. 3—7.

образования пузырьков: пузырьковый, промежуточный и струйный.

Пузырьковый режим. Пузырьки в этом режиме образуются по одному, их размер $d_{\text{п}}$ определяется диаметром отверстия $d_{\text{отв}}$, поверхностным натяжением пленки газ—жидкость σ , плотностями жидкости $\rho_{\text{ж}}$ и газа $\rho_{\text{г}}$ и ускорением силы тяжести g в соответствии с уравнением:

$$d_{\text{п}} = \frac{6d_{\text{отв}}\sigma}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})} \approx \frac{6d_{\text{отв}}\sigma}{g\rho_{\text{ж}}} \quad (\text{I-111})$$

Величина пузырьков не зависит от скорости газового потока; частота их образования, следовательно, прямо пропорциональна скорости подачи газа. Уравнение (I-111) приводит к следующему выражению:

$$f = \frac{Qg(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}{\pi d_{\text{отв}}^3 \sigma} \quad (\text{I-112})$$

где f — частота образования пузырьков, а Q — объемная скорость газового потока в соответствующих единицах. Равенства (I-111) и (I-112) получены из баланса плавучести пузырька и поверхностного натяжения. Они не учитывают влияния сил инерции и вязкости. При низких скоростях образования пузырька эти уравнения вполне пригодны. Имеются сообщения¹, что диаметры пузырьков воздуха составляли от 0,84 до 1,02 от диаметров, вычисленных по уравнению (I-111), при $f=0,3 \div 1$ пузырька в секунду в воде, трансформаторном масле, эфире и четыреххлористом углероде. Диаметр отверстия изменялся в пределах 4—9,5 мм, отверстие было обращено вертикально вверх.

При пузырьковом режиме отношение между размером отверстия и величиной получаемых пузырьков зависит от свойств системы. При $d_{\text{п}} > 0,078\sqrt{\sigma/(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}$ диаметр пузырька меньше, чем диаметр отверстия, и наоборот, при $d_{\text{п}} < 0,078\sqrt{\sigma/(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}$ диаметр пузырька превышает диаметр отверстия. Подсчитано, что при образовании пузырьков в воде диаметр отверстия, совпадающий с диаметром пузырька, равняется 6,6 мм. Расчет экспериментально подтвержден² — доказано, что стабильные пузырьки в воде получают на отверстии диаметром 6,4 мм и не образуются при диаметре 7,9 мм.

Промежуточный режим. После того, как скорость прохождения газа через погруженное в жидкость отверстие превысит предел, соответствующий пузырьковому режиму, частота образования пузырьков уменьшается, а сами они начинают увеличиваться. В действительности между этими двумя режимами находится диапазон скоростей газа, в котором размер пузырьков уменьшается при увеличении скорости газа, благодаря возникновению вертикальных потоков жидкости, которые преждевременно отрывают пузырьки от отверстия. В результате такого отрыва при некоторой скорости могут получаться пузырьки минимального диаметра³.

На верхнем пределе этого режима частота становится почти постоянной по отношению к скорости газа, а величина пузырьков соответственно растет при уве-

личений скорости. Для области скоростей прохождения газа через отверстие, соответствующей $Re < 2000$, диаметр пузырька $d_{\text{п}}$ может быть приблизительно вычислен по формуле¹:

$$d_{\text{п}} = 0,91 \cdot d_{\text{отв}}^{0,5} Re^{0,33} \quad (\text{I-113})$$

причем $d_{\text{отв}} = 1 \div 10$ мм.

Эверсол и др.² обнаружили приблизительное постоянство частоты образования пузырьков в определенных условиях и экспериментально показали, что при использовании капилляров с диаметром отверстий 0,14—0,34 мм за секунду образуется 40—50 пузырьков приблизительно одинакового размера (2,3 мм).

Независимость диаметра пузырьков от диаметра отверстия подтверждается и другими исследователями.

Изучая влияние объема камеры и подводимого трубопровода между выходным отверстием и регулирующим вентилем, Хьюгес с сотрудниками³ установил, что размер пузырей зависит от объема камеры V при значении фактора объема $N_{\text{об}}$ выше критической величины (от 0,2 до 0,8). Фактор объема определяется по следующей формуле:

$$N_{\text{об}} = \frac{4gV(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}{\pi d_{\text{отв}}^2 \rho_{\text{г}} c^2} \quad (\text{I-114})$$

где c — скорость звука в газе. В уравнении (I-114) может использоваться любая система единиц. Для получения достоверных результатов в экспериментальной работе необходимо либо учитывать, либо полностью исключать влияние объема камеры. Это влияние следует также учитывать, используя результаты исследования при расчете установок большого масштаба, в которых величина V может быть очень большой, как например в колоннах с ситчатыми тарелками.

Теория, объясняющая промежуточный режим, еще не достаточно разработана: ни теоретически, ни экспериментально не выяснено влияние свойств газа и жидкости. Симс и Кауфман⁴ установили, что вязкость в значительной мере влияет на величину пузырьков и частоту их образования. Расположение и устройство отверстия, очевидно, также имеют значение — толстостенные капилляры дают большие пузырьки, чем тонкостенные, — однако количественные результаты пока отсутствуют.

Струйный режим. При дальнейшем увеличении скорости в отверстии устанавливается турбулентный режим, и поток газа по внешнему виду представляет сплошную струю, которая распадается в $70 \div 100$ мм над отверстием. В действительности поток состоит из больших, тесно друг к другу прилегающих пузырьков неправильной формы, совершающих быстрое вихревое движение. Эти пузырьки распадаются на более мелкие¹ с диаметром от 0,25 (и менее) до 12 мм. Относительно этого режима опубликовано большое число противоречивых сообщений, а теория еще не в состоянии описать наблюдаемые явления.

Образование пузырьков из нескольких отверстий. При высоких скоростях газа пузырьки, образовавшиеся в одиночных отверстиях, сливаются. Если вокруг отверстия, на расстоянии близком к его диаметру, распо-

¹ Van Krevelen, Hoffijzer, Chem. Eng. Progr., 46, 29 (1950). — Guyer, Peterhaus, Helv. Chim. Acta, 26, 1099 (1943).

² Davidson, Amick, Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 337 (1956).

³ Bikerman, Foams. Theory and Industrial Applications, New York, 1953, p. 4.

¹ Leibson et al., Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 296 (1956).

² Eversole, Wagner, Stackhouse, Ind. Eng. Chem., 33, 1459 (1941).

³ Hughes et al., Chem. Eng. Progr., 51, 557 (1955).

⁴ Siemes, Kauffman, Chem. Eng. Sci., 5, 123 (1956).

лагаются другие такие же отверстия, то вероятность коалесценции возрастает. Если это расстояние мало (как в пористой керамической пластине), коалесценция неизбежна. На рис. 1-124 (стр. 89) пунктиром показаны вероятные зоны повышенной коалесценции и сравнительно малой эффективности диспергирования при увеличении скорости прохождения газа через пористые угольные трубы.

Средний размер пузырьков, образующихся на поверхности пористой пластины, получается такой, что произведение удельной поверхности на поверхностное натяжение остается постоянным при изменении поверхностного натяжения добавленным поверхностно-активного вещества¹.

Захват газа жидкостью и его дробление. Газ может вноситься в жидкость твердыми частицами или потоком жидкости, попадающим в нее из газовой среды, за счет поверхностных неровностей, а также за счет воронки, образующейся при вихревом движении массы перемешиваемой жидкости вокруг оси вращающейся мешалки. Возможно, вблизи поверхности жидкости образуются маленькие пузырьки, увлекаемые турбулентными струйками, скорость которых превышает скорость всплытия пузырьков. Механизм захвата, однако, недостаточно ясен.

Дробление крупного газового пузыря, находящегося в жидкости, происходит благодаря турбулентному уносу более мелких пузырьков с его поверхности либо из-за влияния поверхностного натяжения, когда под действием инерционных или срезающих сил крупный пузырь распадается на сферы или цилиндры. Жидкостный цилиндр, высота которого больше длины его окружности, неустойчив и стремится самопроизвольно распасться на две или более сферы. При дроблении газа, взвешенного в жидкости, все эти явления происходят под действием сил трения со стороны жидкости и мешалки; расчету они практически не поддаются.

Пена. Пена образуется, когда пузырьки газа, всплывающие к поверхности жидкости, остаются там некоторое время, не коалесцируя и не переходя в паровую фазу. Образование пены, следовательно, заключается в формировании, подъеме и скоплении газовых пузырей в жидкости, склонной к пенообразованию.

Время существования пены может быть весьма различным — от нескольких секунд до нескольких лет.

Сила тяжести стремится отделить газ от жидкости в дисперсионной системе, принуждая пузырьки подниматься к поверхности жидкости, а жидкость, содержащуюся в стенках пузырьков, стекать вниз к основной массе жидкости. Поверхностное натяжение способствует коалесценции и исчезновению пузырьков. Все эти причины в конечном счете приводят к разрыву пленки жидкости, составляющей стенки пузырей.

Вязкость жидкости препятствует стеканию пленки и ее смещению при сближении коалесцирующих пузырьков. Чем выше вязкость, тем медленнее уменьшается толщина пленки; следовательно, если вязкость увеличивается, в то время как толщина пленки уменьшается, процесс становится самозамедляющимся. Часто вязкость пленок выше вязкости основной массы жидкости — иногда благодаря тому, что пленка имеет более низкую температуру (из-за испарения с ее поверхности), иногда сказывается влияние концентрации (растворенные или взвешенные твердые частицы перемещаются к межфазовой поверхности и обеспечивают обычное или аномальное увеличение вязкости). Однако

в большинстве случаев увеличение вязкости не находит объяснения.

Если стенки пузырей пенной системы заменить непроницаемыми твердыми мембранами, то вязкость пленки жидкости можно было бы считать бесконечной, а получающаяся в этом случае «твердая пена» существовала бы неопределенно долго. Подобным образом, если стенки пузырей заменить пластмассой Бингама или тиксотропным материалом, пена будет всегда устойчивой для пузырьков, плавучесть которых не дает возможность напряжениям повысить предел текучести. Однако для других неьютоновских жидкостей и для всех ньютоновских величина вязкости не имеет такого значения: вязкость может лишь отсрочить, но ни в коем случае не предотвратить исчезновение пены. Распространенная еще со времен Платона теория, по которой продолжительность существования пены пропорциональна поверхностной вязкости и обратно пропорциональна поверхностному натяжению, неверна. Бикерман¹ показал, что она не подтверждается экспериментом.

Бикерман отвергает также предположение о том, что пленки жидкости в пене утончаются до критической толщины, при которой разрушение пены происходит самопроизвольно. Причина стабильности пены скорее кроется в существовании поверхностного слоя с низким поверхностным натяжением, непосредственно перекрывающего слой раствора с более высоким поверхностным натяжением; последний скрыт до тех пор, пока не обнажится в результате разрушения указанного поверхностного слоя². Это явление поверхностной упругости, обусловленное разностью концентраций поверхностного и основного слоя, объясняет способность пузырьков пропускать сквозь себя твердые частицы, не разрушаясь при этом. В связи с этим можно предположить себе, что пленки, толщина которых меньше определенного значения, не содержат избыточного количества жидкости и, следовательно, не в состоянии «залечивать» повреждения поверхности, т. е. становятся уязвимыми в отношении механических повреждений. Описываемое Марагони явление согласуется с тем фактом, что ни чистые жидкости, ни насыщенные растворы не образуют пены, так как в этих случаях невозможно получить необходимую разность концентраций между поверхностным и основным слоем раствора.

Давно известна специфическая способность некоторых тонко измельченных нерастворимых твердых веществ стабилизировать пену³. Например, присутствие измельченного свинцового блеска может значительно продлить время существования воздушной пены в водном растворе изоамилового спирта, причем чем мельче частицы, тем больше стабилизирующее действие PbS (частицы размером 50 мкм продлевают время существования пены с 17 сек до нескольких часов). Такое влияние согласуется с теорией, которая утверждает, что твердые частицы со средним углом контакта с жидкостью предотвращают коалесценцию двух пузырьков, с которыми они находятся в одновременном контакте. Количественных наблюдений этого явления очень мало.

Некоторые добавки (например, малые количества мыла в растворы сапонина или глицерина в мыльные растворы) увеличивают гибкость или упругость стенок пузырьков больше, чем их вязкость.

¹ Bikerman, Foams. Theory and Industrial Applications, New York, 1953, p. 161.

² Maragoni, Nuovo cimento, № 2, 5—6, 239 (1871).

³ Berkman, Elgoff, Emulsions and Foams, New York, 1941, p. 133. — Bikerman, Foams; ch. II. — Bartsch, Colloidchem. Beih., 20, 1 (1925).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ

Свойства фаз, составляющих дисперсную систему

Как уже говорилось, дисперсии газов в жидкостях зависят от вязкости жидкости, плотности жидкости и газа, а также от поверхностного натяжения на поверхности раздела фаз. Прямое воздействие на них может оказывать и состав жидкой фазы. Эти факторы, а также гидромеханическая обстановка влияют не только на образование, но и на поведение пузырьков в течение всего времени их существования.

Вязкость и плотность составляющих дисперсию фаз, а также поверхностное натяжение между чистой жидкостью и газом, могут быть измерены с достаточной точностью. Поверхностное натяжение систем, представляющих собой раствор или мицеллярную дисперсию, определяется менее удовлетворительно, так как свободная поверхностная энергия зависит от концентрации раствора на поверхности раздела. Динамические методы и даже некоторые из так называемых статических методов предполагают создание новых поверхностей раздела фаз. Так как установление равновесия между концентрацией на этой поверхности и в основной массе жидкости требует определенного времени, в измерение поверхностного натяжения вносится погрешность, если производить его прежде, чем раствор успеет профиундировать к новой поверхности. Измерения поверхностного натяжения растворов лаурилсульфата натрия по максимальному давлению пузырьков¹ оказались на 40—90% выше замеров, проведенных с помощью тензометра, причем большее отклонение соответствовало концентрации сульфата 100, а меньшее — 2500 частей на миллион.

Даже если поверхностное натяжение измерено точно, возможность применения этой величины для определения поверхности пузырьков, быстро образующихся в растворе поверхностно-активного вещества, сомнительна, так как времени образования поверхности пузырьков может не хватить для установления равновесия с раствором. Имеется сообщение², что диаметр пузырьков, образующихся в пузырьковом режиме в растворе промышленного моющего средства, больше рассчитанного по величинам замеров поверхностного натяжения раствора [см. уравнение (I-111)]. Расхождение, возможно, объясняется тем, что в пленке жидкости, составляющей стенки пузырьков, не было достигнуто равновесие.

Обзоры методов измерений поверхностного натяжения систем газ — жидкость можно найти в литературе³.

Характеристики дисперсий

Основными характеристиками дисперсий газов в жидкостях подобно суспензиям жидкостей в газах являются гетерогенность и нестабильность.

Гетерогенность. Состав и структуру нестабильной дисперсии следует изучать в динамическом состоянии, наблюдая смесь с применением оптических средств или

без них либо фотографируя ее — предпочтительно в номинально установившемся состоянии; фотографии требуются обычно для количественной обработки. Стабильные пены можно исследовать после их получения, если они достаточно устойчивы, или применяя методы их отверждения (например, замораживанием)¹.

Скорость подъема пузырьков рассматривалась во многих обзорах². Мелкие пузырьки (<0,2 мм) можно представить как твердые сферы. Конечная скорость их подъема в воде находится в ламинарной области режимов движения, следовательно, она может быть рассчитана по закону Стокса. При увеличении пузырьков до 2 мм сохраняется сферическая форма, причем число Рейнольдса еще достаточно мало ($Re < 400$), чтобы скорость всплытия пузырьков примерно соответствовала закону Стокса.

Однако появляются два фактора, изменяющие скорость. При $Re = 100$ начинается колебание пузырьков, которое увлекает их на винтовую траекторию, если пузырьки не следуют слишком близко друг за другом³. В пузырьках величины ~ 1 мм и больше (до размера, при котором они начинают распадаться) может установиться внутренняя циркуляция, вызывающая значительное увеличение скорости подъема⁴. Присутствие ПАВ, даже в чрезвычайно малых количествах, может замедлить или остановить эту циркуляцию. Именно этим можно объяснить факт⁵ заметного уменьшения скорости всплытия пузырьков при добавлении к воде жирных кислот с длинной молекулярной цепью до концентрации $1,5 \cdot 10^{-4}$ M.

Пузырьки крупнее 2 мм приобретают форму эллипсоидов, а свыше 1 см они становятся линзовидными⁶. Скорость подъема в воде для пузырьков размером $1 < d_n < 20$ мм составляет 20—30 см/сек. При $Re > 1000$ пузырьки принимают форму колпачков плоскими дончиками⁷.

Конечная скорость движения достаточно больших пузырьков не подчиняется закону Стокса. Их поведение становится сложным и неустойчивым, а опубликованные данные имеют значительный разброс. Скорость подъема пузырьков может быть снижена за счет влияния стенок сосуда, если диаметр сосуда не превышает диаметр пузырьков более чем в 10 раз⁸.

При совместном образовании большого числа пузырьков (например, с помощью пористой перегородки) их поведение во время подъема еще более усложняется взаимодействием с соседними пузырьками. Кроме тенденции маленьких пузырьков к коалесценции, а больших — к распаду на скорость подъема любого отдельного пузырька влияют еще два противоположных эффекта. Во-первых, при массовом всплытии пузырьки могут развиваться эффект «тяги», проявляющийся в возникновении мощного вертикального течения по оси потока пузырьков, что приводит к увеличению средней скорости их подъема. Во-вторых, из-за близости пузырьков, они могут мешать друг другу всплывать, а

¹ Chang, Schoen, Grove, Ind. Eng. Chem., 48, 2035 (1956).

² Benfratello, Energia elettrica, 30, 80 (1953). — Haberman, Morton, Rept. 802, David W. Taylor Model Basin, Washington, Sept. 1953.

³ Houghton et al., Chem. Eng. Sci., 7, 40, 111 (1957).

⁴ Garner, Hammerton, Chem. Eng. Sci., 3, 1 (1954). — Haberman, Morton, Rept. 802, David W. Taylor Model Basin, Washington, Sept. 1953.

⁵ Stuke, Naturwiss., 39, 325 (1952).

⁶ Davies, Taylor, Proc. Roy. Soc. (London), A 200, 379 (1950).

⁷ Eckenfelder, Barnhart, там же. — Leibson et al., Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 296 (1956).

⁸ Uno, Kintner, Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 420 (1956).

¹ Eckenfelder, Barnhart, Am. Inst. Chem. Engrs, 42 National Meeting, Reprint 30, Atlanta, 1960.

² Соррок, Meiklejohn, Trans. Inst. Chem. Engrs (London), 29, 75 (1951).

³ Weisberger, Techniques of Organic Chemistry, 2ed., vol. I, part. II, ch. 9, New York, 1949. — Schwartz et al., Surface Active Agents and Detergents, vol. II, New York, 1958, pp. 389—391, 417—418.

ТАБЛИЦА 1-14

Средняя плотность аэрированных жидкостей¹

Скорость в свободном сечении колонки, м ³ /(м ² · сек)	Средняя плотность слоя, г/см ³					
	пресная вода	морская вода	раствор глицерина ²		уксусная кислота	этил ацетат
			8%	68%		
0	1,00	1,00	1,02	1,18	1,05	0,90
0,0305	0,85	0,65	0,80	0,42	0,58	0,71
0,0457	0,83	0,50	0,70	0,39	0,50	0,65
0,0610	0,83	0,43	0,66	0,59	0,55	0,63
0,0915	0,83	0,57	0,70	0,74	0,55	0,64
0,1220	0,83	0,64	0,70	...	0,55	
0,1525	—	0,65	0,70	...	0,55	

¹ Houghton et al., Chem. Eng. Sci., 7, 40 (1957).
² Замерено на пластине с большими порами (144 мкм). Плотность, по-видимому, несколько ниже значений, которые были бы получены на пластине с порами 81 мкм.

Стабильность дисперсии. Стабильности дисперсий, не образующих пены, не существует даже в квазистатическом смысле, и они могут описываться только сопоставлением скорости разделения фаз и скорости образования двухфазной системы.

Стабильность пены определяется двумя характеристиками — продолжительностью существования и скоростью стекания жидкости с пены. Хотя и ту и другую называют такими терминами как «качество пены» (foam capacity) и «пенящая способность» (foaming power), Бикерман¹ указал, что эти характеристики устанавливают величины, которые различны и в основном независимы. Он же дал полное описание методов измерения обеих величин.

Продолжительность существования пены может быть вычислена на основании измерения продолжительности существования отдельной пленки (например, на петле), отдельного пузырька (например, плавающего на поверхности жидкости) или на основании наблюдения за трехмерной пеной. Последний метод наиболее распространен. Время существования пены описывается или скоростью разрушения (предпочтительнее чем скоростью стекания) неподвижного образца, или скоростью роста высоты пены в процессе ее образования, или установившейся высотой, достигаемой пеной при конкретных условиях ее образования.

Для измерения стекания пены, полученную барботированием или перемешиванием, оставляют в покое и наблюдают, сколько жидкости собирается под пеной с течением времени. Но этот метод не может использоваться для короткоживущих пен (необходима по крайней мере 1 мин) и не позволяет отличать жидкость, стекающую из слоев пены, от освобождающейся при разрушении этих слоев. Величины, получаемые при измерении стекания, зависят от используемых методов и приборов.

Другие характеристики пен. Способность стенок пузырьков отражать интерферирующие лучи позволяет определять толщину стенки, используя монохроматический или белый свет². Интенсивность света, пропускаемого через массу пены, может использоваться как показатель среднего размера пузырьков или ячеек, а также числа ячеек³.

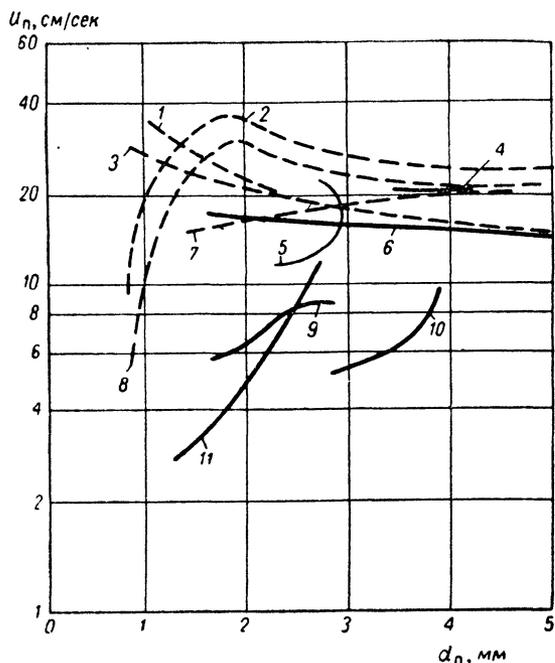


Рис. 1-122. Скорость подъема U_p одиночных пузырьков воздуха и групп в зависимости от диаметра пузырька d_n в различных жидкостях:

----- одиночные пузырьки; ————— группы;
 1 — этилацетат; 2 — вода, спиральное движение пузырьков;
 3 и 10 — уксусная кислота; 4 — вода; 5 — этилацетат; 6 — водный раствор глицерина (7%); 7 — морская вода, прямолинейное движение; 8 — морская вода, спиральное движение;
 9 — морская вода; 11 — раствор глицерина, 68%.

пластины из стекла со средним размером пор 81 мкм. Массовое всплытие пузырьков приводит к расширению слоя жидкости в колонке (табл. 1-14). Разница в кривых для чистой и морской воды еще раз иллюстрирует значение даже малых концентраций растворенного вещества для поведения пузырьков.

Образование пузырьков из одиночного источника часто происходит с достаточно регулярной периодичностью, что позволяет «остановить» процесс стробоскопическим освещением. Оценка скопления поднимающихся пузырьков — более трудная задача, требующая тщательно разработанных методик. Разработаны и описаны удовлетворительные фотографические методы¹. Последний дает практически точные измерения, позволяющие получать хорошие результаты по величине межфазовой поверхности пузырьков, диспергированных в жидкости.

¹ Vermeulen, Williams, Langlois, Chem. Eng. Progr., 51, 85 (1955). — Calderbank, Trans. Inst. Chem. Engrs, 36, 443 (1958).

² Bickerman, Foams, гл. 2 и 4.

³ Bickerman, там же, гл. 6.

³ Clark, Blakman, Trans. Faraday Soc., 44, 7 (1948).

Плотность пены может быть определена из сравнения электропроводности пены и образующей ее жидкости.

МЕТОДЫ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ГАЗОВ

В целом проблема диспергирования газа в жидкости может быть разрешена двумя путями: либо газ вводится в жидкость в виде пузырьков необходимой величины или в виде меньших пузырьков, которые затем вырастают до желаемого размера, либо массивный пузырь или поток газа разбивается в жидкости.

Распределители газа

Простые барботеры. Простейшим способом диспергирования газа в жидкости, заключенной в сосуд, является ввод газа через открытый патрубков, горизонтальную перфорированную трубу или перфорированную пластину в дне сосуда. При обычных скоростях газа (соответствующих струйному режиму) независимо от размера отверстий будут получаться относительно большие пузыри газа.

Распределители из перфорированных труб или пластин обычно имеют отверстия с диаметром 3—12,5 мм. Распределитель с перфорированной трубой должен быть сконструирован таким образом, чтобы сопротивление отдельного отверстия превышало сопротивление трубы, так как в противном случае отверстия, наиболее удаленные от источника газа, могут не работать.

Простые распределители используются в качестве перемешивающих устройств в больших емкостях, в основном в цементной и нефтяной промышленности. Ниже приводятся данные о скорости воздуха для достижения различной степени перемешивания в емкости (высота слоя жидкости 2,75 м)¹:

	Скорость воздуха, м ³ /(мин·м ² поперечного сечения емкости)
Умеренное перемешивание	0,183
Полное перемешивание . .	0,39
Очень сильное перемешивание	0,91

Для слоя жидкости высотой 0,92 м указанные скорости рекомендуются удвоить.

Для перемешивания тяжелой грубой суспензии, уровень которой может меняться в широких пределах, рекомендуется эрлифтная система², состоящая из барботера, помещенного в циркуляционную трубу с разгрузочными окнами на различных уровнях (рис. I-123).

Эффективность действия барботеров при перемешивании смесивающихся жидкостей может быть выражена кажущимся коэффициентом диффузии. Приняв этот метод, Симс³ получил, что перемешивание потоком пузырьков, поднимающихся по трубе со скоростью (отнесенной к поперечному сечению трубы) 0,082 м/сек, соответствует кажущемуся коэффициенту диффузии 75 см²/сек. Следовательно, скорость перемешивания в данном случае на несколько порядков превышает скорость естественной диффузии. По данным Глинкова⁴,

турбулентность, создаваемая пузырьками, образующимися в слое жидкости, может быть охарактеризована безразмерным комплексом G , который получен из критериев Рейнольдса и Фруда (рассчитанных по диаметру пузырька и скорости его подъема) и комплекса $\rho_r Q / \rho_{ж} S U_{п}$ (где Q — расход газа, м³/сек; S — поперечное сечение слоя жидкости, перпендикулярного направлению подъема пузырьков, м²; $U_{п}$ — скорость подъема

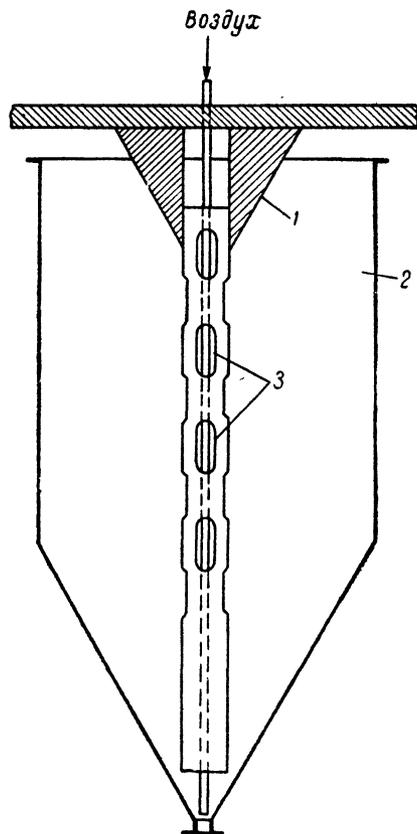


Рис. I-123. Эрлифт с окнами для перемешивания при переменном уровне жидкости:

1 — четыре косынки, жестко крепящие циркуляционную трубу; 2 — корпус; 3 — окна.

пузырьков, м/сек; $\rho_{ж}$ и ρ_r — плотность чистой жидкости и газа соответственно, кг/м³). Глинков обобщил данные по «кипению» шлаковых загрузок промышленных размеров в виде зависимости $\frac{1}{Pr} - G$.

Патрубки с открытыми концами или перфорированные пластины используются иногда без механического перемешивания для ускорения процесса массообмена, например, в хлораторах. Очевидно, что большая часть процесса массопередачи проходит в момент образования новой поверхности. Большая часть процесса абсорбции двуокси углерода из одиночных пузырей проходит при образовании, отрыве и во время подъема

¹ Kauffman, Chem. a. Met. Eng., 37, 178—180 (1930).

² Heiser, Chem. Eng., 55 (1), 135 (1948).

³ Simms, Chem. Ing. Tech., 29, 727 (1957).

⁴ Глинков, ДАН СССР, 51 (2), 99 (1946).

пузыря¹ на 10 см; такой же эффект наблюдался при разрушении пузырьков².

Установлено³, что при барботировании воздуха через трубку диаметром 6,3 мм со скоростью 0,015 м³/мин в слой водного раствора сульфата натрия высотой 24 см поглощалось менее 1% кислорода, в то время как при интенсивном перемешивании поглощение достигало 42%. Для перфорированной пластины⁴ с увеличением скорости газа поверхность раздела фаз возрастает почти линейно вплоть до достижения удельной поверхности 26,2 м²/м³. Дальнейшее повышение скорости газа не приводит к увеличению удельной поверхности.

Ситчатые тарелки могут рассматриваться как специальные случаи распределителей с перфорированными пластинами.

Пористые перегородки. Пористые пластины, диски, трубы, а также перегородки другой формы изготов-

Пористые перегородки изготавливаются также из фарфора, стекла, карбида кремния и ряда металлов (монель, инконель, бронза, хастеллой, стеллит L-605, золото, платина и нержавеющая сталь многих марок). Воздухопроницаемость пористых перегородок свидетельствует об относительно невысоком сопротивлении этих материалов гомогенным жидкостям, однако сопротивление смоченных перегородок потоку газа возрастает.

Воздухопроницаемость пористых угольных перегородок, погруженных в воду, показана на рис. 1-124. Сравнимые данные по воздухопроницаемости пластин пористого алуида двух сортов приведены в табл. 1-15. Пользуясь данными рис. 1-124 или табл. 1-15 при расчетах, к перепаду давлений, найденному в таблице или на графике, нужно прибавлять гидростатическое давление на барботер.

ТАБЛИЦА 1-15
Проницаемость влажных пористых алуидовых пластин толщиной 25,4 мм

Воздухопроницаемость сухой пластины при $\Delta p = 49$ мм вод. ст., м ³ /(м ² · сек)	Разность давлений на влажной пластине, мм вод. ст.	Объемная скорость во духа через влажную пластину, м ³ /(м ² · сек)
0,022	525	0,010
	553	0,015
	581	0,020
	607	0,025
	679	0,035
0,279	102	0,005
	106	0,010
	107	0,015
	108	0,020
	109	0,025

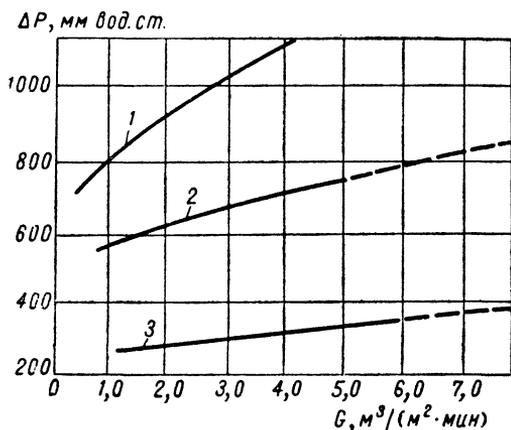


Рис. 1-124. Зависимость сопротивления Δp пористых угольных перегородок толщиной 1,58 см, погруженных в воду при 21° С, от скорости воздуха G при нормальных условиях.

На оси ординат отложены потери давления Δp за вычетом статического столба жидкости над диспергатором. Участки кривых, показанные сплошной линией, представляют рекомендуемые рабочие диапазоны; 1 — сорт 60; 2 — сорт 45; 3 — сорт 25.

ляются путем соединения или спекания тщательно подобранных по величине частиц угля, керамики, пластмассы или металла. Такая перегородка может быть использована в качестве газораспределительного устройства для получения пузырьков, значительно меньших, чем те, которые образует простой барботер. Нижний предел скорости истечения потока газа через перегородку определяется требованием, чтобы по всей поверхности пластины происходило более или менее равномерное барботирование, а верхний — началом заметной коалесценции, приводящей к слабому диспергированию. В практическом диапазоне скоростей истечения размер получаемых пузырьков прямо пропорционален как размеру пор в перегородке, так и перепаду давления на ней.

Скорость газа, при которой коалесценция начинает уменьшать эффективность диспергирования, по-видимому, зависит не только от размера пор и структуры диспергирующей среды, но и от свойств жидкости, высоты слоя жидкости, перемешивания и т. п. Предполагается, что для пористого угля наилучшее распыление может быть достигнуто, если избежать диапазонов, показанных на рис. 1-124 пунктиром. Для распылителей из микропористой нержавеющей стали, в которой поры мельче, чем в угле, чтобы избежать заметной коалесценции пузырьков рекомендуется придерживаться рабочего предела 0,04 м³/(м² · сек).

Пластини пористого материала, склеенные или сваренные вместе, образуют диафрагму, обычно горизонтальную. На трубах при достаточно высоких скоростях, когда начинается барботирование с поверхности, обращенной вниз, часто наблюдается коалесценция, но зато их легко демонтировать для очистки или замены. Роу¹ утверждает, что трубы из карбида кремния предпочтительнее горизонтальных пластин того же материала, так как циркулирующая между трубами жидкость очищает их. Он сообщает, что максимальная производительность для горизонтальной трубы и горизонтальной пластины из этого материала составляет соответственно 0,025 и 0,015 м³/(м² · сек).

Установка плоского пористого распылителя в вертикальном положении значительно снижает эффективность распылителя по трем причинам: 1) газ барботирует через меньшее поперечное сечение; 2) при нормальных скоростях нижняя часть барботера может

¹ Guyer, Pfister, Helv. Chim. Acta, 29, 1173 (1946).

² Scouller, Watson, Inst. Sewage Purif. J. Proc. part 1, 1934.

³ Cooper, Fernstrom, Miller, Ind. Eng. Chem., 36, 504 (1944).

⁴ Calderbank, Trans. Inst. Chem. Engrs, 37, 173 (1959).

¹ Roe, Sewage Works J., 18, 878 (1945).

не работать из-за разности давлений, обусловленной гидростатическим столбом жидкости; 3) имеется заметная тенденция пузырьков к коалесценции вдоль плоскости распределителя. Значение коэффициента скорости окисления раствора сульфита, определенного с помощью прямоугольной пластины пористого угля размером $28,57 \times 101,6$ мм, на 26—41% ниже в случае вертикального положения пластины по сравнению с горизонтальным. Наибольшее уменьшение наблюдалось, когда вертикальное положение занимала большая сторона пластины¹.

Пористые распределители используются в основном для ускорения абсорбции газа, особенно при аэрации сточных и промышленных вод. Разработаны технические условия², определяющие скорость абсорбции кислорода из воздуха, если воздух барботируется через пористую аэрационную пластину со скоростью $\sim 0,00965 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ в слой водного раствора сульфита натрия, высотой 915 мм, находящийся в сосуде. Для пластины из кремния и окиси алюминия получена скорость абсорбции порядка 34—62 частей на миллион частей в час [эквивалентно коэффициентам $48 \cdot 10^{-4}$ — $96 \cdot 10^{-4} \text{ кмоль}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{атм})$]. Скорость линейно уменьшалась с увеличением проницаемости пластины. При пропускании через угольные трубы и пластины воздуха со скоростью $0,012 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ получаемые значения сульфитного числа приблизительно обратно пропорциональны номинальному диаметру пор перегородки. Однако при скорости $0,06 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ эта зависимость не прослеживается, что, по-видимому, указывает на коалесценцию на поверхности мелкопористой перегородки. Это подтверждается наблюдениями Хоугтона и др.³, которые отмечают сравнительно малое влияние размера пор на скорость абсорбции двуокиси углерода в воде при скоростях газа от 0,06 до $0,086 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ и для пор величиной от 72 мкм до 1,15 мм.

Представляет интерес сравнение пористых перегородок и других типов распылителей. Чейн и др.⁴ утверждают, что при окислении сульфита натрия кислородом воздуха пористые диски почти вдвое эффективнее, чем открытая труба или кольцевой распылитель. Установлено также, что при абсорбции двуокиси углерода из 9%-ной смеси ее с воздухом путем диспергирования смеси в слой 3 н. диэтанолamina высотой 300 мм труба из пористого углерода сорта 20 при скорости газовой смеси $0,042 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ давала коэффициент $53 \text{ кмоль}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{атм})$, в то время как трубка диаметром 9,5 мм с открытым концом обеспечивала лишь $11,2 \text{ кмоль}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{атм})$. Экенфельдер⁵ предложил сравнивать диспергаторы аэрационных емкостей, предназначенных для обработки сточных вод, с помощью кислородного абсорбционного числа $N = K_{жа} a V / G_{возд}^{1-n} h^{1-m}$ (где $K_{жа}$ — общий коэффициент абсорбции кислорода; V — объем абсорбента; $G_{возд}$ — скорость воздушного потока; h — высота слоя абсорбента; m и n — эмпирические константы). При абсорбции двуокиси углерода в воде в противоточных колоннах без насадки, куда газ подавался снизу через пористую перегородку, наблюдалось противоточное контактирование или идеальное перемешивание в зависимости от зоны в

колонне и скорости¹. На рис. 1-125 и 1-126 эти результаты сравниваются с данными, полученными ранее для колонн с насадкой.

Скорость абсорбции в аппаратах с распределителями газа в 3—10 раз больше, чем в насадочных колоннах. Гидравлическое сопротивление при этом также больше. При использовании распределителя из пори-

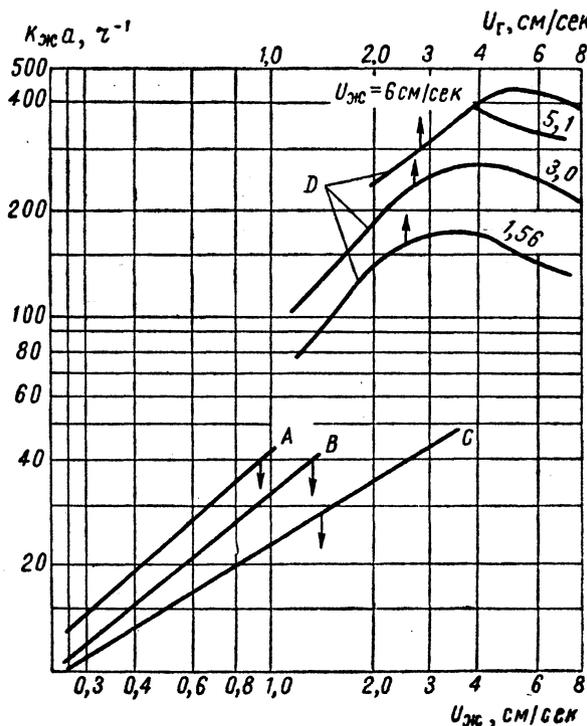


Рис. 1-125. Сравнение коэффициентов массопередачи при абсорбции двуокиси углерода в барботажных и насадочных колоннах:

$U_{ж}$ и $U_{г}$ — скорости жидкости и газа, отнесенные к полному сечению аппарата, м/сек; А — насадка из стеклянных шаров диаметром 18,5 мм [Simmons, Osborn, Ind. Eng. Chem., 26, 529 (1934)]; В — насадка из кускового кокса 25 мм [Adams, Edmonds, Ind. Eng. Chem., 29, 447 (1937)]; С — насадка из мелких стеклянных колец [Contello et al., Ind. Eng. Chem., 19 989 (1927)]; D — барботажная колонна, высота слоя жидкости 0,46 м, давление 5,1 атм, 15° C [Houghton et al., Chem. Eng. Sci., 7, 26, 33 (1957)].

стого стекла (размер пор не определен) для абсорбции двуокиси азота водой из 10%-ной смеси ее с воздухом достигалась степень поглощения 90%. Абсорбция в слое воды высотой 180 мм составляла 90% от абсорбции в слое высотой 700 мм. Это означает, что эффективность работы пористых распределителей объясняется главным образом активизацией процесса массопередачи во время образования и отрыва пузырьков. Коэффициенты извлечения намного превосходили коэффициенты, которые получаются при проведении того же процесса на барботажных колпачковых колоннах².

¹ Bone, M. S. Thesis in Chemical Engineering, Univ. Kansas, 1948.

² King, Sewage and Ind. Waster, 54, 826 (1952).

³ Houghton, McLean, Ritchie, Chem. Eng. Sci., 7, 26 (1957).

⁴ First International Symposium Chemical Microbiology, Monograph Series 10, Geneva, 1952.

⁵ Eckenfelder, Sewage and Ind. Wastes, 31, 60 (1959).

¹ Schulman, Molstad, Ind. Eng. Chem., 42, 1058 (1950).

² Andersen, Johnstone, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 135 (1955).

Влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ) на работу пористой перегородки недостаточно ясно. Экенфельдер (см. выше) отмечает неопределенность влияния ПАВ: в малых концентрациях они обычно снижают коэффициенты абсорбции кислорода в воде, в то время как вещества, разрушающие или подавляющие пену, могут иногда уменьшать (до 50%), а иногда увеличивать (до 164%) коэффициенты по сравнению с полученными на чистой воде.

при обработке сточных вод и других окисляемых органических отбросных жидкостей. Кинг¹ дал исчерпывающий обзор важнейших проблем расчета и конструирования, связанных с использованием пористых пластинчатых распылителей в аэрационных емкостях со спиральным движением потока. Описано также использование пористых пластин для обогащения O_2 содержащих недостаточное количество кислорода вод реки, в которую производится сброс сточных вод сульфитного производства². Пористые перегородки могут также использоваться для интенсификации флокуляции мелкоизмельченных твердых материалов в осадительных бассейнах. Они устанавливаются также вместо распылительных форсунок или эрлифтов в аэрационных очистителях «Эймко».

В одном из типов установок для пенной флотации воздух распределяется через пористую диафрагму (обычно, холст или перфорированный лист резины) со скоростью $0,035-0,076 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ площади диафрагмы} \cdot \text{сек})$. Сопrotивление диафрагмы из трехслойного холста колеблется в пределах $0,105-0,28 \text{ кг/см}^2$ в зависимости от степени забивания. Листовая резина толщиной 2—4 мм имела перфорацию 31 отв/см^2 при диаметре отверстий 1,0—1,35 мм. Сопrotивление такой диафрагмы составляет $0,25-0,5$ сопrotивления диафрагмы из холста, причем забивается она не так быстро.

Методы выделения и образования газа в жидкости

Выделение. Выделение газа из пересыщенного раствора обычно приводит к образованию тонкой дисперсии пузырьков в жидкости. Оно находит очень широкое применение при изготовлении пористой резины³. Невулканизированный каучук (натуральный или синтетический) нагревается и насыщается инертным газом при давлении $\sim 320 \text{ ат}$. Перед вулканизацией давление снижается, что приводит к выделению растворенного в каучуке газа и расширению массы. Если до снятия давления провести частичную вулканизацию, получается пористая резина с закрытыми ячейками. Тейлор⁴ применил этот метод для изготовления пористых термопластичных материалов, используя летучий растворитель при 210°C и 218 ат .

На принципе выделения газа основаны два типа аппаратов пенной флотации. В одном (камера Клеменса) предварительно аэрированная суспензия вспенивается под воздействием вакуума. В другом (камера Джуэлла) суспензия насыщается воздухом при давлении выше атмосферного, а затем вспучивает в камере, работающей при атмосферном давлении. Но обе эти камеры широкого применения в горнорудной промышленности не нашли.

Принцип действия комбинированного флотационного и осадительного аппарата — флотатора «Эймко», используемого в промышленных процессах, особенно для предварительной обработки и регенерации сбросных вод (рис. 1-127), — насыщение под давлением с последующим вскипанием и выделением пузырьков. Аппарат представляет собой цилиндрическую емкость диаметром от 1,8 до 12 м с осадителем и гребковым механизмом, установленным на балках, перекрываю-

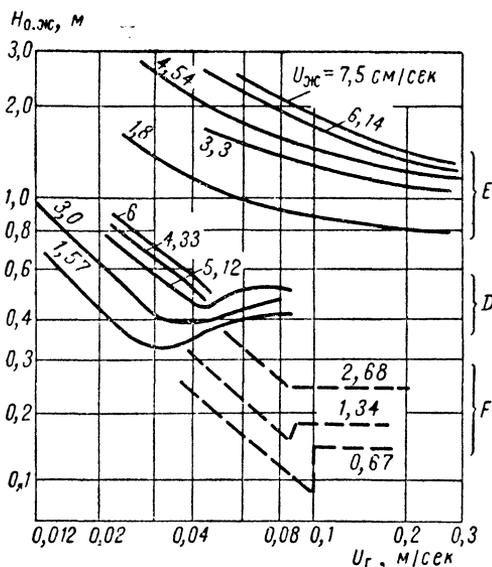


Рис. 1-126. Зависимость высоты единицы переноса $H_{0,ж}$ от скорости газа U_g при абсорбции двуокиси углерода водой в насадочных и барботажных колоннах:

D — барботажная колонна (см. D на рис. 1-125); E — насадка из стальных колец 50 мм [Cooper, Christl, Perry, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs., 37, 979 (1941)]; F — барботажная колонна, высота слоя жидкости 0,305 м, давление 1 атм, 15°C [Schulman, Molsstad, Ind. Eng. Chem., 42, 1038 (1950); Chem. Eng. Sci., 7, 33 (1957)].

Главный недостаток пористых распылителей — склонность к забиванию. Кроме очевидных случаев, когда твердые частички вносятся в поры перегородки газом или задерживаются на наружной поверхности распылителя, забивание может происходить и в случае химической реакции или кристаллизации растворенного вещества из абсорбента внутри пор материала перегородки. Возможно, плохая воспроизводимость лабораторных данных по окислению сульфита на пористых перегородках, по крайней мере частично, вызывается засорением перегородки, причем характер этого явления неясен¹. Распылители из пористого угля, барботирующие смесь воздуха с двуокисью углерода в водный раствор соды, забиваются быстро и необратимо. Забивание вызывается бикарбонатом натрия, даже если концентрация этой соли в абсорбенте значительно ниже насыщения.

Пористые перегородки широко используются при аэрации активированных осадочных масс, применяемых

¹ Allen, M. S. Thesis in Chemical Engineering, Univ. of Kansas, 1956.

¹ King, Sewage a. Ind. Wastes, 27, 894, 1007, 1123 (1955).

² Wiley et al. Paper Trade J., 124 (12), 59 (1947).

³ Gould, Rubber Age, 54, 526; 55, 65 (1944).

⁴ Taylor, US Pat. 2372695.

ших емкостях. Исходная смесь насыщается воздухом при повышенном давлении, обычно при $\sim 2,0$ ат (избыточных). После прохождения через обратный клапан поток смеси вводится в аппарат ниже уровня жидкости, где из него выделяется масса мелких пузырьков, выносящих частицы извлекаемого вещества наверх, откуда они могут направляться в пеноотводной желоб. Тяжелые частицы пустой породы осаждаются, как в обыкновенном осадительном аппарате. Метод ввода потока смеси имеет большое значение для успешной работы флотатора и потому должен определяться в зависимости от решения конкретной задачи. Примерами применения таких аппаратов может служить осаждение шлама, отделение жира от сбросных

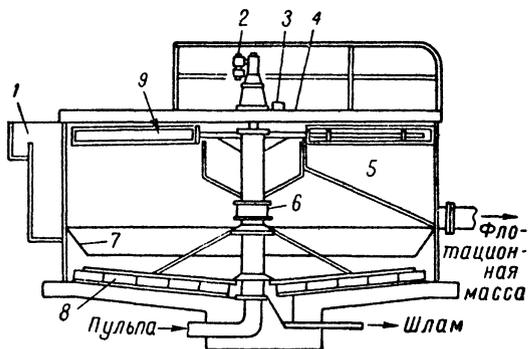


Рис. I-127. Комбинированная установка для флотации и сгущения суспензий:

1 — разгрузочная камера; 2 — привод-вариатор; 3 — устройство, ограничивающее предельный передаваемый скручивающий момент; 4 — опорная рама привода; 5 — флотационная камера; 6 — входной распределитель; 7 — перегородка; 8 — скребковая мешалка; 9 — пеногон.

вод мясной промышленности, отделение нефти от сбросных вод нефтеочистных заводов и отделение волокон в целлюлозной и бумажной промышленности.

Образование газовых дисперсий. Мелкие, хорошо растворенные пузырьки образуются при разложении растворенного или диспергированного в жидкости вещества с образованием газа.

Эти методы используются для приготовления пористых эластомеров и термопластов, для которых пористые продукты при разложении не приносят вреда. Используется большое число порообразующих веществ, из которых наиболее распространены бикарбонаты натрия и аммония, нитрат аммония, карбонат кальция, диазопроизводные и диазоцианаты. Предложен в качестве порообразующего агента насыщенный газом активированный уголь¹. В процессе Теллеи для получения пористой резины источником газа служит перекип водорода, разлагающаяся с выделением кислорода под действием дрожжевого катализатора². В любом случае порообразующий материал подмешивается в латекс до коагуляции или в эластомерную массу до вулканизации, причем материал должен быть равномерно распределен по всей пластической массе прежде, чем произойдет выделение газа.

Системы, использующие трение жидкости. Насадки и трубчатые диспергаторы. Для диспергирования газа в жидкости используется иногда турбулентность, воз-

никающая при больших скоростях течения жидкости через насадки или трубы. С помощью паро-водяных смесителей типа трубы Вентури могут быть получены дисперсии очень высокого качества (только для дисперсий газа в воде отношение газ — жидкость сравнительно невелико). В одной из конструкций насадки для снижения вибраций и шума, возникающего при конденсации пузырьков пара в воде, диспергируются одновременно воздух и пар.

Трубчатые диспергаторы для получения газо-жидко-стных смесей обычно имеют отверстия или перероготки для периодического перераспределения газа. Описан трубчатый диспергатор со специальными короткими сужениями¹ такого поперечного сечения, что скорость жидкости при их прохождении превышает $0,914$ м/сек. Телл² рекомендует отверстия переменного сечения для непрерывного диспергирования малых количеств газа в углеводородах.

Погружные трубчатые диспергаторы для воздуха и сточных вод были разработаны Норделем³. Первоначальное диспергирование достигалось созданием вихревого движения жидкости вокруг трубы, в которую воздух поступает в виде маленьких пузырьков.

Насадки и поточные смесители могут использоваться для контактирования газа и жидкости лишь в тех случаях, когда возможно прямоточное движение фаз.

Каскадные системы. Поток жидкости, падающий через газ в резервуар, будет при соответствующих условиях захватывать газ в объеме, приблизительно равном собственному объему, и диспергировать его в резервуаре. Этот принцип сначала использовался в машинах пенной флотации каскадного типа.

Купер⁴ описал гравитационную каскадную систему, предназначенную для промывки газа падающим потоком жидкости. Сообщается, что раствор, содержащий соединение железа, при истечении из насадки вертикально вниз со скоростью $12,2$ м/сек через воздух в сосуд, расположенный на $7,6$ см ниже насадки, обогащается воздухом в количестве, достаточном для быстрого окисления солей железа⁵.

Аппараты с механическим перемешиванием. Механические перемешивающие устройства (обычно вращающиеся мешалки: турбинные, лопастные, пропеллерные) создают наиболее разнообразные и, как правило, наиболее эффективные из известных дисперсий газа. Предпочтительнее всего турбина со сплошной ступицей, хотя использовать именно ее не всегда обязательно. Для получения более качественных дисперсий и повышения производительности процесса в аппарате должны устанавливаться перегородки или другие неподвижные детали, которые сводят к минимуму вращательное движение жидкости и позволяют увеличить ввод энергии в смеситель, а также повысить скорость сдвига слоев жидкости.

Наиболее удобными критериями, характеризующими работу смесителей, используемых в качестве газо-жидко-стных контактных аппаратов, являются достигаемая скорость абсорбции, эффективность абсорбции и развиваемая поверхность фаз. Для смесителей, используемых в качестве пенообразователей, такими критериями являются количество и качество получаемой пены. Для получения удовлетворительных характеристик в обоих случаях необходимо определять скорость вращения мешалки, ее мощность на валу, конструкцию мешалки

¹ Pffirrmann, German Patent 740674.

² Tell, Chem. a. Met. Eng., 52 (6), 115 (1945).

³ Nordell, US Pat. 2374772.

⁴ Cooper, US Pat. 2398345.

⁵ Mertes, US Pat. 2128311.

¹ Colin-Russ, Chem. Trade J., 115, 631 (1944).

² Winspear, в кн. Morton «Introduction to Rubber Technology», ch. 18, New York, 1959.

и сосуда, так же как и конструкцию привода, обеспечивающего надежную и экономически выгодную работу.

Общей основой конструирования газо-жидкостных диспергаторов является моделирование с последующей экстраполяцией полученных на модели результатов до размеров промышленного аппарата. Купер и др.¹ исследовали абсорбцию кислорода из воздуха водным раствором сульфита натрия в сосуде с перегородками при перемешивании лопастными мешалками и оребренными дисками. Результаты показали, что эксплуатационные характеристики геометрически подобного оборудования независимо от размеров можно представить с помощью соотношения, показанного на рис. I-128.

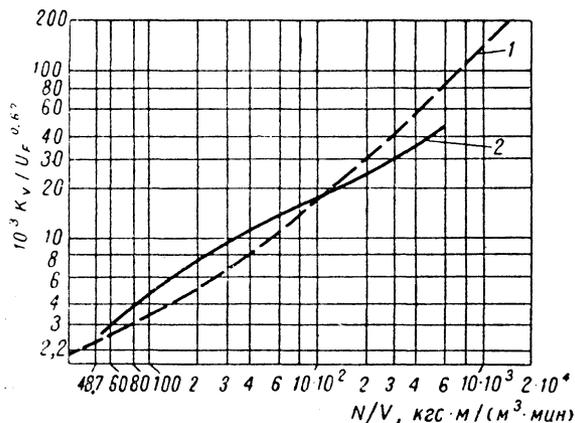


Рис. I-128. Кинетика абсорбции кислорода из воздуха в водном растворе сульфита натрия при 30°С в аппаратах с мешалкой в зависимости от удельных затрат энергии N/V :

1 — оребренный диск, диаметр аппаратов 150, 200, 240, 440 мм;
2 — лопастная мешалка, диаметр аппаратов 200 и 240 мм.
 K_V — средний объемный коэффициент абсорбции, U_F — скорость газа, рассчитанная по объему входящего газа и площади поперечного сечения сосуда.

Движущая сила рассчитывалась как средняя логарифмическая по парциальным давлениям кислорода в воздухе на входе в аппарат и на выходе из него. Энергия, потребляемая на перемешивание жидкости при диспергировании в ней газа, обычно заметно меньше энергии, затрачиваемой на перемешивание неаэрированной жидкости при той же скорости мешалки. При сравнении с помощью рис. I-128 экономичности гипотетического сосуда с мешалкой и насадочной колонны для абсорбции кислорода водой затраты на обе установки оказались примерно одинаковыми, хотя сосуд с мешалкой несколько предпочтительнее при низких скоростях газа².

При изучении конструктивных вариантов диспергаторов с мешалками на маломасштабных моделях были сделаны следующие выводы: преимущество многоярусных мешалок в несекционированном сосуде сомнительно (в некоторых случаях скорость абсорбции уменьшалась, а максимальное увеличение по сравне-

нию с одноярусной мешалкой составляло 10%)¹; при высоких затратах энергии (2,4—4,8 квт/м³) значительные изменения конструкции мешалки приводят к малым изменениям эффективности абсорбции при одинаковых энергетических затратах². Этот вывод согласуется с результатами сравнения лопастной мешалки и оребренного диска (рис. I-128): для этих мешалок влияние скорости газа на скорость абсорбции становится неощутимым, если диаметр мешалок составляет более 40% от диаметра сосуда. Последний вывод, возможно, нельзя экстраполировать на больший масштаб; при равных энергетических затратах сосуды без перегородок обеспечивают скорость абсорбции более высокую, чем сосуды с перегородками, особенно при высоких скоростях газа, однако максимально возможный подвод энергии в сосуд без перегородок относительно мал.

Коэффициенты абсорбции, полученные на системе воздух — раствор сульфита, по-видимому, применимы и для других систем кислород — вода при условии, если сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе.

Джонсон и др.³ исследовали влияние интенсивности перемешивания и скорости газа на скорость трехфазной каталитической реакции гидрогенизации α -метилстирола. Предложено следующее уравнение:

$$\frac{D_r}{Kd^2} \left(\frac{\mu_{ж}}{\rho_{ж} D_r} \right)^{0.33} = A \left(\frac{\sigma}{U_F \mu_{ж}} \right)^{0.75} \cdot Re^{-1.67} + B \frac{\rho_{тв}}{m} Re^{-0.75} \quad (I-115)$$

в котором d — диаметр мешалки; D_r — коэффициент диффузии; K — коэффициент массопередачи; m — концентрация катализатора, г/л; $Re = \frac{d^2 n \rho_{ж}}{\mu_{ж}}$ — критерий

Рейнольдса; n — скорость вращения мешалки, об/сек; U_F — скорость газа, отнесенная к площади сечения аппарата; $\mu_{ж}$ — абсолютная вязкость жидкости; $\rho_{ж}$ и $\rho_{тв}$ — плотность жидкости и твердой фазы (катализатора); σ — поверхностное натяжение жидкости. Различия не оговариваются, и величины, входящие в уравнение, могут быть выражены в любой системе единиц. Коэффициенты A и B зависят от конструкции перемешивающего устройства, для турбинной мешалки, на которой проводилось исследование, $A=29,0$ и $B=6,55 \cdot 10^{-4}$. Влияние свойств жидкости установлено большей частью по аналогии, так как физические свойства в опытах не изменялись в широких пределах. При расчетах уравнением (I-115) следует пользоваться осторожно, в частности потому, что последний член может оказаться неприменимым для катализатора с другими физическими и химическими свойствами; тем не менее оно наглядно показывает значение мешалки при одновременном диспергировании газа и суспендировании катализатора.

Применение механического перемешивания позволяет увеличить производительность установки для дистилляции с водяным паром⁴. Скорость выделения свободной жирной кислоты из ярда при диспергировании пара с помощью турбинной мешалки была на 30—50% выше, чем при использовании простого диспергатора без перемешивания. Процесс аэробной ферментации

¹ Oldshue, Proc. Bioengineering Symp., Rose Polytechn. Inst., Terre Haute, Ind., 1953.

² Karwat, Chem.-Ing.-Tech., 31, 588 (1958).

³ Johnson et al., Am. Inst. Chem. Engrs J., 3, 411 (1957).

⁴ Wolf, Rushton, J. Am. Oil Chemists, Soc., 30, 147 (1953).

¹ Cooper, Fernstrom, Miller, Ind. Eng. Chem., 36, 504 (1944).

² Carlson, Ind. Eng. Chem., 38, 14 (1946).

требует непрерывного подвода кислорода и соответствующего диспергирования активных микроорганизмов во всем объеме бродящей массы. Реакция окисления водного раствора сульфита в качестве модели процесса ферментации пригодна для установления оптимальных условий диспергирования воздуха, но не для предсказания скорости. Абсорбция кислорода клетками дрожжей, по-видимому, является определяющей стадией процесса, и скорость ее не зависит от концентрации растворенного кислорода, если она выше 10^{-5} моль/л; следовательно, выше минимального уровня увеличение интенсивности перемешивания почти не влияет на скорость ферментации¹. Бартоломью и др.² подтвердили эти выводы и подчеркнули важность проведения тщательных работ на моделях в лаборатории и на пилотных установках для получения таких данных по влиянию перемешивания на весь комплекс процессов при ферментации, которые можно было бы с уверенностью переносить на аппараты больших размеров. Применяя для перемешивания турбинку с плоскими лопастями, они разработали рациональную методику геометрического моделирования от объема ~20 л к объемам ~0,8 и 57 м³. Разработана подобная методика³ моделирования процесса ферментации до объема 92 м³. Установлено⁴, что рациональный объем экспериментальных ферментаторов лежит в пределах 20—50 л.

В качестве мешалок для ферментаторов применяют турбинки с плоскими лопастями, открытые турбинки с изогнутыми лопастями, лопастные мешалки и пропеллеры (устанавливаемые в аппарат сверху или сбоку).

Интересующимися вопросами расчета аэробной ферментации и работой бродильных аппаратов можно рекомендовать обзор⁵.

Олдуш, изучая аэробное окисление биологических сбросных вод (активированного молочного осадка), осуществляемое с помощью турбинной мешалки типа «Микско», установил, что поглощение кислорода может быть количественно описано коэффициентом абсорбции и мощностью, вводимой в жидкость диспергирующей мешалкой⁶. На рис. I-129 приведены данные, полученные при окислении молочного шлама в резервуаре диаметром 6 м при высоте слоя жидкости 3,65 м. Эти данные применимы для $d_{\text{меш}}/D_{\text{ал}} = 0,2$ и слоя жидкости высотой 3—12 м, если отношение затрачиваемой на перемешивание энергии к высоте слоя жидкости остается таким же, какое взято на рис. I-129. Поскольку скорость поглощения кислорода из жидкости становится главным фактором, определяющим общую скорость абсорбции, нет необходимости и не рекомендуется прибегать к большим затратам мощности на перемешивание при аэрации, как это делается во многих химических процессах.

Экенфельдер⁷ приводит данные по турбинным аэротарам, работающим в пределах $0,059—0,079$ квт/м³, и рекомендует для предотвращения распада шлама и сопутствующих ему трудностей, связанных с флотацией и пенообразованием, избегать энергетических за-

трат выше $0,132$ квт/м³ и окружных скоростей мешалки выше 3 м/сек.

Фундаментальное изучение данных по механическому диспергированию газа мешалками было предпринято Кальдербанком¹. Он работал с геометрически подобными сосудами диаметром 150—500 мм, оснащенными турбинной мешалкой типа «Микско» с плоскими лопастями при удельных затратах мощности до $5,30$ квт/м и сравнительно низких скоростях газа (до $0,0185$ м/сек)

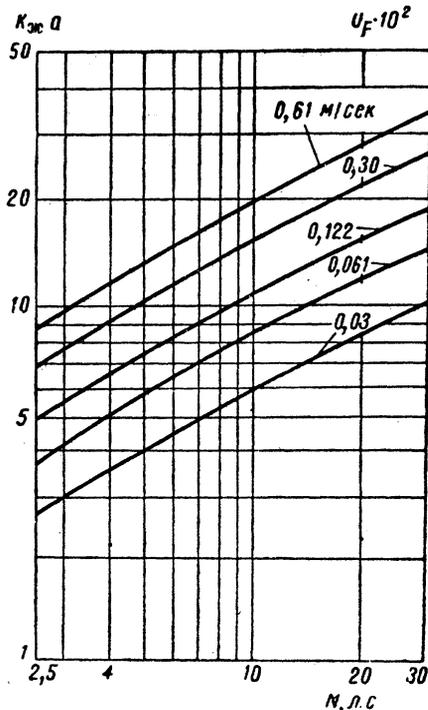


Рис. I-129. Абсорбция кислорода из воздуха сбросами молочной промышленности в аппаратах с турбинной мешалкой «Микско».

Диаметр аппарата 6,1 м, высота слоя жидкости 3,66 м. U_F — скорость воздуха, отнесенная к полному сечению аппарата, N — мощность, затрачиваемая на перемешивание.

Получены следующие выводы.

1. Коэффициент массопередачи в жидкой фазе не зависит от размера пузырьков и скорости перемешивания. Этот факт говорит, по-видимому, о том, что соотношение между размером и относительной скоростью пузырьков приводит, может быть случайно, к постоянству времени контакта. Этот вывод должен быть проверен на аппаратах больших размеров.

2. Сосуд, в котором осуществляется диспергирование газа с помощью мешалки, работает как одна теоретическая ступень контакта.

3. Поверхность раздела фаз может быть подсчитана по уравнению:

$$a_0 = 1,44 \left(\frac{N}{V} \right)^{0,4} \rho_{\text{ж}}^{0,2} \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{0,6} \left(\frac{U_F}{U_{\text{п}}} \right)^{0,5} \quad (\text{I-116})$$

¹ Calderbank, Trans. Inst. Chem. Engrs. 37, 173 (1959).

¹ Gaden et al., Ind. Eng. Chem., 42, 1792 (1950); 48, 2209 (1956); J. Biochem. Microbiol. Tech. Eng., 1, 163 (1959).

² Bartholomew et al., Ind. Eng. Chem., 42, 1801, 1827 (1950); J. Agr. Food Chem., 1, 302 (1953).

³ Wegrich, Shurter, Ind. Eng. Chem., 45, 1153 (1953).

⁴ Kroll et al., Ind. Eng. Chem., 48, 2190 (1956). — Nelson, Maxon, Elferdink, Ind. Eng. Chem., 48, 2183 (1956).

⁵ Finn, Bacteriol. Ber., 18, 254 (1954).

⁶ Oldshue, Ind. Eng. Chem., 48, 2194 (1956).

⁷ Eckenfelder, Chem. Eng. Progr., 52, 286 (1956).

где a_0 — межфазовая поверхность в единице объема, $см^{-1}$; N — мощность на валу мешалки, расходуемая на диспергирование, $эрг/сек$; V — объем перемешиваемой массы, $см^3$; U_F и U_n — скорость газа, отнесенная к свободному сечению аппарата, и скорость подъема пузырьков, $см/сек$; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, $г/см^3$; σ — поверхностное натяжение, $дин/см$. Значение U_n обычно неизвестно, но для всех пузырьков, за исключением очень мелких, с допустимой погрешностью может быть использовано среднее значение $26 см/сек$.

трачивать на вращение мешалки в неаэрированной жидкости: при больших скоростях подачи газа в аппарат это расхождение может достигнуть 30%. В опыте на геометрически подобном оборудовании при двукратном изменении размеров¹ были испытаны турбинные мешалки с плоскими лопастями. Данные по мощности обобщались в виде зависимости N/N_0 от $Q/nd_{меш}^3$ (где n — число оборотов мешалки в единицу времени, N и N_0 — мощность на валу мешалки, затраченная на пе-

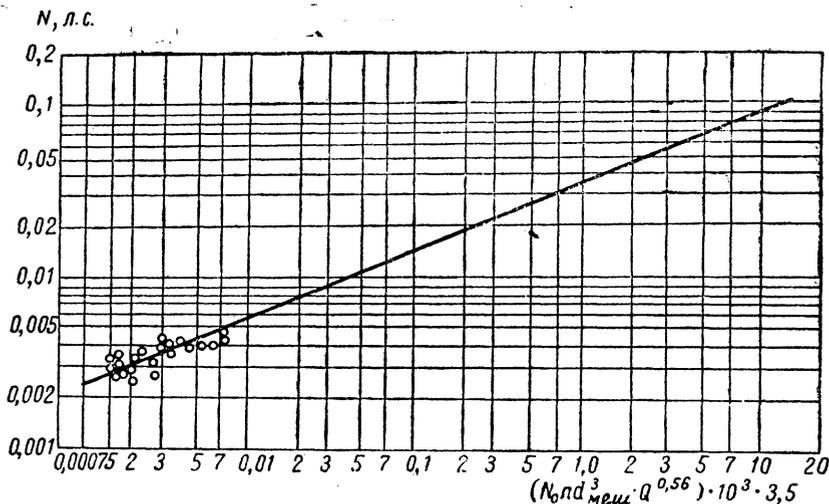


Рис. I-130. Зависимость потребляемой мощности от газонасыщения слоя жидкости в аппаратах с мешалкой:

N и N_0 — мощность, затрачиваемая на перемешивание газо-жидкостной системы и светлой жидкости соответственно, л. с.; n — число оборотов мешалки в минуту; $d_{меш}$ — диаметр мешалки, м; Q — объемный расход газа, $м^3/мин$.

Сплошная линия — данные Мичела для аппарата диаметром 300 мм с турбинной мешалкой диаметром 100 мм (300 опытов с максимальным разбросом $\pm 7\%$); \circ — данные Ояма и Эндо для аппарата диаметром 275 мм с турбинной мешалкой диаметром 91,5 мм.

4. Газонасыщение может быть рассчитано по формуле:

$$Q = \left(\frac{U_F Q}{U_n} \right)^{0.5} + 0,0216 \left(\frac{N}{V} \right)^{0.4} \rho_{ж}^{0.2} \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{0.6} \left(\frac{U_F}{U_n} \right)^{0.5} \quad (I-117)$$

где Q — объемная доля газа в суспензии. При больших значениях N/V выражение (I-117) дает результаты, хорошо совпадающие с уравнением для расчета времени пребывания воздуха в воде, предложенным ранее¹:

$$\theta = c \left(\frac{N}{V U_F} \right)^{0.47} \quad (I-118)$$

Если θ выражается в $сек/м$, N/V — в $квт/м^3$ и U_F — в $м/сек$, то $0,517 \leq c \leq 0,678$.

Все полученные до сих пор соотношения для расчета аппаратов, работающих на системах газ-жидкость, имеют общий недостаток: в них входит неизвестная мощность на валу мешалки, затрачиваемая на диспергирование газа. Она, вероятно, должна быть всегда меньше той мощности, которую необходимо за-

решивание аэрированной и неаэрированной жидкости; Q — расход газа). Эта зависимость графически изображается слегка выпуклой кривой с отрицательным углом наклона. При этом значений $N/N_0 < 0,5$ не получено. Пользуясь этим методом, но при несколько отличной конструкции мешалки, Кальдербанк² получил значительно более низкие величины, которые достаточно хорошо обобщаются двумя отрезками прямых. Опубликовано³ подробное обобщение данных по мощности, потребляемой в аппаратах аэрации шламов, которое представлено в виде графика зависимости N/N_0 от $(1 - Q/nd_{меш}^3)$.

Установлено⁴, что в широком диапазоне измерения величины N_0 эта зависимость не соблюдается, причем, как правило, рассчитанные величины N оказываются выше замеренных в опыте. Экспериментальные данные получены на аппарате диаметром 300 мм с отражательными перегородками и турбинной мешалкой «Микско», в котором диспергировался воздух в одно- и двухфазной жидкости ($\rho_{ж} = 1000 \div 1600 кг/м^3$, $\mu_{ж} = 1 \div 28 сгз$). Прямая на рис. I-130 представляет собой

¹ Oyama, Endoh, Chem. Eng., Japan, 19, 2 (1955).

² Calderbank, Trans. Inst. Chem. Engrs, 36, 463 (1958).

³ Kalinske, Sewage a. Ind. Wastes, 27, 572 (1955).

⁴ Michel, Miller, Am. Inst. Chem. Engrs J., 8, 262 (1962).

¹ Foust, Mack, Rushton, Ind. Eng. Chem., 36, 517 (1933).

обобщение данных с максимальным отклонением $\pm 17\%$; как видно, на эту же прямую ложатся данные Эндо и Ояма с таким же отклонением. Эта обобщенная зависимость охватывает одиннадцатикратный диапазон чисел Вебера, однако она не пригодна для дисперсий, содержащих ПАВ, которые могут значительно понизить мощность, потребляемую мешалкой при одной и той же скорости ее вращения.

Зависимость Минчела нельзя рассматривать в качестве инструмента для моделирования, однако имеются

должен выдерживать нагрузку, возникающую при работе с неаэрированной жидкостью.

Обычно для каждого значения мощности, потребляемой мешалкой-диспергатором, существует предельная скорость подачи газа, которая не может быть превышена без опасности вспенивания жидкости в аппарате. Эта предельная скорость точно не установлена, однако при умеренных энергетических затратах она, по-видимому, не может быть выше $0,127 \text{ м}^3/(\text{сек} \cdot \text{м}^2 \text{ поперечного сечения аппарата})$, а при затратах мощности выше $1,6 \text{ кат/м}^3$ предельная скорость может составлять всего 25% от этого максимума или даже ниже. Финн¹ указывает, что надежный предел скорости, отнесенной к свободному сечению ферментационного аппарата с перемешиванием, равен $0,035 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ для турбинной мешалки с плоскими лопастями и $0,005 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ для лопастной. Калинске² рекомендует для дисковой мешалки с ребрами в аппаратах аэробного окисления экономический максимум, равный $0,05 \text{ м}^3/(\text{сек} \cdot \text{м}^2)$ поверхности, образуемой концом движущейся лопасти. Эта поверхность рассчитывается как произведение длины окружности, описываемой концом лопасти, на ее высоту. Для химических систем с более высокими скоростями реакции необходимы, по-видимому, более высокие пределы по сравнению с указанными выше.

В некоторых случаях выгодно применять механические диспергаторы, которые вызывают подсос воздуха при своей работе, например мешалка «Турбо-газ-абсорбер» (рис. I-131). Оценка производительности за счет подсоса и максимальные скорости газа, обеспечивающие эффективную работу этого устройства как диспергатора при питании под давлением, даны в табл. I-16. При скорости подачи газа выше $4,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ должны применяться установки с подводом газа под давлением. Сконструированы также мешалки максимального размера, работающие при подаче газа только под избыточным давлением.

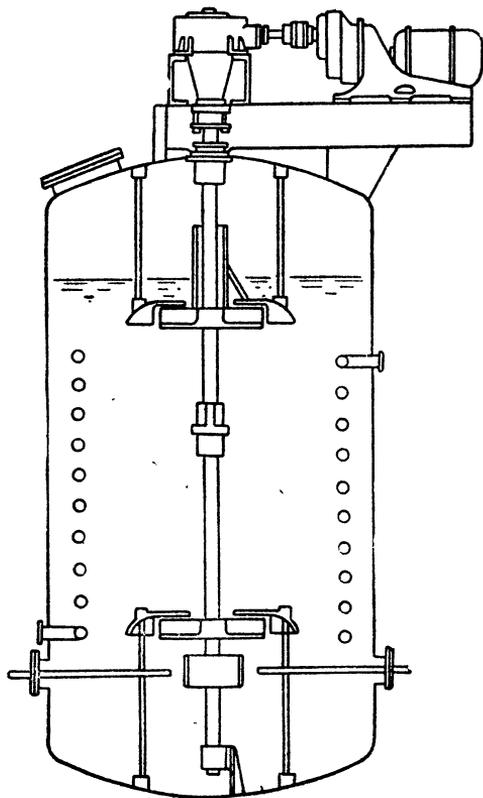


Рис. I-131. Гидрогенизационный автоклав с перемешивающим устройством для комбинированной подачи газа под давлением и за счет подсоса. Верхняя мешалка является всасывающей.

некоторые основания считать, что она действительна для геометрически подобных моделей с масштабным коэффициентом равным по крайней мере 2. Подобно соотношениям Ояма и Кальдербанка, эта зависимость не проверялась при высоких скоростях газа, и поэтому при $U_F > 0,018 \text{ м/сек}$ ее следует применять с осторожностью.

При значительном увеличении скорости газа и постоянном числе оборотов мешалки снижение мощности происходит по существу линейно в зависимости от скорости газа, отнесенной к свободному сечению аппарата, и опытные данные могут быть обработаны по этой зависимости¹. В любом случае привод мешалки

ТАБЛИЦА I-16

Производительность по газу за счет всасывающего действия мешалки «Турбо-газ-абсорбер»

Диаметр мешалки, мм	Максимальная производительность, $\text{м}^3/\text{мин}$	
	за счет всасывания	с подачей газа под давлением
100	0,0566	0,085
150	0,283	0,425
225	0,425	0,566
300	0,71	1,13
450	1,7	2,83
550	2,83	5,1
675	4,53	8,5
850	—	17
1050	—	34
1500	—	71
1800	—	107
2100	—	142

¹ Finn, Bacteriol. Rev., 18, 254 (1954).

² Kalinske в кн. McCabe, Eckenfelder «Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes», vol I, ch. 2—10, New York, 1950.

¹ Nelson, Maxon, Elferdink, Ind. Eng. Chem., 48, 2183 (1956).

Пропеллерная мешалка, установленная в циркуляционной трубе, или правильно сконструированная турбинная мешалка, работающая под циркуляционной трубой, также могут вызывать всасывание атмосферного воздуха в жидкость. В абсорбере «Кавитатор» всасывание газа при скоростях, указанных в табл. I-17

ТАБЛИЦА I-17

Производительность абсорбера «Кавитатор» по всасываемому воздуху

Модель	Мощность двигателя, квт	Размеры аппарата, м		Объем аппарата, м ³	Расход воздуха, м ³ /мин
		квадратного (сторона)	круглого (диаметр)		
C-27-2	1,5	2,44	2,74	17,5	0,226
C-27-3	2,2	3,05	3,35	27	0,34
C-37-5	3,7	3,67	3,96	38	0,51
C-37-7,5	5,6	4,85	5,5	72	0,795
C-37-10	7,46	5,5	6,1	87	1,075

для системы воздух — вода, осуществляется закрытой кожухом турбинной мешалкой, установленной под циркуляционной трубой, как показано на рис. I-132. Вы-

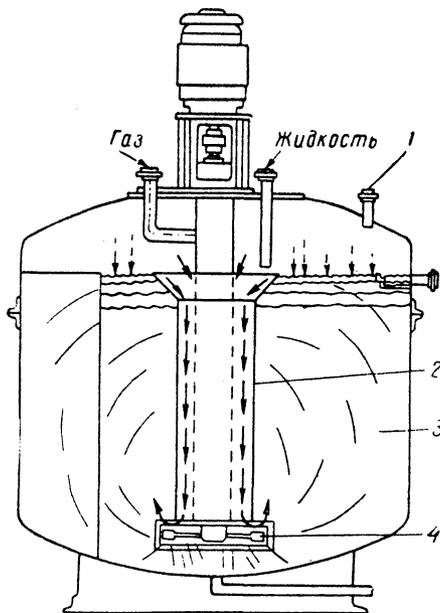


Рис. I-132. Абсорбер с перемешивающим устройством «Кавитатор». Всасывание газа осуществляется потоком жидкости через циркуляционную трубу и мешалку: 1 — клапан; 2 — циркуляционная труба; 3 — направляющие перегородки; 4 — мешалка.

Мешалка, работающая вблизи поверхности жидкости, особенно в сосудах с перегородками или некруглой формы, будет также в определенной степени способствовать всасыванию газа из окружающей атмосферы. Устройство такого типа использовалось для приготовления пены латекса¹. В «Пермаэраторе» (рис. I-133) для диспергирования газ в жидкости, особенно для биоокисления растворимых органических субстратов, применяются двойные турбинные мешалки.

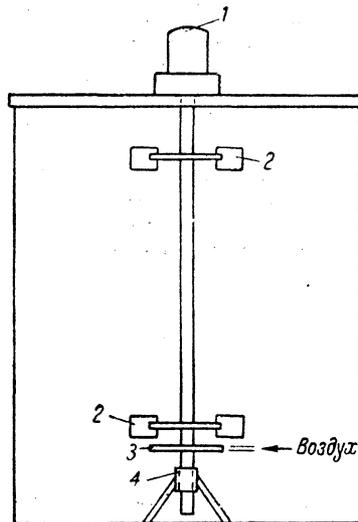


Рис. I-133. Аэратор биоокисления «Пермаэратор»:

1 — электродвигатель с редуктором; 2 — мешалка; 3 — кольцевой барботер; 4 — подпятник.

Газ подается к нижней мешалке через кольцевой распределитель, расположенный под ней, верхняя мешалка установлена достаточно близко к поверхности жидкости для того, чтобы происходил подсос газа через открытую поверхность.

Вращающиеся мешалки широко используются в устройствах пенной флотации. В наиболее распространенных в настоящее время флотационных камерах аэрационные устройства интенсивно перемешивают суспензию и определенное количество воздуха, вводимого непосредственно на мешалку. Воздух может подаваться через полый вал мешалки или через распределительную трубу под давлением или за счет засасывающего действия мешалки.

Такие аэрационные камеры работают при окружной скорости мешалки 7,4—11 м/сек и мощности 2—6 квт на 1 м³ объема камеры. Пенная флотация рассматривается в гл. IV, подробное описание работы и расчета флотационных машин имеется в литературе².

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

По общим вопросам диспергирования фаз и дисперсных систем: Birkhoff, Zaganonello, Applied Mathematics and Mechanics, vol. II, Jets, Wakes and Cavities, New York, 1957. — Herman, Flow Properties of Disperse Systems, New York, 1953. — Lane, Green, Davies, Surveys in Mecha-

¹ Greenup, Jonhstone, US Pat. 2324988.

² Gaudin, Flotation, 2 ed., New York, 1957. — Taggart, Handbook of Mineral Dressing, Sec. 12, New York, 1945, pp. 52—108.

кокая эффективность абсорбции в таком аппарате достигается при относительно низких скоростях газа; например, при диспергировании воздуха в растворе сульфата натрия абсорбируется до 46% кислорода.

nes, Cambridge, 1956. — Plateau, Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires, Paris, 1873.

По общим вопросам диспергирования жидкости в газе: Green, Lane, Particulate Clouds: Dusts, Smokes and Mists, London, 1964. — Avey, Les aerosols, Paris, 1956.

По теории распада струй: Castleman, Bur. Standarts J. Research, 6, 369 (1931). — Helmholtz, Monatsber. Berlin. Akad. 1868, S. 215; Phil. Mag., 36, 377 (1868). — Rayleigh, Proc. London Math. Soc., 10, 14 (1879). — Верещагин, Семерчан, Советские доклады по физике, 1, 2484 (1957).

Подробные характеристики распылителей и методов распыления: Kirk-Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, vol. 12, pp. 703—721, New York, 1954. — Fraser, Eisenklam, Dombrowski, Brit. Chem. Eng., 2, 414, 496, 536, 610 (1957). — Giffin, Muraszew, The Atomization of Liquid Fuels, New York, 1953. — Bibliography of Sprays, 2 ed., New York, 1953. — Lewis, Edwards, Guglia, Rice Smith, Ind. Eng. Chem., 40, 67 (1948). — Troesch, Chem.-Ind.-Tech., 31, 667 (1959).

Обзоры достижений в области сушки распылением и оборудования: Marshall, Chem. Eng. Progr., Monograph. Ser. 50 (2), (1954) (рассматриваются также распыление и распылители). — Seltzer, Settlemeyer, Advances in Food Research, vol. 2, pp. 399—520, New York, 1949.

Критический обзор по вопросам двухфазных потоков в трубах: Isbin, Moep, Mosher, U. S. Atomic Energy Comm. Report, A. E. C. U.-2994, November, 1954.

Описание пузырьковых и пенных дисперсий: Haberman, Morton, Rept 802, David W. Taylor Model Basin, Washington, 1953. — Benfratello, Energia elettrica, 30, 80, 486 (1953). — Berkman, Egloff, Emulsions and Foams, New York, 1941, pp. 112—152. — Bickerman, Foams. Theory and Industrial Applications, New York, 1953.

Сведения о влиянии поверхностно-активных веществ на пузырьки и пены приведены в некоторых разделах книг: Schwartz, Perry, Surface Active Agents, vol. 1, New York, 1949. — Schwartz, Perry, Berch, Surface Active Agents and Detergents, vol. 1, New York, 1958.

Обзор, посвященный устойчивости пен, дает de Vries, Mededel. Rubber-Sticht, Delft, № 326, 1957.

Рекомендуются также обзоры по конкретным применениям дисперсий газа в жидкости. По промышленной ферментации Filp, Bacterial Rev., 18, 254 (1954).

По аэробному окислению сточных вод: McCabe, Eckfelder, Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, vol. 1, p. 11, New York, 1955.

По ячеистым эластомерам: Flint, Natural Rubber Latex Foam Products, London, 1954. — Gould, Symposium on Applications of Synthetic Rubbers, 1944, pp. 90—103.

Противопожарные пены: Пергу в книге Бикермана (см. выше), гл. 12.

Методы и оборудование для пенной флотации: Gaudin, Flotation, 2 ed., New York, 1957. — Вoot в книге Бикермана (см. выше), гл. 13. — Taggart, Handbook of Mineral Dressing, part 12, New York, 1945, pp. 52—84.

СЕПАРАЦИЯ

Выше было показано, что дисперсии жидкостей в газах и газов в жидкостях неустойчивы и легко разделяются на составляющие их фазы. В тех случаях, когда дисперсное состояние необходимо поддерживать в течение всего процесса, естественную тенденцию дисперсий к разделению компенсируют, используя стабилизирующие материалы и подбирая соответствующие физические условия. При некоторых условиях система газ — жидкость может оставаться почти неизменной в течение долгого времени. Например, пенная эмульсия воды и воздуха в сырой нефти, полученная с помощью высокоскоростной мешалки, может существовать в виде полутвердого геля в течение месяцев без видимых изменений структуры и состава и без ощутимого разделения фаз.

Разделение системы газ — жидкость может состоять в удалении укрупняющихся и объединяющихся в сплошную систему фаз или включать в себя укрупнение, объединение получающихся агрегатов и их удаление. Часто скорость, при которой протекает самопроизвольное разделение, настолько мала, что процесс становится экономически невыгодным; в таких случаях целью сепарации является ускорение естественного процесса разделения.

Необходимость сепарации дисперсных систем газ — жидкость обусловлена многими причинами. Наиболее важными среди них являются следующие:

1. Нарушение технологического режима или снижение качества получаемого продукта происходит в том случае, если не удаляются примеси в виде дисперсной фазы. Примеры: присутствие пузырьков в пленках краски или полимера; неполная сепарация капель жидкости, образующихся в газе-носителе при охлаждении и конденсации, приводит к недостаточной «осушке» газа.

2. Снижение эффективности ступенчатого процесса массообмена за счет механического переноса дисперсной фазы сплошной с одной ступени контакта на другую. Примеры: унос в дистилляционной тарельчатой колонне, состоящий в том, что капли высококипящей жидкости перебрасываются потоком пара на вышележащую тарелку; перенос пузырьков пара жидкостью через переливные патрубки в тарельчатой колонне.

3. Потери ценных материалов, находящихся в дисперсном состоянии за счет несовершенной сепарации. Примеры: унос капель пропитывающего каталитического раствора серебра или платины при разбрызгива-

нии; потери веществ из реактора при всенивании жидкости.

4. Попадание нежелательного вещества в оборудование вдоль технологической линии может привести к снижению производительности или повреждению аппаратов. Примеры: засасывание распыленной кислоты в вентиляторы или отсасывающие линии; унос пузырьков газа во всасывающую линию центробежного насоса или в сифонную линию с последующим образованием воздушной пробки.

5. Выброс тумана из трубы может привести к загрязнению атмосферы. Пример: капли серной или азотной кислоты, выбрасываемые через трубы кислотных заводов.

Для сепарации систем газ — жидкость используются следующие методы: 1) гравитационный (естественный или центробежный); 2) инерционный (изменение направления и соударение); 3) абсорбционный (капли коалесцируют в массе жидкости или поглощаются твердым адсорбентом); 4) растворение (пленка, образующая стенки пузырьков, разбавляется соответствующим растворителем для получения менее устойчивой пленки); 5) физико-химический (слияние достигается с помощью веществ, меняющих характер межфазового слоя); 6) электрический (снимается поверхностный заряд частиц для удаления диспергирующих сил отталкивания или частицам сообщается заряд, чтобы заставить их перемещаться к собирающей поверхности, имеющей заряд обратного знака); 7) термический (горячая поверхность или интенсивное тепловое поле, разрушающее пенную структуру). Часто эффективными оказываются несколько методов, и тогда выбор определяется экономичностью или удобством.

Принципы, лежащие в основе образования и разрушения дисперсий, одинаковы. Они кратко обсуждались в начале настоящего раздела. Оборудование, с помощью которого осуществляется сепарация, весьма разнообразно в зависимости от природы дисперсной фазы и от конкретных компонентов системы.

СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЬ В ГАЗЕ

Из дисперсий жидкость в газе в химической технологии встречаются туманы различной плотности, состоящие из частиц с диаметром 0,1—100 мкм. Более крупные частицы легко выделяются в осадительных камерах.

На диспергированную жидкую частицу действуют силы, подобные тем, что действуют на твердую частицу, взвешенную в потоке газа, поэтому для их сепарации используется в основном одноступенчатое оборудование. Одно из преимуществ отделения жидких капель перед отделением твердых частиц состоит в том, что агломерация жидких капель происходит непосредственно после сепарации и эта фаза может быть отведена из сепаратора в виде потока жидкости. Поэтому рукавные фильтры не находят применения для сепарации жидкости из газа, хотя и могут использоваться для укрупнения капель. Все другие типы устройств для сепарации твердых частиц из газов можно применять и для сепарации капель жидкости, не внося в них конструктивных изменений, а исключив только узлы разгрузки и очистки, обычно необходимые при сепарации твердых материалов.

Коалесценция жидких капель происходит значительно легче, чем агломерация твердых частиц, однако при неблагоприятных условиях капли и распадаются легче. При расчете сепараторов, отделяющих жидкость, эти условия обычно исключаются. Для частиц величиной 3—100 мкм применим закон Стокса, а для частиц 0,1—3 мкм в значение скорости, вычисленной на основании закона Стокса, должна быть внесена поправка Каннингема.

В соответствии с законом Стокса, сила сопротивления, действующая на частицу сферической формы, равна:

$$F_D = 3\pi\mu_r U d_c \quad (I-119)$$

где U — скорость частицы диаметром d_c относительно газа; μ_r — динамическая вязкость газа. При скорости движения частицы, равной скорости осаждения, сила сопротивления равна силе тяжести:

$$\frac{\pi}{6} d_c^3 (\rho_{ж} - \rho_r) g = 3\pi\mu_r U_{ос} d_c \quad (I-120)$$

и

$$d_c = \sqrt{\frac{18\mu_r U_{ос}}{g (\rho_{ж} - \rho_r)}} \quad (I-121)$$

Так как скорость осаждения частицы прямо пропорциональна квадрату ее диаметра, трудность отделения малых частиц быстро возрастает с уменьшением их размеров. Очевидно также преимущество распыленной жидкости, состоящее в коалесценции и улавливания таким образом мельчайших частиц. На этом принципе основывается работа многих промышленных сепараторов.

Гравитационные осадители

Простейшее устройство, использующее силу тяжести частиц жидкости, состоит из большого сосуда, в котором скорость входящего газового потока уменьшается. Если газ проходит через сосуд вертикально вверх, все частицы, скорость осаждения которых равна вертикальной скорости газового потока или превышает ее, будут отделяться. Частицы диаметром 100 мкм имеют скорость осаждения $\sim 0,33$ м/сек, для отделения более мелких частиц требуются очень низкие скорости, а следовательно, крупногабаритное оборудование. Дополнительного эффекта можно достигнуть, исключив вертикальную составляющую скорости газа путем про-

пускания газового потока в горизонтальном направлении по длинной полой камере (обычно прямоугольного сечения); однако даже при такой недорогой конструкции отделение частиц мельче 40 мкм оказывается неэкономичным. Улавливание диспергированных частиц меньших размеров может быть улучшено путем уменьшения длины пути падения частицы, необходимого для ее отделения. Дымоочиститель Ховарда¹ создан по этому принципу. Он снабжен рядом горизонтальных перегородок, установленных для улучшения эффективности отделения малых частиц. В горизонтальной камере длиной l и шириной b , через которую пропускается газовый поток q м³/сек, скорость осаждения, определяющая минимальный размер капель, которые будут отделяться, равна:

$$U_{ос} = \frac{q}{lb} \quad (I-122)$$

Если перегородки делят камеру на n секций, то при той же ее высоте скорость осаждения для наименьших частиц станет равной:

$$U_{ос} = \frac{q}{nlb} \quad (I-123)$$

Минимальный размер частицы, осаждающейся в данной камере, в соответствии с законом Стокса:

$$d_{c \min} = \sqrt{\frac{18\mu_r U_{ос}}{g (\rho_{ж} - \rho_r)}} = \sqrt{\frac{18\mu_r q}{gnlb (\rho_{ж} - \rho_r)}} \quad (I-124)$$

Поэтому при увеличении числа горизонтальных перегородок или лотков в данной осадительной камере минимальный размер частиц, отделяемых от газа, изменится обратно пропорционально корню квадратному из числа перегородок. Гидравлический радиус равен половине расстояния между перегородками, следовательно, гидравлическое сопротивление осаждения собственно камеры (без учета потерь на входе и на выходе) почти пропорционально числу перегородок. Можно поэтому сказать, что в осадительной камере данных размеров

$$d_{c \min} : (\Delta P)^{-1/2} \quad (I-125)$$

Эта закономерность справедлива, если сопротивление изменяется в результате увеличения длины камеры для повышения эффективности осаждения.

Циклоны

Для воздействия на частицы, переносимые потоком газа, может быть использована центробежная сила, величина которой может превосходить силу тяжести в несколько сотен раз. Центробежная сила, действующая на частицу с массой M , равна $\frac{Mv^2}{r}$, так что величина g в уравнении закона Стокса может быть заменена на v^2/r (где v — линейная скорость на радиусе r). При выражении v через угловую скорость ω величина g заменится на $\omega^2 r$.

¹ Howard, US Pat. 896111.

Газ в циклоне движется сложным путем, по двойной спирали, причем внешний поток опускается вниз, а центральный поднимается к выходному отверстию. Кроме того, благодаря трению о стенки угловая ско-

жидкости; многие компании поставляют центробежные сепараторы, которые могут быть установлены в существующие технологические емкости, решая таким образом проблему уноса непосредственно у его источ-

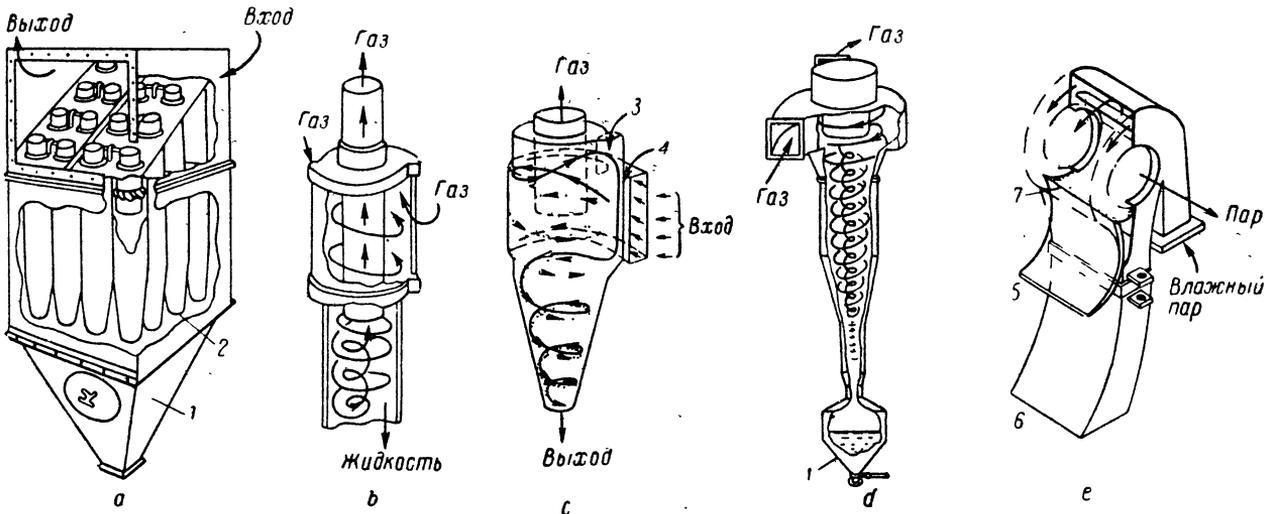


Рис. 1-134. Типовые циклонные сепараторы:

a — мультициклон; *b* — циклон керамический «Термик»; *c* — циклон Ван Тонгерена; *d* — циклон «Сирокко» тип *D*; *e* — горизонтальный паросепаратор; 1 — сборник; 2 — элемент мультициклона; 3 — отбойник; 4 — байпасный канал; 5 — перегородка первичного отделения; 6 — вторичный отвод; 7 — кромка отбойника.

рость возрастает от нуля у стенок до максимального значения в центре, и на большей части сечения циклона скорость изменяется обратно пропорционально

ника. На рис. 1-134 приведено несколько таких устройств. Часто в одном сепараторе объединено использование центробежной силы и других методов се-

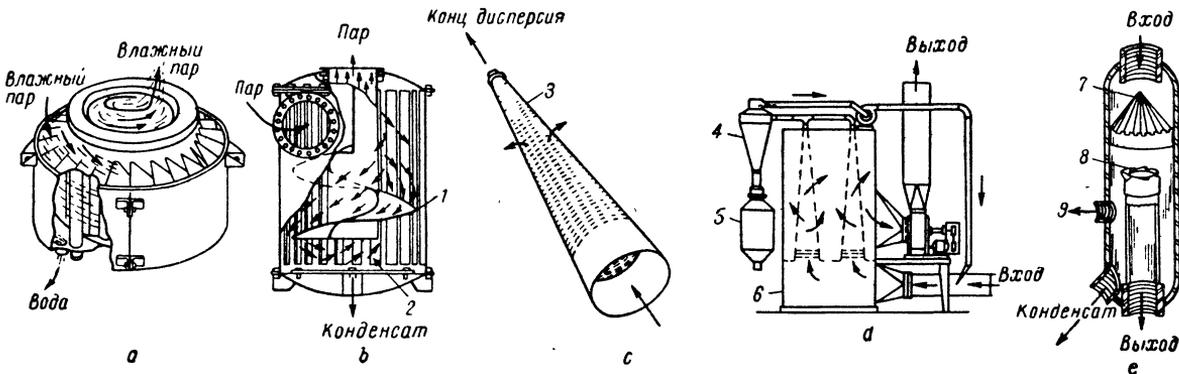


Рис. 1-135. Типовые сепараторы, использующие принцип соударения в дополнение к центробежной силе:

a — сепаратор Ni-eF; *b* — сепаратор Флика; *c* — аэродинамическая труба; *d* — сепаратор с аэродинамическими трубами; *e* — прямоотный сепаратор RA; 1 — винтовая направляющая пластина; 2 — перфорированная пластина; 3 — отверстия; 4 — циклон; 5 — сборник; 6 — коллектор; 7 — вицтовой направляющий аппарат; 8 — устройство для раскручивания потока; 9 — клапан.

радиусу в степени от $1/2$ до $1/3$. Ввиду сложности движения газа невозможно подобрать упрощающие допущения для подсчета сопротивления циклона. Сопротивление циклонов колеблется в пределах от 1 до 20 скоростных напоров на входе, и большие циклоны обычно не конструируются для отделения частиц мельче 5 мкм.

Любой циклон для отделения пыли может быть использован и для очистки от содержащейся в газе

парами. В сепаратор циклонного типа часто встроены сепаратор ударного действия, как показано на рис. 1-135.

Сепараторы ударного действия

Если на пути газового потока поместить препятствие, заставляющее его изменить свое направление, переносимые газом капли жидкости будут продолжать свое

движение в прежнем направлении за счет большего момента инерции относительно потока газа, ударяться о поверхность препятствия и собираться на ней. Наиболее эффективная ударная сепарация получается при пропускании газа с высокой скоростью через отверстие и столкновении потока с большой плоской поверхностью, установленной под прямым углом к потоку и на близком расстоянии от отверстия.

Целью работы по определению эффективности улавливания с помощью насадок различной формы¹ было изучение эффективности экспериментального оборудования, используемого для оценки размеров частиц аэрозолей. Работа проводилась на небольших насадках при высоких скоростях газа. Полученные данные позволяют вычислить размер частиц, улавливаемых каскадной системой последовательно соединенных сепараторов ударного действия. Ренц и Хофельт² исследовали эффективность сепарации как функцию относительного расположения насадки и плоской отбойной пластины.

Кац³ сравнивал работу сепараторов ударного действия нескольких типов. Определялось гидравлическое сопротивление сепаратора, состоящего из серии сопел и отражательных пластин. Расчет производился по общепринятым зависимостям для определения потерь на расширение и сжатие газовой струи в предположении, что вся кинетическая энергия газа расходуется на удар о пластину. Замеренное сопротивление оказалось выше рассчитанного на 0,3—0,5 скоростного напора газа. В этих опытах кинетическая энергия увлекаемых частиц жидкости должна бы быть эквивалентна более чем одному скоростному напору газа, если все частицы разогнаны до скорости газа в сопле. Отсюда следует, что скорость частиц жидкости, вылетающих из сопла, не равна скорости газа; среднеквадратичная величина скорости частиц (размер которых в указанной работе колебался большей частью в пределах 1—4 мкм) составляла только 60% от скорости газа в сопле. Большие частицы, которые легче всего отделить, перемещаются с меньшей скоростью, скорость мелких частиц приближается к скорости газа. Этим можно объяснить, почему расчетное влияние размера частиц на эффективность улавливания при соударении выражено всегда более резко по сравнению с экспериментально определенным. Экспериментальные кривые часто пересекают расчетные при эффективности 50%, указывая на то, что ненадежность расчетной эффективности объясняется не несовершенством теории, но скорее недостаточностью наших знаний о скоростном спектре частиц различных размеров, взвешенных в движущемся потоке газа. То же самое наблюдается и при анализе данных по центробежной сепарации.

Кац исследовал также сепаратор из гофрированных пластин (рис. I-136, b). Сопротивление сепаратора такого типа является функцией его геометрических размеров. Для гофров, выполненных в виде дуг с углом 90°, радиусом 10 мм и расстоянием между пластинами 3,8 мм, сопротивление, отнесенное к скоростному напору, приведено на рис. I-137. Там же приводятся данные по эффективности улавливания в сепараторе, составленном из семи пластин этого типа. Оптимальная скорость между пластинами такого сепаратора определяется по уравнению:

$$v = K \sqrt{\frac{\rho_{ж} - \rho_{г}}{\rho_{г}}} \quad (I-126)$$

где $K=0,122$, а v — скорость газового потока, м/сек.

Определяя эффективность улавливания частиц различного размера, Кац не обнаружил заметного различия в работе сепаратора, если скорость в нем меняется в 0,5—3 раза по сравнению с вычисленной по уравнению (I-126). Эффективность рассчитывалась из предположения, что все частицы в потоке совершают радиальное движение относительно центров дуг, из которых составлен сепаратор. Однако экспериментально определенная эффективность (рис. I-137) составила только около 20% от расчетной. Значит, длины дуги с центральным углом 90° недостаточно для создания в потоке газа развитого кругового движения. Надо либо увеличивать длину дуг гофрированной пластины при том же радиусе, либо уменьшать радиус при той же длине дуги, но такие изменения увеличат сопротивление, в то время как низкое сопротивление является одной из отличительных особенностей сепараторов подобного типа. Сепаратор, показанный на рис. I-136, c, может рассматриваться как предельный случай по характеру движения газа: поток газа в нем может совершить два полных поворота в каждом ряду корытообразных каналов, хотя, по всей вероятности, основная часть газа следует через установку по плавной изгибающейся траектории, подобно движению в ранее описанной конструкции.

Линейный сепаратор Карбейта (рис. I-136, g) состоит из нескольких рядов стержней каплевидного сечения. Фирма-изготовитель рекомендует при расчете скорости по формуле (I-126) принимать коэффициент $K=0,305$. Сопротивление при этом составляет ~5,5 скоростных напоров, рассчитанных по скорости, отнесенной к полному сечению сепаратора. Сопротивление, по-видимому, будет возрастать с увеличением нагрузки по жидкости. На рис. I-138 приведены данные по эффективности улавливания из воздуха при расчетных скоростях частиц различного размера с плотностью 1000 кг/м³.

В качестве ударной поверхности для сепарации уноса широко применяется проволочная сетка. Для горизонтально установленной сетки при движении газа снизу навстречу стекающему потоку жидкости, постоянная K в уравнении (I-126) равна 0,107 ÷ 0,122 при атмосферном давлении. При работе под вакуумом она уменьшается, а при высоких давлениях увеличивается. В грубом приближении гидравлические потери на сухой проволочной насадке толщиной 100 мм равны одному скоростному напору газа, дополнительное сопротивление за счет смачивания составляет 0,8 скоростного напора при нормальных рабочих условиях. Более точная зависимость сопротивления сухой проволочной насадки как функция числа Рейнольдса на рис. I-139 сравнивается с зависимостью Кармана¹ для насадки из твердого гранулированного материала. Приведенные данные перекрывают обычный рабочий диапазон $Re=400 \div 6000$, причем в области малых значений Re , коэффициент трения, по-видимому, совпадает с вычисленным по уравнению Кармана.

Проволочные сетки применяются для улавливания уносимых капель в выпарных аппаратах и дистилляционных колоннах. Установка пакетов проволочных сеток в выпарном аппарате дает возможность при тех же размерах аппарата в несколько раз увеличить скорость выпаривания. Сетка действует настолько эффективно, что при упаривании раствора до 50% (по растворенному веществу) получается дистиллированная вода, содержание твердого вещества в которой порядка $1 \cdot 10^{-3}$. Сепараторы из проволочных сеток

¹ Ranz, Wong, Ind. Eng. Chem., 44, 1371 (1952).

² Ranz, Hofelt, Ind. Eng. Chem., 49, 288 (1957).

³ Katz, M. S. Thesis, Pennsylvania State Univ., 1958.

¹ Carman, Trans. Inst. Chem. Engrs., 15, 150 (1937).

устанавливаются в выпарных аппаратах для упаривания растворов найлона, вискозы, шелоков, глицерина, сахара и всех неорганических солей. В опреснителях морской воды с сепаратором из проволочной сетки получаемый конденсат содержит твердых веществ менее

в верхней части колонны дает возможность увеличить скорость пара в колонне или использовать более загрязненную исходную жидкость.

Было проведено исследование эффективности улавливания уноса проволочным сепаратором «Демистер»

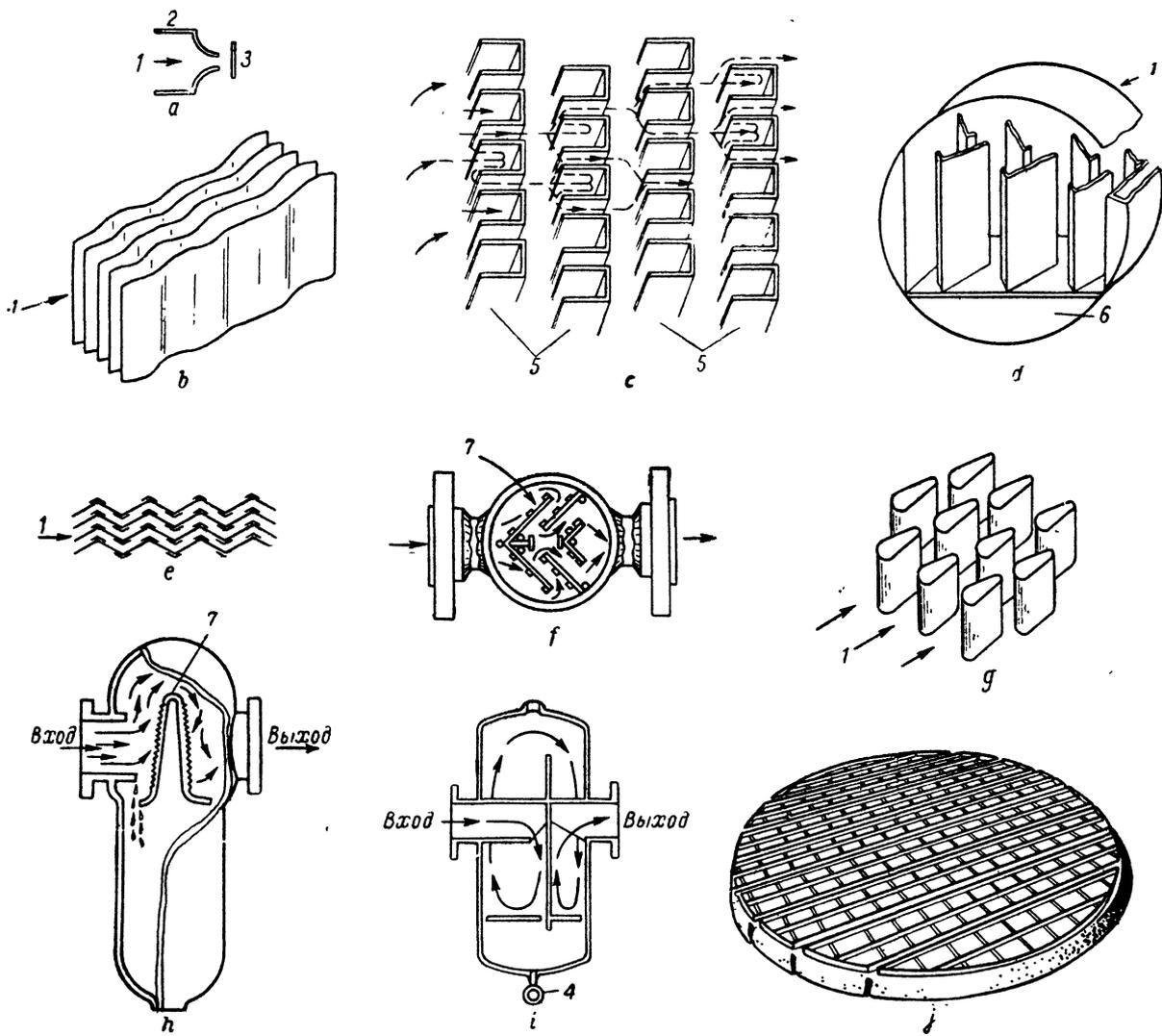


Рис. 1-136. Типовые сепараторы ударного действия:

a — струйный; *b* — из гофрированных пластин; *c* — из желобчатых пластин; *d* — сепаратор тумана «вентиляторного» типа; *e* — прямоугольный сепаратор «Пирлесс»; *f* — сепаратор Стронга; *g* — прямоугольный сепаратор Карбейта; *h* — горизонтальный сепаратор типа Е; *i* — сепаратор марки РЛ; *ж* — сепаратор из проволочных сеток «Демистер»; 1 — поток; 2 — насадка; 3 — отражательная пластина; 4 — дренажная линия; 5 — желобчатые пластины; 6 — сборник жидкости; 7 — направляющие перегородки.

2 частей на миллион. В паровых котлах эти сепараторы дают возможность получать чистый сухой пар с содержанием твердых веществ менее 0,5 частей на миллион.

В дистилляционных колоннах устранение уноса предотвращает распространение посторонних примесей вверх по колонне и попадание их в дистиллят. Когда чистота дистиллята является определяющим фактором, установка сетки в пространстве между тарелками или

при вакуумной дистилляции с помощью меченых атомов¹.

Опубликованы сравнительные данные по улавливанию тумана серной кислоты из хвостовых газов на насадке из 12-миллиметровых седел Берля, в сепара-

¹ Hoekstra, Snow, Braille, Curtice, Oil Gas J., 58 (1), 70, 58 (2), 70 (1960).

торе Карбейта, пористых керамических трубах и с помощью проволочной сетки¹. Сообщается, что из испытанных сепарационных устройств проволочная сетка дает максимальную эффективность при минимальном сопротивлении.

При работе смоченными оказываются нижние слои сеток. На рис. I-140 показаны дополнительные потери

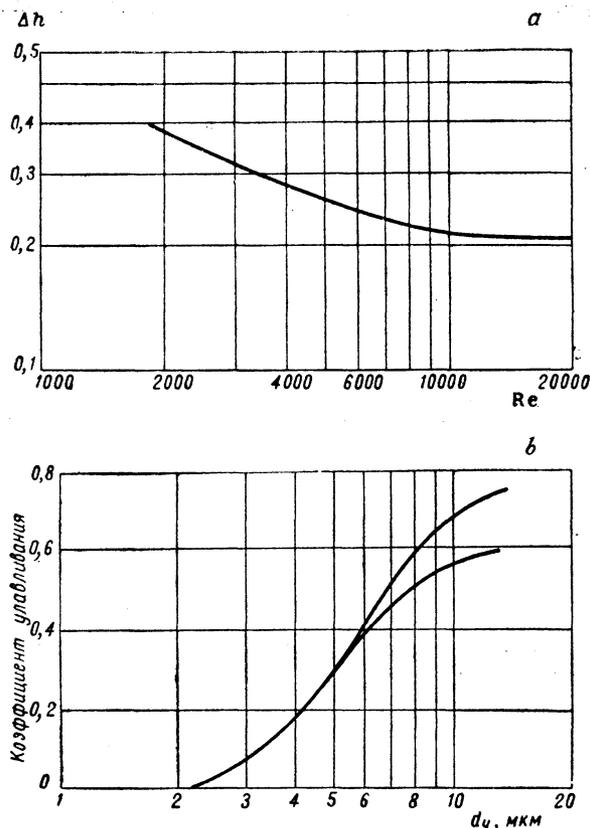


Рис. I-137. Сопротивление (а) и коэффициент улавливания сепаратора (б) из гофрированных пластин (Δh — потери скоростного напора на одну волну).

давления, вызванные этим явлением. Повышение сопротивления для пакетов различной толщины оказывается постоянным (100—300 мм). Сепарированная жидкость собирается в нижней части пакета и удерживается до тех пор, пока образующиеся капли не достигнут таких размеров, чтобы преодолеть поверхностное натяжение и силы трения со стороны газового потока. Кинетическая энергия уносимых газом капель также влияет на потери давления, однако этот фактор при теоретической обработке опытных данных не учитывается. Визуальное наблюдение за работой сепарационного пакета при нормальных условиях показало, что вода распространяется по пакету на 15—18 мм. Можно подсчитать эквивалентный размер смоченной проволоки (рис. I-141) для определения допол-

нительных потерь давления в этой части пакета. Этот параметр оказывает существенное влияние на эффек-

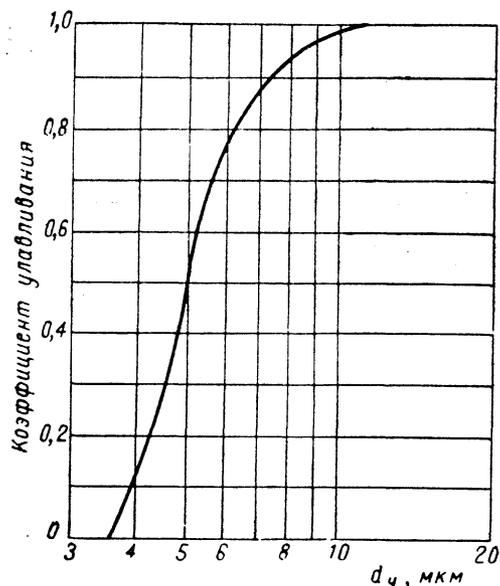


Рис. I-138. Коэффициент улавливания прямого сепаратора Карбейта.

тивность улавливания уносимых капель. Практика показала, что пакет из проволочных сеток эффективнее,

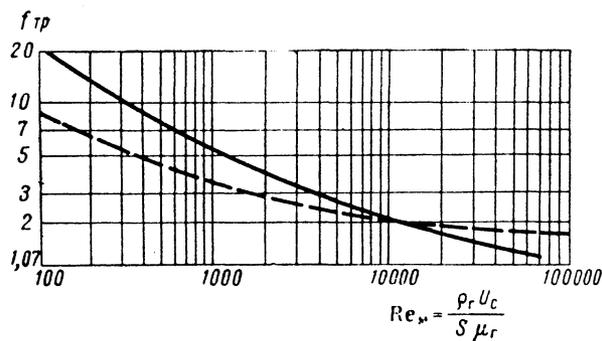


Рис. I-139. Корреляция по сопротивлению сухих пакетов из проволочных сеток:

$$\Delta P = \frac{f_{TP} l S \rho_g U_c^2}{g e^3}$$

где l — толщина пакета, м; S — удельная поверхность, m^2/m^3 ; ρ_g — плотность газа, kg/m^3 ; U_c — скорость газа в свободном сечении, м/сек; e — свободный объем в долях единицы; ΔP — сопротивление, kg/m^2 ; f_{TP} — фактор трения $1/m^2$; $Re_m = \frac{\rho_g U_c}{S \mu_g}$ — модифицированный критерий Рейнольдса, μ_g — вязкость газа, $kg/(m \cdot сек)$;
 ————— пакеты из проволочных сеток; - - - корреляция Кармана для гранулированной насадки с плотной укладкой.

когда жидкость, удерживаемая на сетке, полностью смачивает нижнюю поверхность сетки.

¹ Massey, Chem. Eng., 66 (14), 143, (1959).

Ренц и Уонг¹ исследовали влияние формы поверхности соударения на эффективность улавливания. На

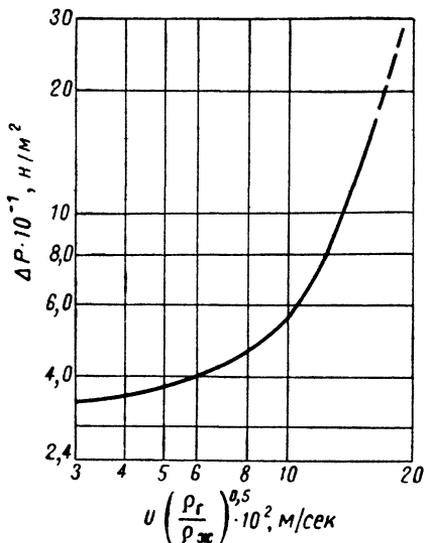


Рис. I-140. Возрастание сопротивления смоченных пакетов из проволочных сеток в зависимости от фактора $F = U \sqrt{\rho_r/\rho_{ж}}$ (где U — скорость газа, м/сек).

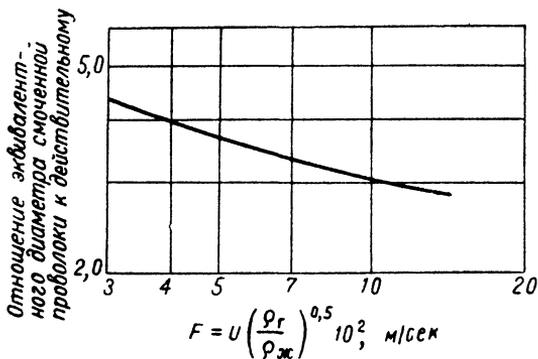


Рис. I-141. Зависимость отношения эквивалентного диаметра смоченной проволоки к действительному диаметру проволоки в зависимости от фактора $F = U \sqrt{\rho_r/\rho_{ж}}$. Необходимо учитывать поправочный множитель на размер смоченной проволоки (см. рис. I-139), имея в виду, что смочено 15,7 мм высоты пакета.

где $d_{ч}$ — диаметр частицы, а L — средняя длина свободного пробега молекул газа. Величина поправки уменьшается при возрастании размера частицы и для частиц размером 1 мкм при 25°С составляет 1,19. Для газов с низкой вязкостью поправка приближается к единице.

Экспериментальные кривые на рис. I-142 имеют меньший наклон, чем рассчитанные по любому из теоретических уравнений в предположении, что все частицы

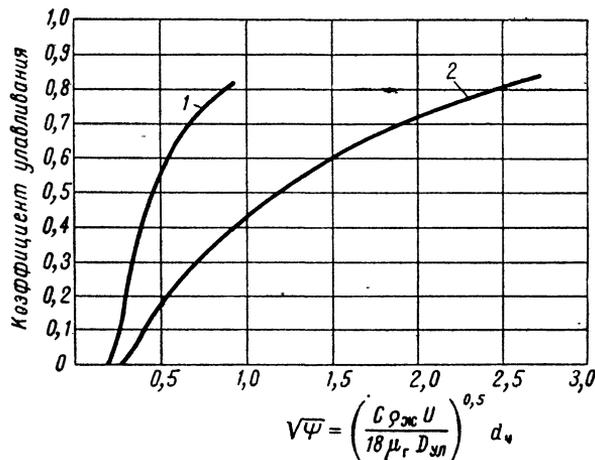


Рис. I-142. Эффективность улавливания при соударении с цилиндрической и сферической поверхностью: C — поправочный множитель из уравнения I-127; $\rho_{ж}$ — плотность частиц, кг/м³; U — скорость невозмущенного потока аэрозоля, м/сек; μ_r — вязкость газа, кг/(м · сек); $D_{ул}$ — диаметр улавливающей поверхности, м; $d_{ч}$ — диаметр частицы аэрозоля, м. Величина ψ безразмерна: 1 — сферическая поверхность; 2 — цилиндрическая.

имеют скорость, равную скорости газового потока. Приведенные кривые дают значения эффективности соударения только за счет инерции частиц. К ним должна быть добавлена эффективность захвата, так как можно предположить, что любая частица, центр которой проходит от собирающей поверхности на расстоянии, меньшем радиуса частицы, может быть захвачена и без участия инерционных сил. Эффективность захвата для цилиндра диаметром $D_{ц}$ может быть подсчитана по уравнению:

$$\eta_0 = \frac{d_{ч}}{D_{ц}} A \quad (I-128)$$

где $A = \frac{2 + (d_{ч}/D_{ц})}{1 + (d_{ч}/D_{ц})}$. При $d_{ч} \ll D_{ц}$ $A = 2$.

Общая эффективность равна сумме эффективностей соударения и захвата:

$$\eta_{обш} = \eta_0 + \eta \quad (I-129)$$

Доля частиц данных размеров, отделенная одним рядом собирающих поверхностей, может быть рассчитана по формуле:

$$N_C = a_L \eta_{обш} \quad (I-130)$$

где a_L — поверхность соударения ряда, выраженная в долях от общей площади поперечного сечения.

Большая часть из предложенных моделей дает завышенную по сравнению с опытом эффективность, но

¹ Ranz, Wong, Ind. Eng. Chem., 44, 1371 (1952).

можно разработать модель, которая позволит предсказывать извлечение частиц различных размеров, хорошо согласующееся с экспериментальными данными. Насадку из проволочных сеток можно рассматривать как сумму проволок, произвольно расположенных таким образом, что их проекции на плоскости любой ориентации будут одинаковыми. Такая насадка может быть представлена как состоящая из одинакового числа проволок, расположенных в трех взаимно перпендикулярных направлениях, одно из которых совпадает с направлением потока. Следовательно, величина, обратная значению корня квадратного из одной трети длины проволоки в единице объема насадки, дает значение стороны куба эквивалентной проволочной кубической

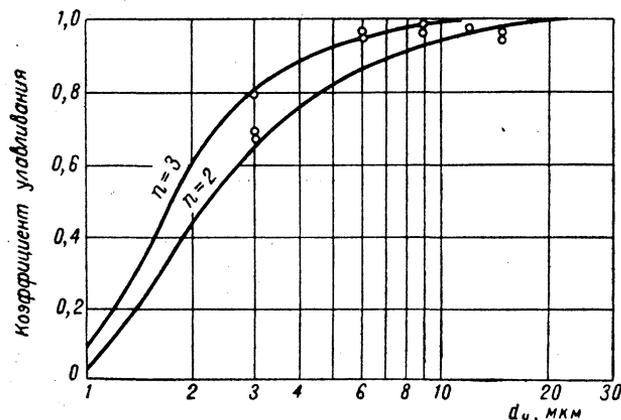


Рис. I-143. Сравнение экспериментальных данных с эффективностью улавливания, рассчитанной из условия, что поверхность соударения в единице поверхности решетки равна $n(1-\epsilon)$; $n=2$ и 3 (где ϵ — свободный объем насадки из проволочных сеток).

решетки. Эффективность, рассчитанная с помощью такой модели, значительно выше экспериментальной. Сетка из проволоки диаметром $0,28$ мм со свободной поверхностью, отнесенной к единице объема, равной $97,5\%$, обеспечивает поверхность соударения $20,4\%$ в каждой плоскости решетки. С другой стороны, если все проволоки будут распределены в решетке произвольным образом, открытая поверхность в любой плоскости будет такой же, как свободная поверхность единицы объема, и поверхность соударения составит только $2,5\%$ от приходящейся на плоскость правильной решетки. Эффективность улавливания, вычисленная на этой основе, приближительна, поскольку проволоки рассматриваются только как поверхность соударения, но не имеют размера в направлении, перпендикулярном направлению газового потока. В действительности поверхность соударения в среднем должна быть больше удельной свободной поверхности и, как показано на рис. I-143, коэффициент, лежащий в пределах от 2 до 3 , дает хорошее совпадение с имеющимися опытными данными.

Опыты проводились на насадке толщиной 150 мм из проволочной сетки (диаметр проволоки $0,15$ мм) со свободной поверхностью $98,6\%$. Эквивалентная кубическая решетка, рассчитанная в соответствии со сказанным выше, имеет сторону $1,62$ мм, следовательно, в рассматриваемой насадке будет содержаться 92 слоя такой решетки, из которых первые десять можно счи-

тать смоченными. Данные рис. I-143 относятся к параметру нагрузки $v(\rho_r/\rho_{ж})^{1/2} = 0,11$ и эквивалентному диаметру проволоки в первых десяти слоях $0,457$ мм. Общая эффективность улавливания подсчитывалась, исходя из поверхности соударения, равной двух- и трехкратному объему материала сетки, и с учетом полного перемешивания газа в промежутках между слоями решеток.

Эффективность улавливания в смоченных слоях определялась десятикратным увеличением фракционного проскока в каждом слое, а для остальных слоев сетки — 82 -кратным увеличением проскока. Установлено, что резкой границы между смоченными и сухими слоями не существует, но предположение о существовании таких гипотетических условий достаточно хорошо подтверждается данными по гидравлическому сопротивлению. При любом исследовании эффективности сепараторов первым испытанием теоретической модели должно быть определение степени совпадения расчетного перепада давления с экспериментальным. Только после того, как такое совпадение достигнуто, с помощью этой модели можно интерпретировать более сложный механизм сепарации уноса.

Экспериментальные величины лежат между двумя кривыми, показанными на рис. I-143, поэтому эффективность сетчатой насадки можно рассчитывать, приняв коэффициент, определяющий долю сплошной части объема сетки, равным $4,5$. Установлено, что этот коэффициент применим к данным, полученным для сепараторов «Демистер», изготовленных из проволоки $0,25$ мм. Данные, касающиеся улавливания больших частиц, противоречивы. Это может быть результатом повторного уноса жидкости с тыльной части насадки, так как испытание проводилось при скорости, несколько превышающей оптимальную для данной конструкции. По-видимому, повторно уносимые частицы крупнее, чем входящие в сепаратор; таким образом, сетчатая насадка при скорости, превышающей оптимальную, может использоваться для укрупнения частиц, а уносимые из нее частицы можно отделять с помощью более грубого сепаратора.

Сепарация малых частиц (порядка микрометра и менее) может быть осуществлена путем контакта струи газа с распыленными более крупными каплями жидкости. В этом случае большие капли работают как ударные поверхности, при этом их величина позволяет легко отделять их промышленными сепараторами.

Электростатический и акустический методы

Частицы жидкости мельче 1 мкм неудовлетворительно отделяются методами, основанными на использовании сил тяжести, центробежной или инерции.

Эти методы неэкономичны, так как чтобы придать частицам скорость, необходимую для их отделения от газа, требуется много энергии. Такие частицы ведут себя подобно твердым частицам того же размера и могут быть подвергнуты электростатическому осаждению (см. гл. III). Однако прекрасные результаты были получены при отделении тумана серной кислоты с помощью сепаратора «Демистер» из сетки.

Предложено также укрупнять частицы жидкости с помощью звуковых и ультразвуковых колебаний, но промышленного применения этот метод не получил. Источником колебаний может служить вибрирующий стержень или пластина, пульсирующий поток газа из сирены или воздушного свистка. Интенсивность поля при этом должна быть не меньше ~ 150 дБ. Коалесценция

зависит от момента, передаваемого частицам в результате пульсаций газового потока, пределы эффективной работы будут те же, что и для сепаратора ударного действия (но число частиц в единице объема должно быть достаточным для их объединения в большие капли). Эти специфические требования и невысокая эффективность генераторов звуковой энергии делает этот метод энергетически невыгодным для промышленного применения.

СИСТЕМЫ ГАЗ В ЖИДКОСТИ

Сепарация газа из жидкой сплошной среды представляется двумя принципиально различными случаями: 1) относительно устойчивую дисперсию (пену) необходимо «разрушить», сняв или уменьшив стабилизирующее воздействие; 2) нестабильную дисперсированную систему, которая поддерживалась механически или образовалась в результате распада пены, сепарируют на отдельные (но крупные) части, состоящие из гомогенной фазы. Эти части выводятся затем из контакта друг с другом. Последний случай довольно прост, тогда как первый сложен и какие-либо обобщения по нему получить практически невозможно.

Если пена используется в качестве среды, с помощью которой отделяется третья (твердая фаза), она обрабатывается как отдельно существующая фаза и сепарируется от основной массы жидкости с максимально возможной четкостью. После этого такая пена подлежит разрушению.

Разделение неустойчивых систем

Нестабильные дисперсии пузырьков в воде разделяются под действием плавучести (этот метод является особым случаем гравитационного осаждения). Смесь находится в состоянии покоя или ламинарного движения до тех пор, пока пузырьки не всплывут на поверхность. Ниже приводятся расчетные (по закону Стокса) скорости подъема пузырьков различной величины в воде при 20°С:

Диаметр пузырьков, мкм	10	30	50	100	200	300
Скорость подъема, м/сек	0,00006	0,00048	0,0014	0,0055	0,022	0,049

Можно приблизительно определить скорость подъема пузырьков в других жидкостях, умножив приведенные значения на плотность жидкости и разделив на ее вязкость¹. Для пузырьков крупнее 100 мкм погрешность велика, однако для пузырьков размером до 1 мм она меньше 15%. Более значительную ошибку вызывает предположение, лежащее в основе расчета приведенных величин: пузыри представляют собой твердые сферы. Как указывалось выше, скорость подъема пузырьков величиной от 100 мкм до 1 мм заметно возрастает за счет возникновения циркуляции внутри них, а для пузырьков размером 1 см и больше скорость значительно уменьшается из-за того, что пузырьки приобретают плоскую форму. Тем не менее и

в последнем случае скорость подъема настолько велика, что делает проблему сепарации тривиальной.

В качестве сепараторов могут применяться емкости, работающие периодически или непрерывно, а также желоба. Ввиду того, что скорость сепарации (скорость подъема пузырьков) может быть очень небольшой, используются обычно невысокие сосуды или лотки. При деаэрации высоковязких смазочных материалов и лаков жидкость перетекает в виде тонкой пленки по твердой поверхности; для ускорения процесса отделения за счет увеличения размеров пузырьков может применяться вакуумирование пространства над пленкой жидкости. В деаэрационной машине «Версатор» (фирма Cognel Machine Co) вязкая жидкость протекает через вращающуюся камеру, по стенкам которой жидкость распределяется в виде пленки под действием центробежной силы. Жидкость освобождается от газа за счет вакуума, создаваемого в системе.

Следует иметь в виду, что скорость перемещения жидкости не должна превышать скорость подъема пузырьков.

Разделение пены

Пена, состоящая из газовых пузырей, разделенных тонкими пленками жидкости, распадается в результате разрушения этих пленок. Любой фактор, способствующий стеканию или увеличению неустойчивости пленки способствует разрушению пены.

Химические пеногасители. Химические вещества, которые при добавлении в дисперсию газа в жидкости ускоряют разрушение пены, называются пеногасителями. Промышленные пеногасители обычно вызывают очень быстрое разрушение пены, в которую они добавлены. Концентрацию таких веществ, обычно принято измерять числом частей на миллион частей обрабатываемой дисперсионной системы.

Химические пеногасители в целом разделяются на два класса: на растворимые в жидкости пенной системы и на совершенно нерастворимые. Растворимые вещества являются полярно-неполярными соединениями (подобно водным ПАВ). При других условиях многие из этих веществ могут способствовать образованию пены¹. По этой причине концентрация, при которой эти вещества эффективны как пеногасители, является критической и их использование ограничено. Иногда они используются в качестве носителей нерастворимых пеногасителей.

Нерастворимые пеногасители обычно сочетают малую летучесть, легкую диспергируемость, высокую смазывающую способность, поверхностное натяжение и ориентацию. Малая летучесть важна для предотвращения потерь пеноподавляющего вещества, прежде чем оно будет диспергировано и выполнит свою функцию. Способность к диспергированию и смазыванию необходима для обеспечения высокой эффективности воздействия малых количеств веществ. Способность пеногасителя концентрироваться в пленке и изменять природу пленки в направлении снижения ее устойчивости является весьма существенной его функцией.

Химические пеногасители делятся на следующие классы:

1. **Алифатические кислоты и эфиры.** Обычно это соединения несколько повышенного молекулярного веса, хотя этилацетат и диэтилмалонат использовались для

¹ Очевидно, следует умножать на относительную плотность, делить на относительную вязкость (по отношению к воде). — *Прим. ред.*

¹ Schwartz, Perry, Surface Active Agents, vol. I, ch. 29, New York, 1949.

регулирования пенообразования при пенной флотации руды¹.

Примеры использования: бумажная промышленность, где жирные кислоты и жирнокислотные эфиры многоосновных спиртов регулируют образование пены в суспензиях древесной пульпы²; в красках на водной основе добавление от 0,5 до 2% диэтилфталата разрушает пену, которая в противоположном случае вызывает появление дефектов красочного покрытия³; в пищевой промышленности пена яичного белка концентрируется во время сушки с помощью олеата глицерина при концентрации 0,01% (с протеиновым ферментом)⁴; в смазочных материалах и других безводных системах, где для улучшения эффективности требуются высококислотные органические соединения, содержащие такие группы, как —COOR, —CO и —OH в таком количестве, чтобы в молекуле содержалось до 25% кислорода⁵.

2. **Спирты.** Спирты с умеренно высоким молекулярным весом, одно- и многоосновные, широко используются в качестве пеногасителей. Примеры: октиловый спирт, долгое время используемый в качестве пеногасителя в дистилляционных колоннах, применяется также в процессах брожения⁶ и во многих других промышленных процессах; кубовый остаток от дистилляции алифатических спиртов в диапазоне от C₁₂ до C₂₀ устраняет пенообразование в процессах изготовления бумаги⁷; растворы концентрации 10—15 частей олеинового спирта на миллион частей моноэтаноламина гасят пену при абсорбции сероводорода и двуокиси углерода из природного газа⁸.

3. **Сульфаты и сульфонаты.** Эти вещества особенно полезны в безводных системах и в водно-безводных смесях, однако они находят ограниченное применение и для полностью водных систем. Примеры: экстрагирование сероводорода из сырой нефти⁹; в системах для смазки машин эффективна смесь ПАВ с сульфатами и с сульфонатами, которая уменьшает поверхностное натяжение нерастворимого в масле многоосновного спирта до более низкого, чем у воды¹⁰; в процессах гидрохлорирования алифатических спиртов рекомендуется добавлять от 5 до 25 частей на миллион соли алкиларилсульфоуксусной кислоты¹¹.

4. **Омыленные жирные кислоты.** Используются щелочные, щелочноземельные и другие соединения металлов с жирными кислотами. Примеры: стеарат алюминия в концентрации от 0,05 до 3% подавляет пенообразование смазочных масел¹²; стеарат натрия предотвращает появление пены при промывке выхлопных газов, образующихся в процессе получения уксусной кислоты¹³.

5. **Азотсодержащие соединения.** Амины, амиды и полиамиды являются превосходными средствами для гашения пены и используются в частности для предотвращения пенообразования в котлах. Пиридин, хинолин и четырехосновные соединения также являются пеногасителями. Примеры: алкиламины используются

как пеногасители воды, питающей котлы¹; применяются также высокомолекулярные соединения с азотзамещенной амидной группой в концентрациях от 20 до 200 частей на миллион²; полиамиды, такие как ацилпроизводные пиперазина, также имеют пеноподавляющее свойство³; алифатические амины, содержащие 8—18 атомов углерода в молекуле в смеси с неионным ПАВ в соотношении 0,01—0,05 частей ПАВ к амину используются в виде 2—50% раствора в минеральном масле для подавления пенообразования в сточных водах⁴. Гендерсон и Бодс⁵ сообщили, что эффективность использования полиамидов в качестве пеногасителя в котлах локомотивов повышается при добавлении экстракта из каштанов. Полагают, что последний легче абсорбируется котельной накипью и поэтому амид абсорбируется им в меньшей степени.

6. **Фосфаты.** Особенно широкое применение фосфаты нашли в системах переработки нефти, но этим их использование не ограничивается. Примеры: добавление от 0,01 до 1% алкилалкилендифосфата предотвращает образование пены в смазочных маслах⁶.

7. **Силконы.** Кремнийорганические соединения стоят в ряду веществ, наиболее эффективно подавляющих и разрушающих пену. Могут также использоваться аналогичные соединения германия. Это сравнительно новые материалы и их способность гасить пену обнаружена совсем недавно. Они бесспорно стали серьезными соперниками других промышленных пеногасителей, благодаря удачному сочетанию активности, широкого диапазона эффективности и чрезвычайной химической инертности. Силконы могут иметь низкую и высокую вязкость, однако наилучшие результаты в неводных системах получены, когда пеногаситель низкой вязкости применяется в высоковязкой пенообразующей системе и наоборот. Иногда применяется силикон, абсорбированный кремниевым пористым наполнителем, который распределяет пеногаситель по всей пенообразующей системе⁷. Примеры: патентованные кремнийорганические соединения в допустимых количествах (менее 10 частей на миллион) применяются для гашения пены при изготовлении джемов и вин⁸; три- и тетраалкилсиланы, растворенные в растворимых или нерастворимых в воде растворителях подавляют пену, образующуюся при брожении⁹; кремнийорганический полимер, содержащий кремний при концентрации 0,05%, эффективно предотвращает пенообразование при варке лака¹⁰; диметилловые кремнийорганические полимеры позволяют проводить дистилляцию летучих составляющих из латекса синтетических эластомеров без образования пены¹¹; вязкие метилловые кремнийорганические соединения (5 частей на миллион) гасят пену в смазочном масле¹²; циклические тримеры диалкила окиси германия являются пеногасителями для подшипниковых масел¹³.

8. **Сульфиды и тиопроизводные.** Эти вещества часто смешивают с другими пеногасителями. Пример:

¹ Denman, US Pat. 2363923.

² Bird, US Pat. 2428775.

³ Jacoby, US Pat. 2428801.

⁴ Edwards, Rittershavsen, US Pat. 2906712.

⁵ Gunderson, Bodach, Ry, Eng. a. Maintenance, 47, 447 (1951).

⁶ Smith, Cantrell, US Pat. 2220485.

⁷ General Electric Co., Bull. CDS-204, Silicone Antifoams, Watford, 1959.

⁸ Dow Corning Corp., Ref. 1-107, Dowcorning Silicone Products, Midland, 1954.

⁹ Ciba Ltd., Swiss Pat. 257713.

¹⁰ Vail, Anal. Chem., 19, 506 (1947).

¹¹ Walker, Morrow, US Pat. 2482307.

¹² Trautman, Lubricating Eng., 2, 143 (1946).

¹³ Trautman, Ambrose, US Pat. 2416360.

¹ Либман, Цветные металлы, № 7—8, 28 (1932).

² Jurisch, US Pat. 2923687.

³ Iddings, Kennedy, US Pat. 2045551.

⁴ Frey, Miller, US Pat. 2358324.

⁵ Barsoff, Clayton, US Pat. 2430856-7; 2528465-6.

⁶ Steibelt, Germ. Pat. 602087.

⁷ Hwa, US Pat. 2903432.

⁸ Reed, US Pat. 2390899; Petrol. Processing, 2, 907 (1947).

⁹ Nixon, Jarbroff, US Pat. 2341878.

¹⁰ Trautman, US Pat. 2603599.

¹¹ Karlson, Oakley, US Pat. 2497150.

¹² Zimmer, US Pat. 2336613.

¹³ Osterloh, Vatile, Pyle, Ficke, US Pat. 2169369.

металлические производные тиоэфиров в связи с органическими фосфатными эфирами подавляют пенообразование в смазочных маслах¹.

9. Галогенсодержащие вещества. Все галогенсодержащие углеводороды предотвращают появление пены, но низкомолекулярные соединения менее эффективны из-за высокой летучести. Наиболее употребительны вещества с высоким содержанием галогенов и полимеризованные соединения. Примеры: фтор- или фторхлорпроизводные углеводородов с 5—50 атомами углерода в молекуле подавляют образование пены в смазочных маслах и консистентных смазках².

10. Природные пеногасители. Растительные масла и смолы, минеральные масла и сульфопроизводные растительных, минеральных и животных масел и жиров находят широкое применение в качестве пеногасителей. Первые рецепты пеногасителей появились именно в этом классе. Многочисленные и разнообразные примеры их использования можно найти в специальной литературе³.

11. Неорганические вещества. Некоторые неорганические соли нашли применение в качестве пеногасителей. Примеры: монофосфат натрия в смеси с борной кислотой и этилкарбонатом предотвращает образование пены при дистилляции сополимеров латекса с целью отделения стирола⁴; бентонит в концентрации от 0,01 до 1% уменьшает пенообразование возвратной воды в процессах экстракции сахара⁵.

Недостаток химических пеногасителей состоит в том, что они дополнительно загрязняют технологический поток и продукт. Однако они часто инертны и применяются в столь малых количествах, что их использовать можно почти всегда, даже если к чистоте продукта предъявляются высокие требования, например, в фармакологии или в пищевой промышленности.

Предотвращение пенообразования. Некоторые специфические вещества при добавлении к материалам, склонным к образованию пены, препятствует ее возникновению.

Типичными составляющими антипенных присадок являются эфиры жирных кислот, металлические мыла и углеводороды. Правильный состав и соотношение веществ в смеси, образующей присадку, должны определяться на основании пробных испытаний, так как они изменяются в зависимости от пенообразующего материала.

Автоматический контроль образования пены. При переработке материалов, образующих пену, может оказаться выгодной установка системы автоматического контроля и регулирования уровня пены. Характерным примером является промышленный процесс ферментации при получении антибиотиков.

Системы контроля⁶ состоят в основном из электрода-датчика, который срабатывает при контакте с пеной; сереноида, открывающего пеногасящему агенту доступ в сосуд; реле времени для регулирования отрезка времени (а следовательно, и объема) подачи пеногасителя (рис. I-144). Может применяться также отключающая система для предотвращения избыточной подачи пеногасящего агента в случае медленного спада пены или повторного ее подъема.

Физические методы разрушения пены. Помимо химических пеногасителей (или совместно с ними) могут применяться физические методы, ускоряющие разрушение пены. Пенная структура может подвергаться механическому, термическому или электрическому воздействию.

Механические методы. Для разрушения пены или регулирования ее уровня с переменным успехом применяются неподвижные или вращающиеся пеноразбиватели. Вращающийся пеноразбиватель над свободной

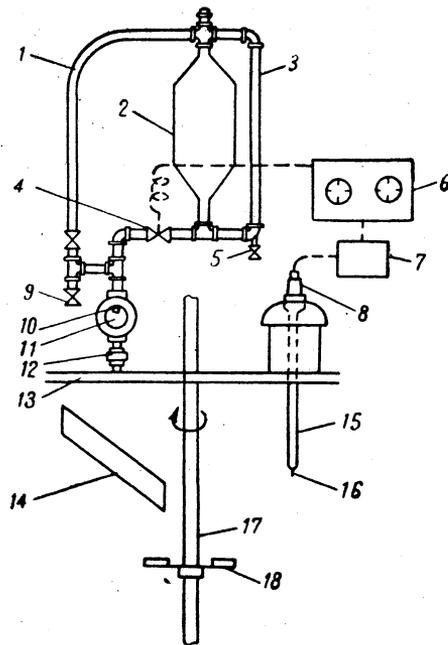


Рис. I-144. Система автоматического регулирования высоты пены в ферментаторе:

1 — уравнительная линия (по давлению); 2 — масляный бачок; 3 — уровень; 4 — регулируемый клапан; 5 — дренажная линия; 6 — реле времени; 7 — детектор; 8 — соединительная муфта; 9 — спускной кран; 10 — сливной наконечник; 11 — смотровое стекло; 12 — муфта; 13 — крышка ферментатора; 14 — отражательная перегородка; 15 — гуммированный электрод; 16 — датчик электрода; 17 — вал мешалки; 18 — пеногаситель.

поверхностью жидкости разбивает пену при ее подъеме, отбрасывая к стенкам сосуда освобожденную жидкость, которая при этом срезает пену в кольцевом пространстве вокруг пеноразбивателя. В некоторых случаях неподвижные перегородки или близко расположенные друг к другу пластины, находящиеся в контакте с поднимающейся пеной, помогают удерживать ее уровень. По-видимому, важным обстоятельством является смачиваемость их поверхностей жидкостью, образующей пену.

Шкодин¹ установил, что пена разрушалась от соприкосновения со стержнем, покрытым воском, в то время как чистый стеклянный стержень не оказывал на нее влияния.

¹ Evans, Elliot, Brit. Pat. 596150.

² Davis, Zimmer, US Pat. 2394596; Zimmer, Rosen, US Pat. 2449631.

³ Currie, в кн. Bickerman «Foams», ch. 15, New York, 1953.

⁴ Craig, US Pat. 2432386.

⁵ Neumann, Beck, Brit. Pat. 580620.

⁶ Nelson, Maxon, Elferdink, Ind. Eng. Chem., 48, 2183 (1956). — Kroll et al., Ind. Eng. Chem., 48, 2190 (1956).

¹ Шкодин, Коллоид. журн., 14, 213 (1952).

Акустические колебания также иногда разрушают пену. Установлено, что колебания с частотой 6000 *гц* разрушают пену, образующуюся при флотации угля¹, а высокочастотные колебания воздуха используются для регулирования пенообразования в выпарных аппаратах для сахарного сиропа².

Термические методы. Пена, соприкасающаяся с горячей поверхностью или находящаяся вблизи нее, обычно разрушается. Такое действие обусловлено, по-видимому, испарением. После того, как достаточное количество жидкости выделяется из стенки пузырька, он разрушается. Горячая проволока, помещенная над кипящей и образующей пену жидкостью, разрушала пену, если она оказывалась в 1 *см* от проволоки³. Искровой разряд также разрушает пену⁴, и, возможно, это обусловлено его тепловым воздействием.

В промышленных аппаратах пена часто ослабляется или вообще не возникает, из-за того что над поверхностью жидкости размещается паровой змеевик. В этом случае часто растворенное вещество откладывается на греющей поверхности, что нежелательно.

Электрические методы. Известно, что электрическое поле ослабляет или разрушает пену, хотя механизм этого явления неясен. Два электрода, помещенные в массу пены, разрушают ее при разряде через пузырьки¹. Разрушающее действие α -частиц² может быть в принципе электрическим или представлять собой комбинацию электрического и механического воздействия.

Расчетные данные по механическому способу разрушения пены отсутствуют ввиду того, что этому методу было посвящено мало количественных исследований.

Для выбора эффективного метода разрушения требуется экспериментальная работа с конкретной пенной системой, подлежащей разделению.

¹ Sun, Mining Eng., 3, 865 (1958).

² Parlow, Zucker, 3, 468 (1950).

³ Gastrock, Reid, Ind. Eng. Chem., Anal. Ed., 10, 440 (1938).

⁴ Schurmann, Ind. Eng. Chem., Anal. Ed., 11, 287 (1939).

¹ Gunderson, US Pat. 1984210.

² Chaminade, Compt. rend., 224, 480 (1949). — Ader, J. Phys. radium, 11, 198 (1950).

Глава вторая

СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЬ— ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО

Ю. Смит (J. C. Smith) при участии Ч. Эмблера (Ch. M. Ambler),

Л. Буллока (H. L. Bullock), Д. Дальстрема (D. A. Dahlstrom),

Л. Дейла (L. A. Dale), Р. Эмметта (R. C. Emmett), Фр. Гарнхэма (C. F. Curnham),

Р. Мак-Намары (R. F. McNamara), А. Михельсона (A. W. Michalson),

Ш. Миллера (Sh. A. Miller), Ю. Нарди (J. Nardi), Дж. Олдшу (J. Y. Oldshue),

Т. Робертса (J. T. Roberts) и Э. Вравлика (E. R. Vrablik).

**Транспортирование взвесей, перемешивание и оборудование для выщелачивания и
ионообмена** — перевод и редакция И. С. ПАВЛУШЕНКО

Сушка, отжимание и отстаивание — перевод А. В. ПЛИССА под редакцией
П. Г. РОМАНКОВА

Фильтрация — перевод и редакция В. А. ЖУЖИКОВА

Центрифугирование — перевод и редакция В. И. СОКОЛОВА

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Транспортирование взвесей	113	Отстаивание под действием силы тяжести	161
Материалы, транспортируемые в виде взвесей	113	Классификация суспензий. Методы испытаний	161
Расчеты и выбор трубопроводов	114	Размеры отстойников	162
Экономика	115	Сгустители	164
Перемешивание подвижных сред	115	Осветлители	170
Аппараты для перемешивания	116	Непрерывная противоточная декантация	173
Гидромеханика перемешивания	119	Фильтрование	176
Типовые процессы	122	Теория фильтрования	176
Мощность, потребляемая мешалками	126	Практическое значение уравнений фильтрования	177
Моделирование	128	Применение теории фильтрования к обработке опытных данных	179
Экономика	129	Фильтровальные перегородки	179
Литература	129	Предварительные опыты на элементах фильтра	180
Выщелачивание	130	Вспомогательные вещества, применяемые при фильтровании	182
Определение	130	Конструкции фильтров	182
Оборудование для выщелачивания	130	Аппараты для фильтрования с образованием осадка	182
Ионообмен	132	Фильтры, работающие под давлением (общие сведения)	183
Общая характеристика оборудования	132	Фильтры периодического действия, работающие под давлением	184
Типичная ионообменная колонна	133	Фильтры непрерывного действия, работающие под давлением	195
Ионообменники со смешанным слоем	134	Вакуум-фильтры (общие сведения)	196
Автоматизация ионообменных установок	135	Вакуум-фильтры периодического действия	197
Ионообменная обработка воды	135	Вакуум-фильтры непрерывного действия	197
Ионообменные процессы в химической технологии	137	Фильтры-сгустители	205
Литература	141	Осветительные фильтры	205
Смешивание и обработка паст	141	Выбор фильтрующего оборудования	208
Простое смешивание	142	Литература	208
Диспергирование	142	Центрифугирование	209
Выбор оборудования	143	Величина центробежной силы	209
Стандартные типы оборудования	143	Напряжения в цилиндрических стенках ротора центрифуги	209
Теплопередача	153	Материалы для изготовления центрифуг	210
Выбор способа проведения процесса и необходимого оборудования	153	Критическое число оборотов	210
Литература	155	Осадительные центрифуги	211
Сушка с перемешиванием	155	Технические характеристики осадительных центрифуг	215
Применение	155	Теория центрифугального осаждения	216
Проектные и рабочие данные	155	Фильтрующие центрифуги	217
Экономика	157	Теория центробежного фильтрования	221
Отжимание	157	Вспомогательное оборудование для центрифуг	221
Оборудование для отжимания	157	Предварительная подготовка перерабатываемой жидкости	222
Теория отжимания	159	Экономическая характеристика центрифуг	222
Литература	161	Выбор типа центрифуг	223
		Литература	226

ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ ВЗВЕСЕЙ¹

Большие массы материалов можно перемещать по трубопроводам или открытым каналам методами, сходными с теми, которые применяют при транспортировке жидких сред, — в виде взвесей, образующихся в результате смешивания твердых материалов с подходящей жидкостью. Этот способ транспортировки материалов не нов и используется в промышленности с 1850 г. В настоящее время он широко применяется в заводской практике и в меньшей степени — для перемещения твердых материалов на расстояния до 150 км. В таких отраслях промышленности, как угледобывающая, горная и горно-обогатительная, этот вид транспорта материалов распространен больше, чем какой-либо другой. К числу материалов, которые можно транспортировать таким способом, относятся уголь, антрацитовый шлам, зола и огарки, отходы при промывке угля, фосфатная руда, фосфатная пульпа, глина, медно-никелевые концентраты. Кроме того, закончено строительство ряда трубопроводов или проектируются трубопроводы для транспортировки рассола, гильсонита, древесной массы и никель-кобальтовых кристаллов.

При транспортировании твердых материалов в виде взвеси необходимо выполнение некоторых предварительных операций, а именно: материалы должны быть измельчены, рассортированы по крупности и смешаны с жидкостью. Для выделения твердых веществ из взвеси может потребоваться фильтрование и сушка. Знание этих процессов (которые рассматриваются в других разделах настоящей главы) безусловно необходимо при изучении транспортирования взвесей. Кроме того, предполагается, что читатель хорошо знаком с теорией работы насосов и течения гомогенных жидкостей.

МАТЕРИАЛЫ, ТРАНСПОРТИРУЕМЫЕ В ВИДЕ ВЗВЕСЕЙ

Вообще говоря, технически возможно перемещение в виде взвесей любых твердых материалов, если соблюдаются следующие три условия.

1. Твердые материалы не должны подвергаться какому-либо нежелательному химическому или физическому изменению в результате смешивания с жидкостью или при выделении из жидкости, а также собственно при транспортировании в виде взвеси.

Если на какой-либо стадии процесса имеют место нежелательные изменения в массе материала, то очевидно, что этот метод транспортирования непригоден. Если между твердым веществом и несущей жидкостью происходит необратимая химическая реакция, то транспортировать материал в виде взвеси нельзя. Также нежелательны и изменения физических свойств материала.

Горное бюро США при изучении процесса транспортировки бурого угля установило¹, что происходящее при этом уменьшение размеров частиц делает процесс экономически нецелесообразным. Высокосортные же угли измельчаются в значительно меньшей мере и поэтому их транспортировка потоком жидкости вполне возможна. Агломерация частиц, происходящая во время транспортирования, увеличивает возможность использования этого метода для перемещения данного материала.

Не все химические или физические изменения нежелательны, и в некоторых случаях те или иные процессы влияют положительно. Например, растворение некоторого количества частиц и образование рассола при перемещении кристаллов соли в воде играет положительную роль. Частичное растворение сахара при транспортировании срезаемых стеблей тростникового сахара водой несколько сокращает время последующей операции экстракции. Применительно к интересам целлюлозно-бумажной промышленности изучена возможность транспортирования древесной щепы в водном растворе соответствующих химикалиев с тем, чтобы за время перемещения происходило частичное размягчение массы.

2. Вязкость взвеси не должна изменяться в широких пределах.

Во многих случаях вязкость взвесей зависит от величины напряжения сдвига. Это явление проявляется в одной из следующих четырех форм:

а) *псевдопластичные* суспензии обнаруживают уменьшение вязкости с увеличением напряжения сдвига;

б) *дилатантные* суспензии обнаруживают увеличение вязкости с увеличением напряжения сдвига;

в) *тиксотропные* суспензии обладают структурой, разрушение которой зависит как от времени, так и от напряжения сдвига. На графике зависимости скорости сдвига от напряжения сдвига обнаруживается гистерезисная петля, площадь которой является мерой тиксотропности;

¹ Durand, Condolios, Hydraulic Transport of Coal and Other Solid Materials in Pipes, National Coal Board, Great Britain, Nov. 5—6, 1952. — Lammer s et al., US Bur. Mines Rept. Invest. 5404, 1958.

¹ Lammer s et al., US Bur. Mines Rept. Invest. 5404, 1958.

г) *реопектичные* суспензии являются формой тиксотропных суспензий, в которых структура образуется (и вязкость быстро повышается), если они подвергаются ритмичному встряхиванию или постукиванию.

Реопектичные суспензии, как правило, по производственным трубопроводам прокачивать невозможно. Другие суспензии можно транспортировать по трубам, если их вязкость не слишком велика. Тиксотропные суспензии (такие как молоко, сырая нефть) транспортируются по трубопроводам без особых затруднений.

При проектировании любой системы для транспортирования взвесей инженер обязан знать трудности, которые могут встретиться. Как правило, некоторые весьма простые испытания суспензий на ротационном вискозиметре дают достаточные представления о возможных изменениях вязкости.

3. Размеры частиц не должны быть слишком велики.

Большие частицы, величиной 100 мкм и более, можно транспортировать при следующих условиях:

- а) частицы составляют относительно малую долю общего количества твердой фазы;
- б) частицы имеют сферическую форму;
- в) жидкость движется с большой скоростью;
- г) плотность твердых частиц мало отличается от плотности жидкости.

Все эти четыре условия выполняются не всегда. Чем полнее они удовлетворяются, тем большими могут быть размеры транспортируемых частиц.

Для данного твердого материала (определенной плотности, с частицами определенной формы) и для данной жидкости выбор размеров частиц диктуется экономическими соображениями. Материал с более крупными частицами дороже транспортировать, но материал с более мелкими частицами дороже дробить, сепарировать и высушивать (при необходимости). Если требуется значительная степень измельчения, то некоторое количество материала может оказаться раздробленным столь тонко, что для дальнейшего технологического использования будет непригодно.

РАСЧЕТЫ И ВЫБОР ТРУБОПРОВОДОВ

Гидравлические расчеты. До настоящего времени, в основном из-за особой сложности рассматриваемых систем, еще не разработана теория, полностью описывающая все возможные типы потоков суспензии. На характер движения оказывают влияние как перепад давления, так и концентрация твердой фазы в жидкости. Для определения многих свойств твердых частиц, например таких, как размеры и форма частиц, не существует простых и точных методов. Другой причиной, задерживающей развитие теории, является недостаточное количество экспериментальных исследований в этой области.

Большинством авторов взвеси разделяются на два различных вида: однородные коллоидные суспензии; смеси твердых веществ, свободно осаждающихся в инертном жидком носителе, которые не обладают коллоидными свойствами.

Первый вид взвесей характеризуется малыми размерами частиц и высокой концентрацией твердой фазы. Второй вид отличается крупными размерами частиц и низкой концентрацией твердого вещества. Конечно, в промышленной практике встречаются случаи, когда такое четкое разграничение невозможно, но в большинстве случаев все же свойства взвесей приближаются к одному или другому виду. Для обоих видов взве-

сей установлено существование двух типов течения: вязкого (или пластичного) и турбулентного.

Расчетное определение потерь давления (как и в случае движения несжимаемых ньютоновских жидкостей) в зависимости от режима течения будет производиться различно. В потоке взвеси, однако, природа этих двух режимов течения не столь ясна, как в случае течения истинной жидкости, и точка перехода от одного режима к другому не может быть установлена достаточно надежно. При существующем уровне знания нельзя даже установить, обосновано ли это разграничение на два режима течения действительным различием механизма течения взвесей или просто является удобным эмпирическим приемом, упрощающим задачу определения потерь давления.

Большая часть коллоидных однородных суспензий ведет себя как неньютоновские жидкости. Для расчета потерь давления при движении суспензий этого типа может быть использована теория течения неньютоновских сред, изложенная в гл. II.

В промышленной практике встречаются как вязкое, так и турбулентное течение потоков взвесей. В некоторых случаях, например при производстве цемента, движение большей части потоков обычно происходит в вязком режиме.

Неоднородные суспензии представляют собой такие смеси твердых веществ и жидкости, в которых твердая фаза способна быстро осаждаться, если этому не препятствует скорость движения потока жидкости. В условиях вязкого режима течения суспензий этого типа нельзя достичь никаких практических успехов, поскольку при ламинарном режиме в жидкости отсутствуют составляющие скорости, нормальные основному направлению движения потока, и, следовательно, нет вихревых токов, препятствующих осаждению твердых частиц. Поэтому при транспортировании неоднородных суспензий прежде всего необходимо поддерживать столь высокие скорости движения, чтобы режим течения был турбулентным.

Методы расчетного определения потерь давления для потоков этого типа приведены в гл. II. Теория, изложенная в этой главе, рассматривает два вопроса, важных при проектировании трубопроводов для суспензий:

1) для каждой системы существует критическая скорость, ниже которой частицы твердой фазы будут осаждаться;

2) для каждой системы существует скорость, при которой градиент давления будет минимальным.

В большей части опубликованной литературы имеются сведения о том, что эти две скорости приблизительно одинаковы. Последнее весьма важно с экономической точки зрения, так как указывает на целесообразность эксплуатации трубопроводов для суспензий в условиях, наиболее близких к тем, при которых возможно осаждение частиц твердой фазы.

Выбор труб. Трубопроводы, используемые для транспортировки различных суспензий, изготавливают из самых разнообразных материалов. В горной промышленности для желобов и труб широко применяют дерево. В качестве материалов для труб употребляют также сталь и чугун. При сооружении коротких трубопроводов для весьма абразивных суспензий используют сталь, легированную хромом. Возможно применение и других материалов. Для трубопроводов, работающих под высоким давлением, по-видимому, более всего пригодна углеродистая сталь, обеспечивающая необходимую прочность и сопротивление механическому износу обычно при минимальной стоимости сооружения.

Толщина стенки трубы зависит от внутреннего давления и механического износа, вызываемого частицами твердого материала. Технических условий или стандартов, определяющих толщину стенки трубы в зависимости от внутреннего давления в трубопроводах для суспензий, не существует. Имеются, однако, правила расчета минимальной толщины стенки трубы для транспортировки жидкостей. Эти правила могут быть принятой основой расчета трубопроводов и для суспензий. Запас на механический износ следует выбирать в зависимости от свойств применяемого материала. Так, например, в настоящее время при проектировании трубопроводов для суспензий прибавку на механический износ и коррозию принимают примерно равной 6,5 мм. Эта величина практически не отличается от толщины стенки, необходимой для того, чтобы труба могла выдержать внутреннее давление.

Диаметр трубы зависит от размера частиц, которые перемещаются по трубе. Во избежание забивки линии рекомендуется¹ диаметр трубы принимать по крайней мере в три раза большим диаметра самой крупной частицы.

Следует также заботиться об уклоне трубопровода. Если течение потока по каким-либо причинам должно останавливаться, то твердая фаза будет осаждаться. В случаях, когда после прекращения движения взвеси предусматривается осушка или очистка трубопровода, выбор уклона линии никак не ограничивается. Если, однако, после прекращения движения потока взвеси трубопровод не может быть очищен, то уклон линии должен быть меньше угла естественного откоса материала, составляющего твердую фазу суспензии.

Выбор насосов. Для перемещения взвесей используют как центробежные, так и поршневые насосы. Центробежные насосы вполне отвечают требованиям, предъявляемым при работе с большинством суспензий. Рабочие колеса этих насосов делают из хромовых или никелевых сплавов, обладающих превосходным сопротивлением истиранию. Центробежные насосы применяют для транспортировки столь разнообразных материалов, как сточные воды, уголь, нитроцеллюлоза и зола. Напор, который может обеспечивать такой насос, зависит от природы суспензии, но вообще говоря, развиваемый напор составляет от 20 до 60 м столба жидкости на ступень. Для создания высоких напоров обычно ставят последовательно несколько насосов. Шесть центробежных насосов при перекачивании суспензии гильсонита дали возможность получить напор 275 м.

Сравнительно малый напор, создаваемый центробежными насосами, наиболее существенно ограничивает их применение. В случаях, когда требуются высокие напоры, обычно применяют поршневые насосы. Такие установки используют для перемещения взвесей на большие расстояния и применяют для подачи бурового или при добыче нефти.

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ПОДВИЖНЫХ СРЕД²

Смеси твердых веществ и жидкостей, в зависимости от физических характеристик этих систем, перемещают

Теоретическую мощность, потребляемую насосами, рассчитывают по обычным формулам. Коэффициент полезного действия насоса, однако, зависит от природы суспензии и конструкции насоса. Поэтому все расчеты действительных затрат мощности следует выполнять только с помощью заводов-изготовителей насосов.

ЭКОНОМИКА

Большинство материалов, перемещаемых в виде суспензий по трубопроводам, транспортируют этим способом лишь в пределах предприятия. Это ограничение определяется экономическими причинами. Суспензии исходных материалов и промежуточных продуктов часто получают при проведении различных технологических процессов, и в этих случаях единственным практичным методом перемещения материала может быть транспортирование его как псевдожидкости. Стоимость любого другого способа передачи продукта из одной точки в другую (например, отделение жидкости от твердой фазы и отдельная их транспортировка) будет чрезвычайно высока. В коротких линиях допустим большой перепад давления, что, однако, экономически невыгодно при транспортировке на большие расстояния. Для короткого трубопровода также нет необходимости делать точный расчет вспомогательного оборудования, что необходимо выполнять для трубопроводов большой протяженности.

Как основу расчетов инженер может использовать лучшие опубликованные данные (или свой собственный опыт) и применять большие запасы прочности. Поскольку обычно стоимость трубопровода относительно стоимости всего предприятия незначительна, а другие способы перемещения материала значительно дороже, то некоторый запас мощности допустим.

Транспортировка твердых материалов в виде взвесей на большие расстояния используется сравнительно редко по причинам экономическим, а также вследствие недостатка технических данных. Для перевозки имеются и другие способы, конкурирующие с рассматриваемым. В большинстве случаев железнодорожный или водный транспорт будут выгоднее. Даже в тех случаях, когда финансовые исследования показывают, что транспортировка материала по трубопроводу дает некоторую выгоду, зачастую не учитывают эту экономическую выгоду, имея в виду затраты на научно-исследовательские и конструкторские работы, а также риск, связанный с применением относительно нового метода транспортировки.

Второе экономическое соображение следует из самой природы способа транспортировки по трубопроводам. Трубопровод как устройство для перемещения материалов характеризуется высокими затратами на сооружение и малыми эксплуатационными расходами. Поэтому трубопроводы выгодны, если гарантируется непрерывное их действие и длительный срок эксплуатации.

вают в аппаратах различных типов. Относительно тонкие суспензии, которые можно транспортировать по трубопроводам, обычно загружают в аппараты, где перемешивание производят вращающимися механическими мешалками или струями жидкости. Нетекучие пасты смешивают в тихоходных месителях, в которых циркуляция отсутствует. Этот раздел посвящен перемешиванию подвижных взвесей мешалками и струями жидкости. Месители для паст рассматриваются на стр. 143.

¹ Durand, Condolios, Hydraulic Transport of Coal and Other Solid Materials in Pipes, National Coal Board, Great Britain, Nov. 5-6, 1952.

² A. I. Ch. E. Equipment Testing Procedures, Impeller Type Mixers, September, 1959. — Mc Mullin, Weber, Chem. a. Met. Eng., 42 (5), 254 (1935). — Rushton, Oldshue, Chem. Eng. Progr., 49, 161, 267 (1953). — Weisman, Efferding, Am. Inst. Chem. Engrs J., 6, 419 (1960).

АППАРАТЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Аппараты с мешалками. Аппараты этого типа состоят из сосуда, обычно вертикального, одной или нескольких мешалок, приводимых в действие двигателем, и вспомогательных узлов (редукторы, сальники и отражательные перегородки). В зависимости от угла, составляемого лопастью мешалки с осью вала, все типы

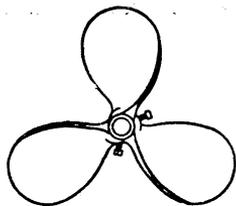


Рис. II-1. Пропеллерная мешалка типа гребного винта.

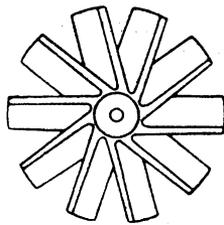


Рис. II-2. Турбинная мешалка веерного типа (открытая).

ведении быстротекущих реакций используют высокоскоростные мешалки.

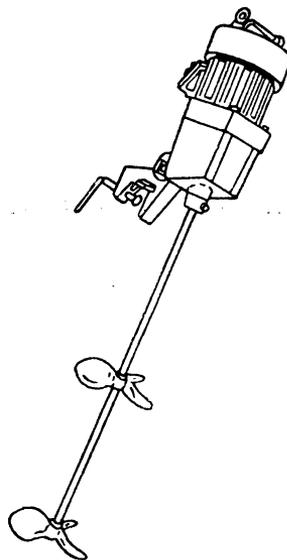


Рис. II-4. Переносное перемешивающее устройство (вал мешалки непосредственно соединен с электродвигателем).

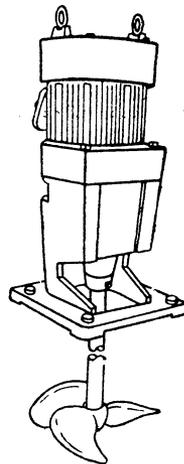


Рис. II-5. Стационарное перемешивающее устройство.

мешалок могут быть грубо разделены на два обширных класса: аксиальнопоточные мешалки и радиальнопоточные мешалки.

Аксиальнопоточные мешалки. К аксиальнопоточным относят все мешалки, у которых угол, составляемый лопастью с осью вала, меньше 90° . Типичными представителями аксиальнопоточных мешалок являются пропеллерные (винтовые) мешалки, турбинные мешалки открытого типа и наклоннолопастные мешалки (на рис. II-1—II-3). Для перемешивания подвижных систем твердое тело — жидкость наиболее часто применяют переносные или стационарные пропеллерные мешалки.

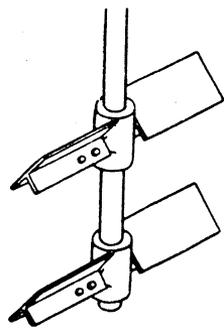


Рис. II-3. Наклоннолопастная мешалка (двухрядная).

Переносные перемешивающие устройства специальными струбцинами закрепляют на стенке сосуда, в котором производят перемешивание. Мешалки этого типа выпускаются мощностью до 2,2 кВт. Чтобы обеспечить создание потока, распространяющегося от поверхности жидкости до дна сосуда, переносные перемешивающие устройства обычно устанавливают наклонно, как показано на рис. II-4, или в сосуде с отражательными перегородками вертикально по оси аппарата. Мешалки этого типа работают в двух диапазонах скоростей: от 19 до 29 об/сек при непосредственном соединении с двигателем и от 5,8 до 7 об/сек при передаче через редуктор. Быстроходные перемешивающие устройства создают значительное напряжение сдвига, но обладают относительно низким насосным действием; тихоходные перемешивающие устройства характеризуются большим насосным действием, но малым напряжением сдвига. Для перемешивания суспензий, как правило, применяют низкоскоростные мешалки с передачей через редуктор, а для быстрого диспергирования или при про-

Во многих случаях перемешивания в аппаратах средней производительности (при затратах мощности до 2,2 кВт) применяют стационарно устанавливаемые пропеллерные мешалки типа, показанного на рис. II-5. Эти

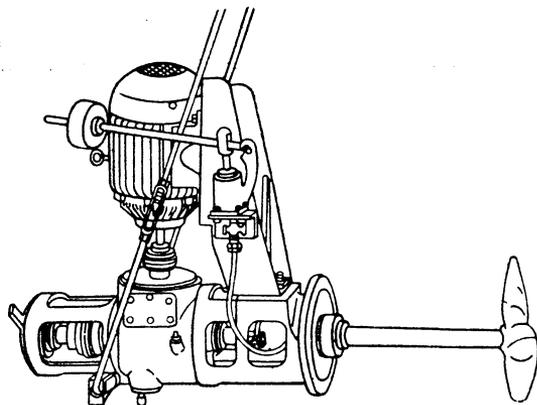


Рис. II-6. Устройство для бокового ввода мешалки.

мешалки, как правило, также монтируют наклонно, чтобы обеспечить образование потока, распространяющегося от поверхности жидкости до дна сосуда. Такие мешалки работают в том же диапазоне скоростей, что и переносные. В тех случаях, когда аппарат должен быть закрытым, они снабжаются сальниками или тор-

цевым уплотнением. Поскольку пропеллерные мешалки вращаются с относительно высокой скоростью, привод, необходимый для передачи требуемой мощности, достаточно прост. Пропеллерные мешалки, при вводе в аппарат сверху, не должны потреблять на перемешивание более 2,2 кВт и иметь вал длиною более 1,8 м.

Пропеллерные мешалки при вводе в аппарат сбоку, например, показанные на рис. II-6, обычно употребляют для перемешивания сред, не содержащих твердых частиц с абразивными свойствами.

При перемешивании абразивных суспензий могут

объеме. Диаметр этих мешалок¹, как правило, составляет от 0,3 до 0,6 диаметра аппарата. Турбинные мешалки бывают различных типов, например: с изогнутыми лопатками (рис. II-7); со спиральными, отогнутыми назад лопастями (точнее, многолопастные мешалки с изогнутыми лопастями — рис. II-8), открытые с прямыми лопатками (рис. II-9).

Диаметр лопастных мешалок обычно более 0,6 диаметра аппарата (рис. II-10). Поскольку диаметры лопастных мешалок велики, то они вращаются с малыми скоростями.

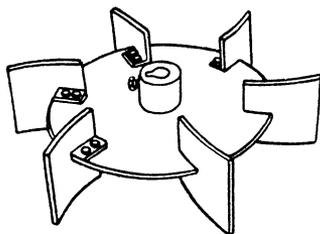


Рис. II-7. Турбинная мешалка с изогнутыми лопатками (открытая).

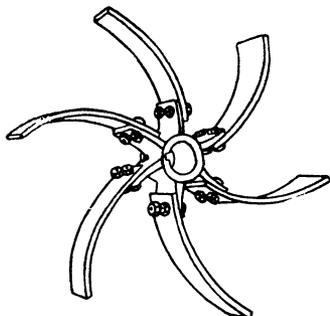


Рис. II-8. Турбинная мешалка со спиральными, отогнутыми назад лопастями.

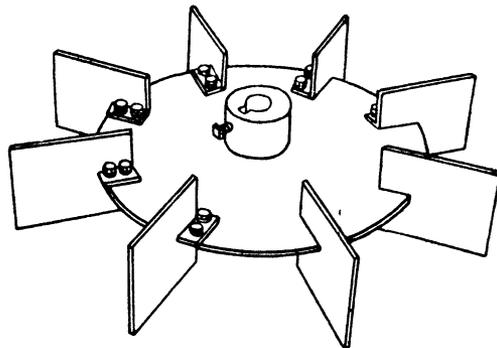


Рис. II-9. Турбинная мешалка с прямыми лопатками нормальная (открытая).

быть использованы уплотнения и сальники, но таких условий эксплуатации мешалок лучше избегать. Стандартная скорость вращения мешалок от 7 до 19 об/сек. Обычно эти мешалки используют для поддержания во взвешенном состоянии осадка, например, при жидкофазной очистке керосина, для размешивания бумажной массы и в других случаях, когда частицы твердой фазы осаждаются сравнительно медленно. Существование операций этого типа рассматривается в специальной

Рамные (рис. II-11) и якорные (точнее рамно-якорные — рис. II-12) мешалки или ометают дно аппарата или, чаще, ометают полностью всю поверхность аппарата, покрытую жидкостью. Эти мешалки обычно применяют, когда желательно, чтобы зазор между мешалкой и стенкой сосуда был небольшим.



Рис. II-10. Лопастная мешалка.

литературе¹. Действие мешалок, устанавливаемых на боковых стенках сосуда, заключается в предотвращении накопления частиц, которые осаждаются в течение нескольких недель, когда содержимое аппарата должным образом не перемешивается.

Радиальнопоточные мешалки. К радиальнопоточным относят все мешалки, лопасти которых параллельны оси вала. Многолопастные мешалки относительно малых диаметров называют турбинными, большие тихоходные мешалки, обычно с двумя или четырьмя лопастями, так и называют — лопастными. К этому типу относятся также якорные и рамные мешалки.

Турбинные мешалки обеспечивают весьма интенсивную циркуляцию жидкости во всем перемешиваемом

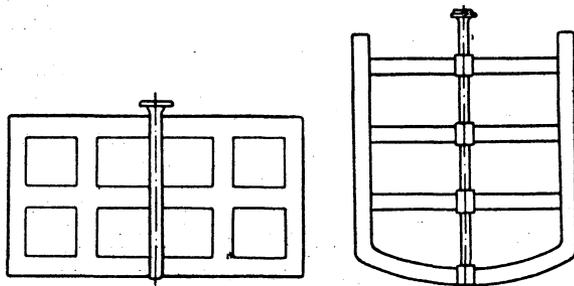


Рис. II-11. Рамная мешалка.

Рис. II-12. Якорная мешалка.

В промышленности для перемешивания взвесей обычно используют турбинные или лопастные мешалки на вертикальном валу с верхним приводом (рис. II-13). Мощность таких установок может быть любой в пределах от 0,75 до 370 кВт. Скорость вращения мешалки обычно от 1 до 2,5 об/сек, но, в зависимости от технологических условий, может быть большей (до 7 об/сек) или меньшей (до 0,25 об/сек).

¹ Halpine, World Oil, № 7, 22OH—22OJ (1953). — Wilson, Oil Gas J., 53 (27), 165 (1954).

¹ Здесь и ниже имеется в виду диаметр окружности, описываемой концами лопастей мешалки. — Прим. ред.

Отражательные перегородки. Для умеренно интенсивного перемешивания взвесей, особенно вязких, можно применять аппараты без отражательных перегородок. Однако в таких аппаратах при высоких скоростях вращения мешалок образуется глубокая воронка и может засасываться воздух. Поэтому для интенсивного перемешивания тонких взвесей резервуары снабжают

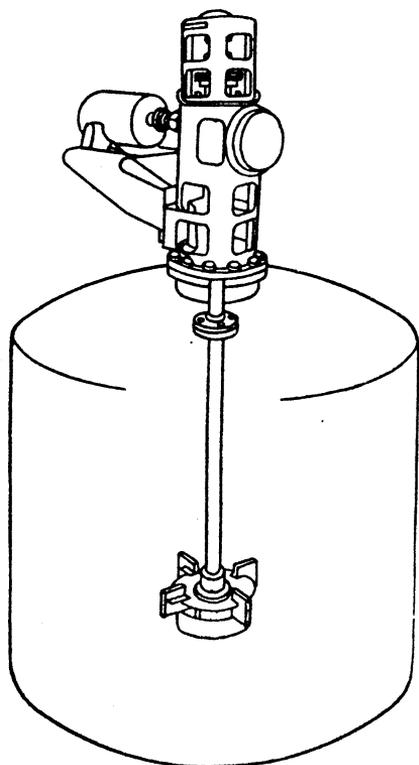


Рис. II-13. Схема аппарата с турбинной мешалкой.

отражательными перегородками, препятствующими образованию воронки. Отражательные перегородки представляют собой плоские пластины, укрепляемые вертикально на внутренней стенке сосуда в радиальном направлении, как показано на рис. II-21. Аппарат, снабженный таким количеством перегородок, что дальнейшее добавление их не изменяет характера течения жидкости, называют аппаратом с полностью отраженным потоком. Чтобы создать такие условия, достаточно четырех перегородок даже в сосудах больших размеров. Стандартная ширина перегородок равна $1/12$ диаметра аппарата. При перемешивании взвесей, чтобы предотвратить накопление твердых частиц на перегородках, следует укреплять их на расстоянии от стенок сосуда, равном половине ширины перегородки.

Валы и приводы мешалок. Быстроходные мешалки малых размеров, например пропеллерные, соединяются с электродвигателем непосредственно. Тихоходные мешалки приводятся в движение через редуктор подобно устройствам, показанным на рис. II-6 и II-13. В зависимости от того, каким способом вал мешалки соединен с выходным валом редуктора, различают два основных типа приводов. В приводе первого типа вал

мешалки непосредственно присоединяется к валу редуктора так, что любое крутящее или изгибающее напряжение (или их изменение) передается редуктору. В приводе другого типа вал мешалки присоединяется к валу редуктора через упругую муфту. В этом случае предусматривается независимая установка подшипников вала и редуктора. Упругая муфта исключает передачу поперечных усилий.

Длина вала мешалки зависит от скорости вращения диаметра вала и массы мешалки. Валы без промежуточных опор могут быть длиной до 3—4,6 м. В очень глубоких сосудах иногда необходимы подпятники, но по возможности их следует избегать. При проектировании вала мешалки надо уделять большое внимание определению критической скорости, так как часто мешалка должна работать то полностью погруженной в жидкость, то в воздухе, то при переменном уровне жидкости.

Для закрытых аппаратов необходимы сальники или механические уплотнения. В этих случаях существенно важное влияние оказывает прогиб вала, который должен быть выдержан в пределах, допустимых для данного типа уплотнения.

Интелекторные смесители. Струи жидкости. Струя жидкости может быть вызвана пропеллером, но может быть получена и при истечении жидкости из сопла. Струи жидкости, вытекающие из сопла, иногда используются при перемешивании жидкостей, но не применяются

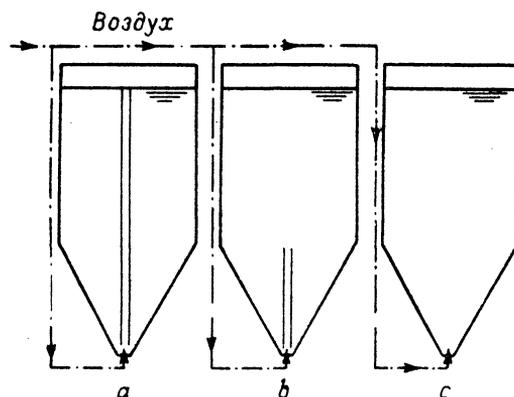


Рис. II-14. Схемы аппаратов с пневматическим перемешиванием:

a — с центральной циркуляционной трубой; b — с укороченной циркуляционной трубой; c — со свободным подъемом воздуха.

для перемешивания обычно встречающихся систем твердое тело — жидкость. Фолсом и Фергюссон¹ рассматривают основы процесса расширения струи и предлагают уравнения, описывающие поток, вызванный струей жидкости, вытекающей из сопла с устьем определенного размера. При одинаковых затратах мощности расход жидкости, вытекающей из устья большего диаметра, будет превышать расход, который могут дать сопла малых размеров. Оптимальный диаметр сопла равен $1/17$ расстояния, которое должна проходить струя жидкости.

Пневматическое перемешивание. Системы твердое тело — жидкость иногда перемешивают сжатым воздухом. Этот способ не эффективен для суспендирования

¹ Folsom, Fergusson, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, 71, 73 (1949).

свободно осаждающихся твердых частиц, но может применяться для перемешивания высококонцентрированных взвесей со стесненным осаждением твердой фазы. Наиболее часто пневматическое перемешивание осуществляют, подавая воздух по оси циркуляционной трубы, в результате чего взвесь поднимается по этой трубе и течет вниз во внешнем кольцевом пространстве аппарата. Такое устройство иногда называют аппаратом Пачука. Три варианта аппаратов этого типа показаны на рис II-14. Ламон¹ описывает формы потоков в пневмоциркуляционных аппаратах и дает (рис.

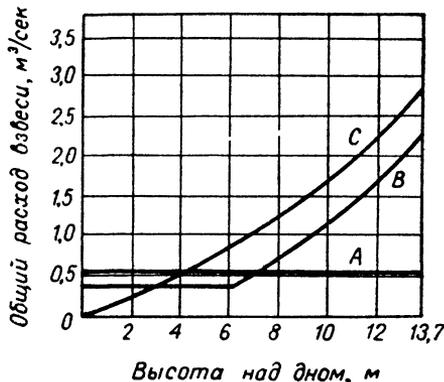


Рис. II-15. Расход взвеси в аппаратах с пневматическим перемешиванием при разных условиях подачи воздуха:

А — аппарат (типа а) с центральной циркуляционной трубой диаметром 0,46 м и высотой 13,7 м; В — аппарат (типа б) с укороченной циркуляционной трубой диаметром 0,46 м и высотой 6 м; С — аппарат (типа с) со свободным подъемом воздуха.

Расход воздуха 0,14 м³/сек, плотность взвеси 1600 кг/м³, высота слоя жидкости 13,7 м.

II-15) графики зависимости расхода взвеси при данном расходе воздуха в аппаратах Пачука трех конструктивных вариантов.

Если известна скорость циркуляции, то можно определить степень выравнивания концентрации, достижимую в этих аппаратах при проведении непрерывных процессов. Некоторые данные по этому вопросу сообщает Гуйоф².

ГИДРОМЕХАНИКА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Скорость циркуляции, мощность и напор. Все циркуляционные мешалки создают в аппаратах для перемешивания циркуляцию жидкости и вызывают напряженные сдвига. Зависимость между затратами мощности и скоростью циркуляции при струйном перемешивании будет рассмотрена ниже. При перемешивании жидкости мешалками энергии, обеспечивающую циркуляцию, передают жидкости непосредственно мешалки. Мощность, потребляемая мешалкой, определяется полным объемным расходом («насосное действие») мешалки и скоростным напором, создаваемым мешалкой, согласно уравнению:

$$N = \rho g H V_M \quad (II-1)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/сек²; H — скоростной напор, созда-

ваемый мешалкой, м; V_M — объемный расход, создаваемый мешалкой, м³/сек.

Насосное действие мешалки определяется как объемный расход, нормальный к площади, описываемой мешалкой. Эта величина найдена для некоторых типов мешалок по фотографическим снимкам траекторий частиц, суспендированных в потоке жидкости (фотографии получены при освещении частиц узким пучком света, проходящего через сосуд). На рис. II-16 представлен характерный результат такой фотосъемки. Данные по насосному действию мешалок получены Раштоном и Олдшу¹, а также Саксом и Раштоном².

Объемные производительности геометрически подобных мешалок определяются соотношением:

$$V_M \sim n d_M^3 \quad (II-2)$$

где n — скорость вращения мешалки, 1/сек; d_M — диаметр окружности, описываемой мешалкой, м.

Напор H , создаваемый мешалкой, пропорционален квадрату скорости жидкости, отбрасываемой лопастями мешалки, которая, в свою очередь, зависит от объемного расхода V_M . Как видно из уравнения (II-1), мешалки могут потреблять одну и ту же мощность при

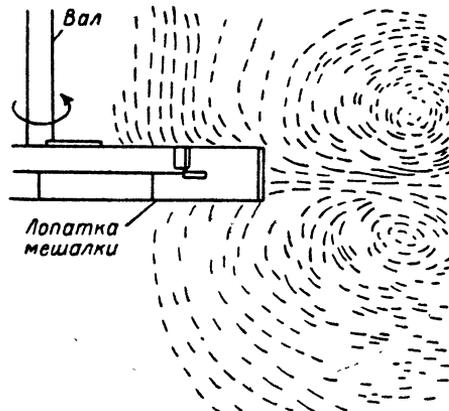


Рис. II-16. Схема потока, возникающего при работе нормальной открытой турбинной мешалки:

• $d_M = 0,1$ м; $D = 0,3$ м; $\mu = 150$ мн · сек/м².

различных скоростях вращения и диаметрах. Например, в сосуде с перегородками мощность, потребляемая быстроходной мешалкой любого типа при работе в маловязкой жидкости, определяется уравнением:

$$N \sim \rho n^3 d_M^5 \quad (II-3)$$

Сопоставляя это уравнение с уравнением (II-1) и учитывая соотношение (II-2), получим³:

$$gH \sim n^2 d_M^2 \quad (II-4)$$

Из этих же условий найдем, что отношение расхода к напору будет:

$$\frac{V_M}{gH} \sim \frac{d_M}{n} \quad (II-5)$$

¹ Rushton, Oldshue, Chem. Eng. Progr., 49, 161, 267 (1953).

² Sachs, Rushton, Chem. Eng. Progr., 50, 597 (1954).

³ Зависимости (II-4) и (II-5) включены редактором перевода.

¹ Lamont, Canad. J. Chem. Eng., 36, 153 (1958).

² Cutoff, Am. Inst. Chem. Engrs J., 6, 347 (1960).

При постоянной затрате мощности отношение расхода к напору пропорционально:

$$\frac{V_M}{H} \sim \frac{1}{n^{3/2}} \sim d_M^{3/2} \quad (\text{II-6})$$

Отсюда следует одно из важнейших правил перемешивания: тихоходная мешалка большого диаметра создает большой расход, но вызывает малую скорость сдвига, тогда как быстроходная мешалка малого диаметра вызывает большую скорость сдвига, но создает малый расход. Доля подводимой мощности, затрачиваемая на создание расхода (и, соответственно, другая доля — вызывающая сдвиг), может быть установлена различной в зависимости от выбора соотношения размеров аппарата и мешалки.

Скорость сдвига. Поток жидкости, сбрасываемой с концов лопастей мешалки, создает в жидкости, заполняющей аппарат, градиент скорости сдвига. Скорость сдвига в жидкости зависит от напряжения сдвига. Ход некоторых процессов определяется собственно скоростью течения жидкости (ее направлением и величиной), в то время как на другие процессы особое влияние оказывает напряжение сдвига. Необходимо различать эти два условия.

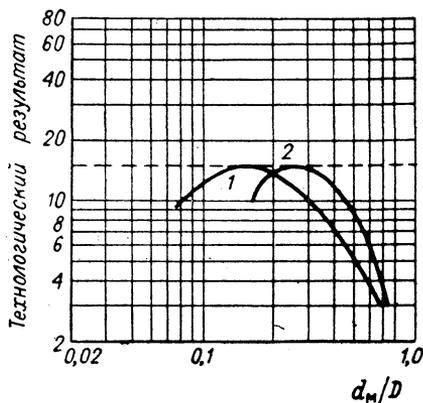


Рис. II-17. Влияние соотношения размеров мешалки и аппарата:

1 — мешалка I типа; 2 — мешалка II типа.

Некоторые процессы зависят от расхода жидкости, скорости потока и направления течения. В таких случаях аксиальнопоточная мешалка дает результаты, существенно отличающиеся от результатов, которые могут быть достигнуты при использовании радиальнопоточной мешалки. Если направление потока не оказывает влияния на ход процесса, то аксиальные и радиальные мешалки дают одинаковые результаты.

Если процесс обусловливается насосным действием мешалки и средним значением скорости сдвига в аппарате, то решающим является отношение расхода к скорости сдвига. В этих системах обычно существует оптимальное отношение расхода к скорости сдвига, и если имеются опытные данные, то для мешалки I типа можно получить кривую такого вида, как показан на рис. II-17. Когда испытывают другую мешалку (II типа), то обычно получают кривую сходной формы, но несколько смещенную. Сравнивая два типа мешалок, убеждаются, что оптимум обычно соответствует при-

лизительно одному и тому же отношению расхода к скорости сдвига в данной системе.

Скорость сдвига (или градиент скорости) вызывает напряжение сдвига во всей жидкости, заполняющей аппарат. Градиент скорости является особенно важным фактором для неньютоновских сред. При ламинарном течении напряжение сдвига может быть рассчитано по скорости сдвига, если известна вязкость. При турбулентном течении, однако, это будет неверно. Турбулентное напряжение сдвига является результатом существования случайных, беспорядочных турбулентных вихрей, включая крупномасштабные, которые вырастают в мелкомасштабные вихри или флуктуации. Масштаб крупных вихрей зависит от размера сосуда и в разных системах будет различным. Мелкомасштабные вихри, по-видимому, как в малых, так и в больших системах одинаковы. Мелкомасштабные вихри рассеивают энергию преимущественно за счет вязкого напряжения. Так как поведение мелкомасштабных вихрей почти не зависит от размеров сосуда, то процессы, течение которых определяется действием этих вихрей, будут иметь сходные характеристики как в больших, так и в малых сосудах.

Скорость сдвига в жидкости, находящейся вблизи мешалки, значительно больше, чем в жидкости, находящейся у стенок аппарата. Это различие тем больше, чем больше размеры аппарата.

Режимы течения. Критерий Рейнольдса. Главным критерием, определяющим режим течения потока в аппаратах с мешалкой, является центробежный критерий Рейнольдса:

$$Re_c = \frac{\rho n d_M^2}{\mu} \quad (\text{II-7})$$

где d_M — диаметр мешалки, м; n — скорость вращения мешалки, 1/сек; ρ — плотность жидкости, кг/м³; μ — динамический коэффициент вязкости, н · сек/м².

Критерий Рейнольдса — величина безразмерная, и при нахождении его значения необходимо проводить вычисления в однородной системе единиц.

При числе Рейнольдса большем 10 000 поток в аппарате турбулентный. Между числами Рейнольдса от 10 000 и приблизительно до 10 находится переходная область, в которой поток уже не является ламинарным, но еще не сформировался окончательно как турбулентный. При числах Рейнольдса ниже 10 поток будет чисто ламинарным.

Сосуды без перегородок. При перемешивании маловязких жидкостей в гладкостенных сосудах мешалкой любого типа появляется воронка. На рис. II-18 показана типичная форма потока, вызываемого аксиальнопоточными и радиальнопоточными мешалками в сосудах без перегородок. Образуются центральный вихрь и, что характерно, значительная по глубине воронка. Несмотря на воронку и тенденцию частиц вращаться вокруг оси вала, происходит все же достаточно интенсивный обмен, поскольку вязкость жидкости мала, а скорость диффузии велика, так что и в сосуде без перегородок может быть достигнуто удовлетворительное перемешивание. Существует, однако, предел увеличения мощности, подводимой к аппарату без перегородок, так как с момента, когда воронка достигает мешалки, начинается засасывание воздуха. Кроме того, масса жидкости, находящаяся в воронке, часто вызывает появление волн, что в сочетании с глубокой воронкой может создать большие колебания усилий, действующих на мешалку.

В переходной области на основное вихревое движение часто может накладываться некоторое движение сверху вниз, вызванное трением жидкости о стенки сосуда или другие препятствия на пути потока.

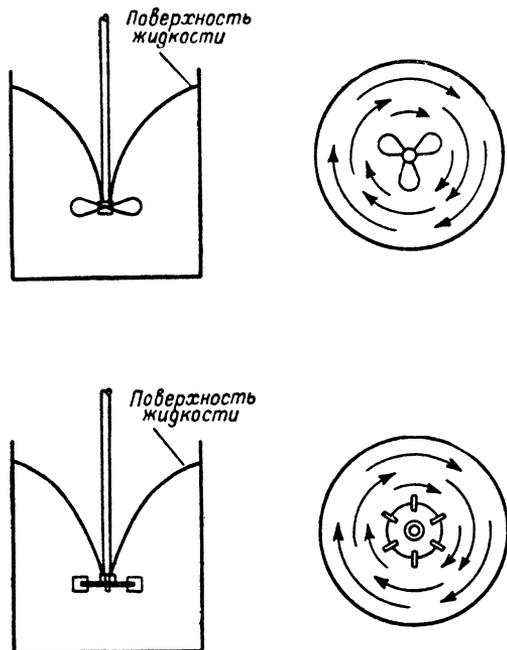


Рис. 11-18. Форма потока, создаваемого как аксиальнопоточной, так и радиальнопоточной мешалкой в гладкостенном сосуде.

Слева — вид сбоку; справа — вид снизу.

При ламинарном режиме сопротивление стенок сосуда становится основной причиной трения жидкости,

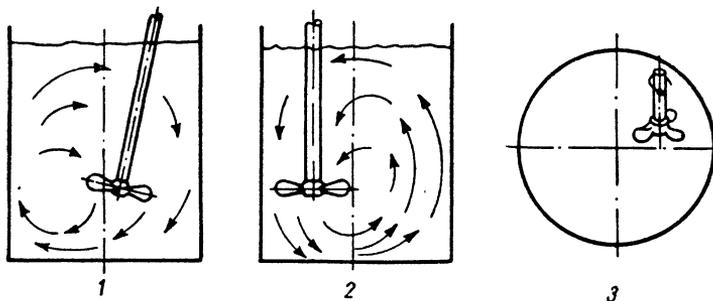


Рис. 11-20. Форма потока, создаваемого пропеллерной мешалкой в сосуде без перегородок:

1 — установка мешалки под углом со смещением от центра; 2 — эксцентричное расположение мешалки на вертикальном валу; 3 — пропеллер вращается против часовой стрелки (вид сверху).

и поэтому часто возможно наложение значительного по величине движения, направленного сверху вниз, на движение в верхней части вихря. Весьма существенно сравнение результатов, полученных в аппаратах малых и больших размеров, так как поверхность стенки, сопоставленная с объемом жидкости в сосуде, определяет эффект перемещения масс жидкости сверху вниз,

Для обеспечения значительного перемещения масс жидкости сверху вниз при перемешивании в ламинарном режиме или в переходной области мешалку следует устанавливать эксцентрично, как показано на рис. 11-19. Соответствующее конструктивное решение может быть получено при использовании турбинных или пропеллерных мешалок. Положение мешалки должно быть определено весьма точно, так как при установке ее слишком близко от оси сосуда образуется глубокая воронка. В таких аппаратах изменение вязкости и размеров сосуда заметно сказывается на форме потока. Эксцентричная установка мешалки особенно целесообразна при перемешивании бумажных масс. Обычный встречающийся диапазон консистенций и мощность, требуемая для интенсивного перемешивания, таковы, что благоприятствуют применению эксцентрично расположенных мешалок.

Аксиальнопоточные мешалки можно использовать, устанавливая их под углом и смещая от центра. Вал мешалки монтируют под углом $\sim 15^\circ$ к оси аппарата и смещают мешалку в сторону от центра в квадрант, соответствующий направлению ее вращения.

Этот случай монтажа мешалки показан на рис. 11-20.

Под углом к оси сосуда со смещением от центра устанавливают пропеллерные перемешивающие устройства — обычно переносные или стационарные — мощностью до 3,7 квт. У мешалок с приводом большей мощности несбалансированные силы в жидкости могут оказаться недопустимо большими.

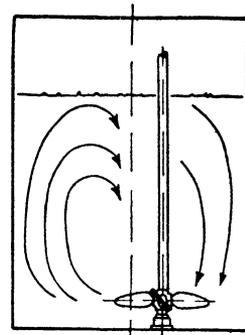


Рис. 11-19. Форма потока, создаваемого пропеллерной мешалкой специального типа для перемешивания бумажного сырья, в сосуде без перегородок при вертикальном положении вала, установленного эксцентрично.

Лопатные, рамные и якорные мешалки обычно используются в сосудах без перегородок, так как у них мал зазор между краями лопастей и стенкой аппарата.

Сосуды с отражательными перегородками. При необходимости получения значительного напряжения сдвига и обеспечения совершенного перемешивания аппараты иногда снабжают внутренними перегородками.

Действие перегородок зависит от режима перемешивания. При развитой турбулентности, т. е. значениях числа Рейнольдса больших 10 000, перегородки обычно применяют в аппаратах с турбинными мешалками и пропеллерными мешалками, установленными по оси сосуда. В этих условиях проявляется различие между пропеллерными и радиальнопоточными мешалками. Формы потоков показаны соответственно на рис. II-21 и

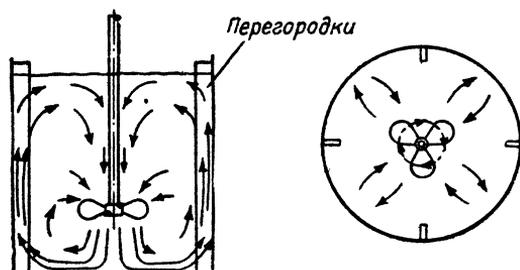


Рис. II-21. Форма потока, создаваемого пропеллерной мешалкой, установленной по оси сосуда, в аппарате с отражательными перегородками.

Слева — вид сбоку; справа — вид снизу.

II-22. Отмеченные различия формы потоков не оказывают влияния, если процесс перемешивания определяется как насосным действием, так и напряжением сдвига, однако эксплуатационная характеристика двух сравниваемых типов мешалок будет существенно несхожей, если для процесса преимущественно важным является направление потока.

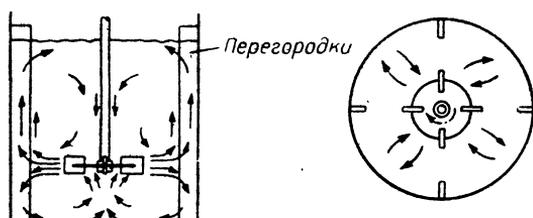


Рис. II-22. Форма потока, создаваемого турбинной мешалкой, установленной по оси сосуда, в аппарате с отражательными перегородками.

Слева — вид сбоку, справа — вид снизу.

В результате установки отражательных перегородок возрастает циркуляция по высоте аппарата. При перемешивании в условиях, исключающих образование центрального вихря и несбалансированное действие потока жидкости, оказывается возможным весьма существенно увеличить подводимую мощность.

При работе мешалок в переходной области стандартная ширина перегородок может быть уменьшена часто в два раза. Если процесс перемешивания всецело зависит от общей циркуляции и не определяется циркуляцией по высоте сосуда, то удовлетворительные результаты дает применение узких перегородок.

Если условиям проведения процесса отвечает аппарат без перегородок, но нежелателен центральный вихрь, то могут быть использованы укороченные пере-

городки. Эти перегородки делаются стандартной ширины, но длиной лишь в одну треть высоты слоя жидкости и устанавливаются в верхней части аппарата.

Влияние перегородок на процесс перемешивания при ламинарном режиме разными авторами оценивается различно. Мощность, расходуемая на перемешивание в ламинарном режиме, не зависит от наличия или отсутствия перегородок. Однако перегородки оказывают влияние на форму потока в аппарате. В этих случаях их обычно устанавливают на расстоянии от стенки сосуда, равном одной или удвоенной ширине перегородки, с тем чтобы дать возможность жидкости циркулировать вокруг перегородок, но при этом все же направлять поток вверх и вниз. Часто при перемешивании высоковязких сред возможно получить достаточно интенсивное перемещение жидкости по высоте аппарата в гладкостенных сосудах, но иногда целесообразно использовать отражательные перегородки.

ТИПОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Многие аппараты с мешалками, предназначенные для проведения самых разнообразных операций, действуют периодически. Так же часто используются аппараты с мешалками для непрерывного осуществления процессов. В последнем случае оборудование выбирают применительно к одной из следующих четырех задач.

(1) **Непрерывное проведение химической реакции, контролируемой концентрацией реагентов.** В этих случаях аппарат с мешалкой часто обеспечивает полную однородность всего содержимого сосуда. Процесс протекает, как если бы концентрация во всем объеме была одинакова и скорость реакции соответствовала этой концентрации. Если полное перемешивание не обеспечивается, то это надо учесть при расчете.

Если результат превращения может быть выражен в зависимости от скорости реакции, которая является функцией концентрации реагентов, возрастающей по экспоненциальному закону, независимо от числа ступеней в каскаде, анализируют систему только по скорости реакции. Мак-Маллип и Вебер¹, а также Гринхолл, Джонсон и Нотт² рассматривают непрерывные процессы с этой точки зрения.

Скорость реакции в реакторе непрерывного действия при полном перемешивании такая же, как скорость в конце реакции при периодическом ведении процесса. Поэтому общий реакционный объем системы, действующей непрерывно, должен быть больше, чем у действующей периодически. На рис. II-23 показано¹ соотношение объемов реактора периодического действия и реактора непрерывного действия, в котором обеспечивается одинаковая общая степень превращения при проведении химической реакции первого порядка. В каскаде из нескольких ступеней, в каждой из которых обеспечивается полное перемешивание, объем аппарата непрерывного действия уменьшается.

Если течение процесса определяется только концентрацией продукта, то производительность правильно спроектированной установки непрерывного действия будет такой же, как и установки периодического действия.

(2) **Обеспечение взаимодействия, контролируемого временем пребывания в аппарате.** Если в аппарате достигается совершенное перемешивание, то исходное ве-

¹ Mc Mullin, Weber, Chem. a. Met. Eng., 42 (5), 254 (1935).

² Greenhalgh, Johnson, Nott, Chem. Eng. Progr., 55, 44 (1959).

щество мгновенно распределяется во всем объеме сосуда. При периодическом проведении процесса все частицы находятся в аппарате одинаковое время. По-

бывания и числом ступеней в каскаде¹. Чем больше ступеней в каскаде реакторов непрерывного действия, тем меньше отличается время пребывания отдельных частиц от среднего. Обычно устанавливают значения минимального и максимального времени пребывания в системе, а затем определяют объем при разном числе ступеней.

Поршневой поток (полное вытеснение) в аппаратах с мешалками не наблюдается.

(3) Обеспечение сглаживания периодических колебаний. В аппарате совершенного перемешивания исходный материал мгновенно распределяется во всем объеме и дифференциальное уравнение скорости изменения концентрации будет:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{(c_n - c) V_{вх}}{V_n} \quad (II-8)$$

где c — концентрация в аппарате к моменту времени t , $кг/м^3$; c_n — концентрация на входе в аппарат, $кг/м^3$; $V_{вх}$ — объемный расход на входе в аппарат, $м^3/сек$; V_n — объем зоны, в которой обеспечивается совершенное (полное) перемешивание (этот объем либо равен объему сосуда, либо отличается от него), $м^3$.

Концентрация на входе может быть постоянной или закономерно изменяться периодически, а может колебаться под влиянием случайных причин. Уравнение

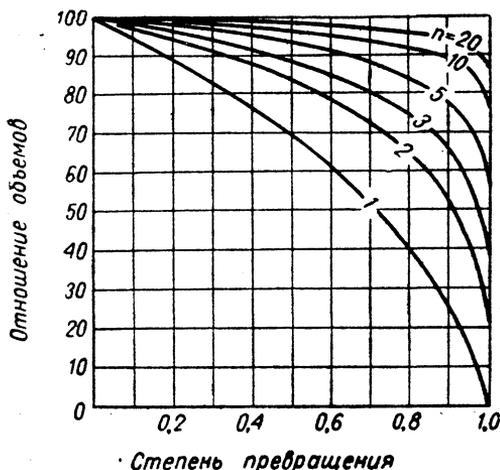


Рис. II-23. Отношение объема реактора периодического действия к общему объему непрерывно действующей установки, состоящей из n аппаратов, необходимое для достижения одинаковой степени превращения.

скольку в аппарате непрерывного действия разные частицы пребывают разное время, продукт, получаемый при непрерывном ведении процесса, отличается от про-

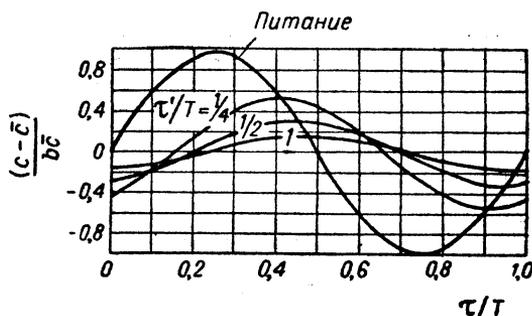


Рис. II-25. Колебания концентрации во времени в потоке, выходящем из аппарата совершенного перемешивания при изменении концентрации на входе по синусоидальному закону:

$$\frac{c - \bar{c}}{\delta c} = \frac{\text{отклонение от среднего}}{\text{максимальное отклонение на входе}}$$

$$\tau/T = \frac{\text{время}}{\text{период колебания}}; \tau' - \text{время задержки в аппарате}; T - \text{период колебания.}$$

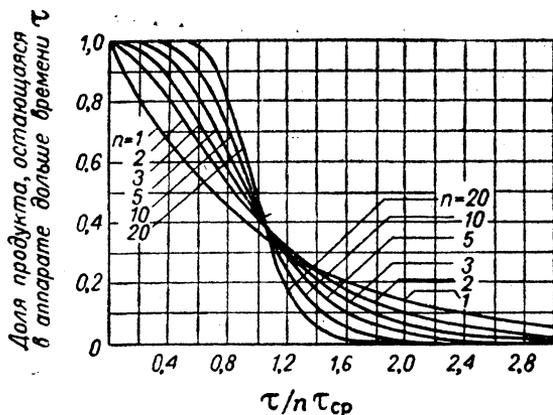


Рис. II-24. Распределение времени пребывания в каскаде непрерывного действия при условии, что в каждом аппарате достигается совершенное перемешивание:

τ — расчетное время пребывания; $n\tau_{cp}$ — общее время пребывания (среднее); n — число аппаратов в каскаде.

дукта, получаемого в аппарате периодического действия. Улучшится или ухудшится при этом качество, зависит от конкретных свойств данного продукта.

На рис. II-24 показана зависимость между отношением минимального времени к среднему времени пре-

(II-8) проинтегрировано для случаев колебания концентрации в потоке на входе по синусоидальному закону, для периодических возмущений вида прямоугольного импульса, а также для единичной пульсации². На рис. II-25 показан график для случая синусоидального изменения концентрации на входе в одиночный аппарат.

Для сглаживания малых пульсаций одиночный аппарат более эффективен, чем большое число сосудов такого же общего объема. При необходимости обеспечить затухание больших пульсаций выгоднее

¹ McMullin, Weber, Chem. a. Met. Eng., 42 (5), 254 (1935).

² Gutoff, Ind. Eng. Chem., 28, 1817 (1956). — Cholette, Cloutier, Canad. J. Chem. Eng., 37, 105 (1959).

применение многоступенчатого каскада. В многоступенчатом каскаде реагенты можно вводить на первой ступени, а на последующих ступенях — предусмотреть контрольные точки для регулировки. Если аппарат и не обеспечивает совершенного перемешивания, все же можно предвидеть вероятные изменения, могущие произойти в системе. Гутоф¹ принял, что в сосуде профиль скорости плоский и поток циркуляционный. Для случая, когда концентрация в потоке на входе изменяется по синусоидальному закону, он определил характер изменения концентрации в потоке на выходе и указал, что если время циркуляции в сосуде и период колебаний концентрации одинаковы, то достигается лишь ничтожное затухание пульсаций. Значительное сглаживание пульсаций будет при условии, что время циркуляции потока в аппарате значительно короче периода колебаний концентрации на входе.

(4) **Поддержание взвесей в транспортабельном состоянии.** Часто единственным назначением аппарата с мешалкой является поддержание содержимого сосуда в транспортабельном состоянии. В этом случае следует предусмотреть движение жидкости, достаточное только для предупреждения образования плотного слоя осадка, в котором частицы не перемешиваются. Следует обеспечить такой поток, при котором частицы не остаются в осадке дни или недели, но нет необходимости добиваться равномерного распределения твердой фазы во всем объеме сосуда.

Получение дисперсий и массопередача. При анализе работы и проектировании перемешивателей важно установить действительное назначение мешалки в данном процессе. Для некоторых процессов важно создание дисперсии, а для других — массопередача. Типичной операцией образования дисперсии является получение взвесей, которые характеризуются концентрацией твердой фазы в разных точках сосуда. Этот процесс может быть изучен путем сопоставления результатов измерения концентрации твердых частиц в многократно отбираемых пробах. Другим видом диспергирования является уменьшение размеров частиц или агломератов. При изучении этого процесса измеряют размеры частиц и устанавливают распределение частиц по размерам.

В процессах, течение которых обусловлено массопередачей (например, растворение, кристаллизация, выщелачивание), аппараты с мешалками обеспечивают режим течения, способствующий обмену между фазами. При проведении этих процессов может также требоваться суспендирование твердой фазы или уменьшение размеров твердых частиц и в этом случае, анализируя работу аппарата с мешалкой, следует учитывать оба показателя.

Получение взвесей (суспензий). Одной из характеристик систем твердое тело — жидкость является скорость осаждения. Легкие материалы — такие, как фильтрующая добавка, крахмал, активированный ил, бумажная масса и т. п. — могут осаждаться с малой скоростью ($\sim 0,5$ см/сек и меньше). Частицы этих материалов имеют склонность следовать за потоком жидкости, и взвеси их ведут себя как относительно однородные системы. Такие взвеси часто обладают ньютоновскими свойствами. С другой стороны, частицы плотных материалов, например никелевой или урановой руды или других руд, могут осаждаться с большими скоростями. Скорость свободного осаждения таких частиц обычно находится в пределах от 0,5 до 5,0 см/сек, а

может достигать $15 \div 20$ см/сек. При средних значениях скорости осаждения ($0,5 \div 5,0$ см/сек) в аппаратах с мешалками можно получать сравнительно однородные суспензии. Если скорость осаждения больше 5,0 см/сек, получение однородных суспензий в аппаратах с мешалками затруднительно.

Скорость свободного осаждения является функцией размера и формы частиц, плотности их, а также вязкости и плотности жидкости. Свободное осаждение твердых частиц наблюдается только при достаточно низком содержании твердой фазы в жидкости. Объемная доля твердых частиц часто более важная характеристика, чем массовая доля. При концентрации твердой фазы до 30 объемн.% обычно наблюдается свободное осаждение твердых частиц. В этих случаях сразу после того как мешалка остановлена, частицы быстро осаждаются (при условии, что скорость свободного осаждения от 0,5 см/сек и выше). Когда содержание твердой фазы составляет от 30 до 50 объемн.%, в зависимости от особенностей процесса может происходить как свободное, так и стесненное осаждение частиц. Если концентрация твердой фазы будет превосходить 50 объемн.%, то имеет место только стесненное осаждение. В этих случаях суспензия ведет себя как вязкая ньютоновская жидкость. При стесненном осаждении назначение перемешивания состоит в том, чтобы создать поток во всем объеме взвеси, так как если твердая фаза полностью суспендирована, то осаждение происходит очень медленно.

Свободное осаждение. Проектирование перемешивателей, предназначенных для получения суспензий свободно осаждающихся твердых частиц, предусматривает расчет затрат мощности, выбор типа мешалки и места ее установки, а также определение отношения диаметра аппарата к диаметру мешалки. Имеются два мерила при описании процесса получения взвесей в аппаратах с мешалками: (1) расход мощности, необходимой для получения слоя однородной взвеси данной высоты, в слое жидкости данной толщины; (2) расход мощности, достаточный для того, чтобы заставить частицы подняться со дна аппарата.

Вайсман и Эффердинг¹ изучали процесс получения однородных взвесей в сосудах небольших размеров, придерживаясь первой точки зрения. Авторы предложили уравнение для нахождения мощности, необходимой, чтобы получить слой однородной суспензии определенной высоты в аппарате с мешалкой, обеспечивающей турбулентный режим течения перемешиваемой среды:

$$\frac{h_c - h_m}{D} = 0,1 + 0,23 \lg \left[\frac{N}{\rho_b g \omega_{oc} V_B} \left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right)^{2/3} \left(\frac{d_m}{D} \right)^{1/2} \right] \quad (II-9)$$

где h_c — высота слоя однородной суспензии в аппарате с мешалкой, м; h_m — высота расположения мешалки над дном аппарата, м; D — диаметр аппарата, м; N — мощность, потребляемая мешалкой, вт; ρ_b — плотность взвеси, кг/м³; V_B — объем взвеси, м³; ω_{oc} — скорость свободного осаждения (по Стоксу), м/сек; ε — объемная доля жидкости в суспензии; d_m — диаметр мешалки, м.

Уравнение (II-9) справедливо при $(h_c - h_m)/D > 0,5$ и $d_m/D < 0,5$. Коэффициент 0,23 отвечает условию $h_m/d_m > 0,5$ и повышается до 0,27, когда $h_m/d_m = 0,2$.

¹ Gutof, Am. Inst. Chem. Engrs J., 6, 347 (1960).

¹ Weisman, Efferding, Am. Inst. Chem. Engrs J., 6, 419 (1960).

Вторая точка зрения была принята Гирскорном и Миллером¹, Кнойле², Цвигерингом³, а также Вайсманом и Эффердингом. Последние указывают, что результаты исследований других авторов удовлетворительно согласуются с их собственными при определении мощности, необходимой для подъема частиц со дна аппарата:

$$10,9 \frac{N_{\text{п}}}{(\rho_{\text{ч}} - \rho) g w_{\text{ос}} V} \left(\frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \right)^{1/2} \left(\frac{d_{\text{м}}}{D} \right) = e^{5,3h_{\text{м}}/D} \quad (\text{II-10})$$

где $N_{\text{п}}$ — мощность, необходимая для подъема частиц со дна аппарата, *вт*; V — объем аппарата, м^3 ; $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частиц твердой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Уравнение (II-10) справедливо при $0,36 < \frac{d_{\text{м}}}{D} < 0,43$ и других ограничениях, определяющих приложимость зависимости (II-9).

Смесь, состоящая из частиц различных размеров, может быть разделена на фракции сравнительно близких по крупности частиц.

При данной мощности, затрачиваемой на перемешивание, некоторое количество твердой фазы образует сравнительно однородную взвесь, в то время как другие частицы могут двигаться только в нижних слоях перемешиваемой системы. Если аппарат с мешалкой мысленно разделен по высоте на несколько зон, как представлено на рис. II-26, то процесс, происходящий в аппарате, можно проиллюстрировать графиками профилей концентрации частиц различной крупности в разных зонах.

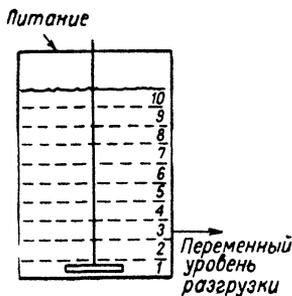


Рис. II-26. Деление аппарата с мешалкой на горизонтальные зоны:

c — общее содержание твердой фазы, %; c_A — фракция А, %; c_B — фракция В, % и т. д.

Вообще не обязательно, чтобы состав суспензии в аппарате был таким же, как состав загружаемого материала, однако при установившемся режиме работы смесь, выходящая из аппарата в любой данной точке, должна быть одинакова по составу с материалом, подаваемым в аппарат. Поэтому в случае, показанном на рис. II-27, при выводе суспензии через отверстие, расположенное у дна аппарата, состав суспензии на входе одинаков с составом на выходе. Этот состав определяет начальные условия, а по данным, полученным при периодическом или непрерывном проведении процесса, можно изобразить график профиля концентраций, показывающий распределение частиц по крупности в разных зонах аппарата. При анализе рис. II-26 и II-27 следует учитывать, что скорость осаждения частиц фракции А наибольшая, частицы фракции В осаждаются с несколько меньшей скоростью, частицы фракции С с еще меньшей скоростью, а частицы фракции D остаются равномерно распределенными при минимальной интенсивности перемешивания. Рис. II-27 показывает, что среднее время пребывания в аппарате частиц разной крупности оказывается не одинако-

вым, отвечающим расчету по скорости подачи питания и объему сосуда. При проектировании реакторов это различие времени пребывания разных фракций должно быть принято во внимание.

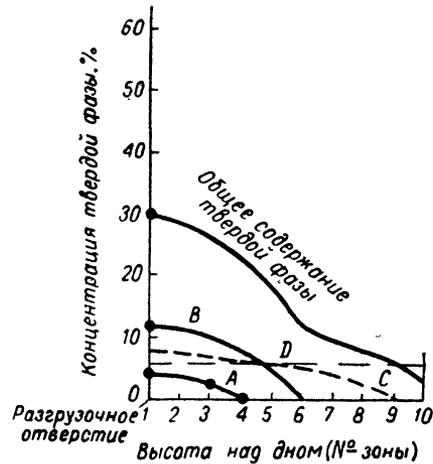


Рис. II-27. Профили концентраций в аппарате с мешалкой, показанном на рис. II-26, при расположении разгрузочной трубы у дна сосуда.

Питание: фракция А	.....	4%
> фракция В	.....	12%
> фракция С	.....	8%
> фракция D	.....	6%
Всего	.....	30%

Если положение разгрузочной трубы изменится, то уже в этой точке состав смеси будет одинаковым с составом на выходе и на входе, а следовательно, рас-

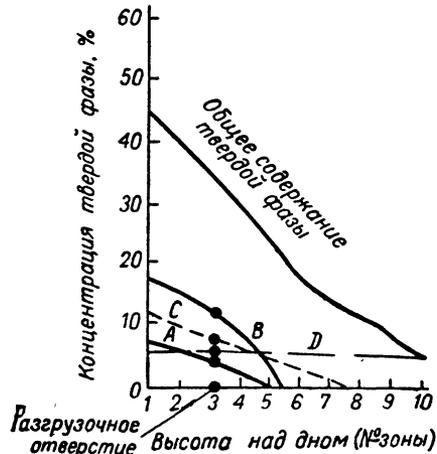


Рис. II-28. Профили концентраций в аппарате с мешалкой, показанном на рис. II-26, при расположении разгрузочной трубы над дном сосуда.

Обозначения см. в подписи к рис. II-27.

пределение частиц по высоте аппарата должно стать другим. Изменение профиля концентраций при расположении разгрузочной трубы над дном сосуда показано на рис. II-28. Следует иметь в виду и многие другие

¹ Hirsekorn, Miller, Chem. Eng. Progr., 49, 459 (1953).
² Kneule, Chem.-Ing. Techn., 28, 221 (1956).
³ Zwietering, Chem. Eng. Sci., 8, 244 (1958).

практические вопросы: назначение материала, заполняющего аппарат, возможность укрупнения частиц, положение разгрузочной трубы, абразивный износ стенок сосуда и мешалки.

Стесненное осаждение. Стесненное осаждение наблюдается при концентрации твердой фазы во взвеси, превышающей 50 объемн. %. Такая взвесь ведет себя подобно гомогенной, часто неньютоновской жидкости. Как правило, целью перемешивания является обеспечение общей циркуляции содержимого сосуда с определенной скоростью. Для этого обычно применяют мешалки в гладкостенных сосудах или в аппаратах с перегородками, частично отражающими поток.

Если аппарат предназначен для выравнивания колебаний концентрации в загружаемой жидкости, то должно быть известно время перемешивания.

Во многих из этих систем с повышением содержания твердых частиц мощность, необходимая для поддержания твердой фазы во взвешенном состоянии, снижается. Это явление объясняется тем, что при повышении концентрации твердых частиц система становится все более и более подобной гомогенной жидкости, а не двухфазной суспензии. Часто высокое процентное содержание во взвеси очень мелких частиц, как это имеет место при обработке руд, способствует понижению мощности, требуемой для обеспечения полной циркуляции.

Зачастую в производственных условиях требуется только не допускать образования на дне аппарата плотного слоя осадка твердых частиц. Скопление осадка в углах сосуда обычно не вызывает осложнений, если количество этого осадка с течением времени не увеличивается.

Сжатый воздух для перемешивания жидкостей применяется сравнительно редко. Наиболее типичным случаем применения пневматического перемешивания является поддержание во взвешенном состоянии твердой фазы в высококонцентрированных взвесьях. Ламон¹ рассматривает некоторые подробности этого процесса. Примерные количества воздуха, необходимые для такого вида перемешивания различной интенсивности в слое жидкости высотой 2,7 м, указывает Кауфман²:

	ди ³ /(м ² ·сек)
Умеренное перемешивание	3,3
Среднее	6,6
Очень сильное	15,7

Уменьшение размеров частиц дисперсной системы.

Уменьшение размеров частиц твердой фазы связано либо с уменьшением величины самих частиц, либо с раздроблением агломератов на отдельные частицы. В обоих случаях основным фактором является напряжение сдвига. Чем выше скорость вращения мешалки, тем больше доля мощности, вызывающая скоростной напор, а следовательно, напряжение сдвига. При осуществлении некоторых процессов уменьшение размеров частиц твердой фазы нежелательно, и в этих случаях необходимо удостовериться, что уменьшение размеров частиц не выходит за допустимые пределы.

Типичными примерами процессов, основой которых является уменьшение размеров частиц твердой фазы, могут служить диспергирование пигментов в красках,

производство отбелных глин и покровных материалов, а также диспергирование лития и натрия для использования в качестве катализаторов химических реакций.

В каждом конкретном случае необходимо определить требуемое напряжение сдвига. Во многих случаях для процессов диспергирования могут быть использованы обычная турбинная или лопастная мешалка. Если же требуется очень высокое напряжение сдвига, то рекомендуются быстроходные мешалки с большим отношением диаметра аппарата к диаметру мешалки или какие-нибудь типы более специализированного оборудования.

Кристаллизация. Выбор типа мешалки для перемешивания при кристаллизации часто оказывается чрезвычайно трудным. Мешалка должна обеспечивать перемещение материала, но не создавать столь большие напряжения сдвига, чтобы препятствовать росту кристаллов или разрушать их. Наиболее часто для этих целей применяют пропеллерные мешалки с направляющими трубами. Конструкции кристаллизаторов описаны в первом томе (гл. IX).

Флотация. Флотационные аппараты, представляющие собой оборудование горнорудной промышленности, состоят из специального сосуда для перемешивания, соединенного с сепаратором. Флотационные аппараты предназначены для того, чтобы в суспензии диспергировать воздух, пузырьки которого, избирательно закрепляясь на твердых частицах с определенными физико-химическими свойствами, заставляют эти частицы вместе с пеной подниматься в верхнюю часть аппарата. Флотация обсуждается на стр. 369.

Растворение и выщелачивание. Растворение и выщелачивание твердых веществ часто проводится в аппаратах с отражательными перегородками или в гладкостенных аппаратах, снабженных турбинными мешалками. Процесс выщелачивания рассматривается на стр. 130.

Испытание оборудования для технологических процессов. Американский институт процессов и аппаратов (The American Institute of Chemical Engineers) опубликовал¹ методику испытания оборудования, в частности аппаратов с мешалками, на месте проведения тех или иных технологических процессов. Рекомендации относятся к процессам, протекающим в системе твердое тело — жидкость. Описаны соответствующие технические средства измерения мощности, а также определения эксплуатационных характеристик.

МОЩНОСТЬ, ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МЕШАЛКАМИ

Определение мощности, потребляемой мешалкой данного типа при вращении с той или иной скоростью, является особым вопросом, не связанным с технологическими характеристиками процесса перемешивания. Авторы некоторых работ рассматривают мощность, потребляемую мешалкой, в зависимости от данных условий перемешивания. Однако мощность, потребляемая мешалкой, не обязательно связана с существом процесса. В то же время затраты мощности всегда зависят от скорости вращения и диаметра мешалки данного типа. Для данного типа мешалки при определенных физических характеристиках перемешиваемой среды из трех переменных (мощность, скорость вращения, диаметр) независимых только две.

¹ Lamont, Canad. J. Chem. Eng., 36, 153 (1958).

² Kauffman, Chem. а. Met. Eng., 37, 178 (1930).

Рекомендации Кауфмана относятся к случаю барботажного пневмоперемешивания. — Прим. ред.

¹ A. I. Ch. E., Equipment Testing Procedures. Impeller Type Mixers, Sept. 1959.

Наиболее распространенной формой корреляции данных о мощности, потребляемой мешалкой, и определяющих ее величинах являются графики зависимости критерия мощности K_N от центростремительного критерия Рейнольдса $Re_{ц}$. Кривые для различных типов мешалок, по опытным данным Раштона, Костича и Эвер-

где C — коэффициент, постоянный для мешалки данного типа.

Когда $Re_{ц} < 10$, то при работе всех типов мешалок наблюдается ламинарный режим течения. В этих условиях отражательные перегородки не влияют на мощность, потребляемую мешалкой, хотя и могут оказы-

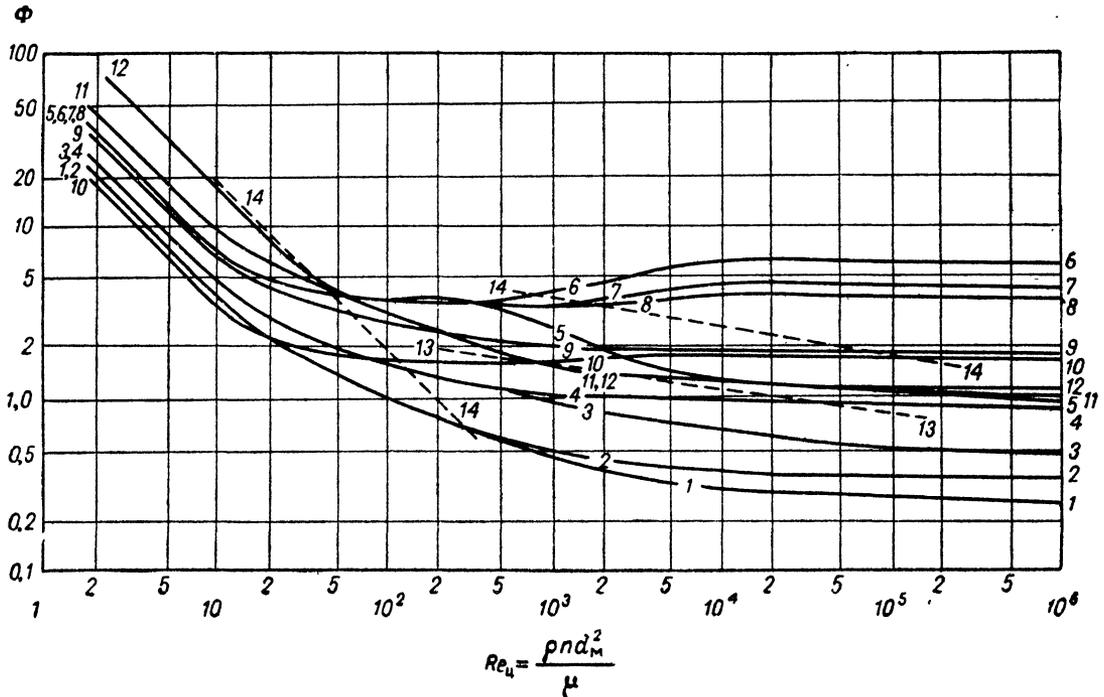


Рис. II-29. Зависимость критерия мощности от критериев Рейнольдса и Фруда:

1 — пропеллерная мешалка, шаг $s = 1D$, сосуд без перегородок; 2 — пропеллерная мешалка, $s = 1D$, сосуд с 4 отражательными перегородками, каждая шириной $0,1D$; 3 — пропеллерная мешалка, $s = 2D$, сосуд без перегородок; 4 — пропеллерная мешалка, $s = 2D$, сосуд с 4 отражательными перегородками, каждая шириной $0,1D$, или та же мешалка, эксцентрично расположенная в сосуде без перегородок; 5 — открытая 6-лопастная нормальная турбинная мешалка, сосуд без перегородок; 6 — открытая 6-лопастная нормальная турбинная мешалка, сосуд с 4 отражательными перегородками, каждая шириной $0,1D$; 7 — открытая 6-лопастная турбинная мешалка с изогнутыми лопатками, сосуд с 4 отражательными перегородками, каждая шириной $0,1D$; 8 — открытая 6-лопастная турбинная мешалка со стреловидными лопатками, сосуд с 4 отражательными перегородками, каждая шириной $0,1D$; 9 — открытая 8-лопастная турбинная мешалка веерного типа, сосуд с 4 отражательными перегородками, каждая шириной $0,1D$; 10 — 2-лопастная мешалка (с плоскими лопастями), сосуд с 4 отражательными перегородками, каждая шириной $0,1D$; 11 — закрытая 6-лопастная турбинная мешалка, сосуд с 4 отражательными перегородками, каждая шириной $0,1D$; 12 — закрытая 6-лопастная турбинная мешалка с 20-лопаточным статором; 13 и 14 — лопастные мешалки, сосуд без перегородок.

$$\Phi = K_N = \frac{N}{\rho n^3 d_M^5}, \text{ исключая случаи перемешивания в сосудах без перегородок.}$$

В гладкостенных сосудах при $Re_{ц} > 300$:

$$\Phi = \frac{K_N}{Fr_{ц}} = \frac{K_N}{b} = \left(\frac{N}{\rho n^3 d_M^5} \right) \left(\frac{g}{n^2 d_M} \right)^{\frac{a - \lg Re_{ц}}{b}}$$

та¹, представлены на рис. II-29. Как видно из графика, существуют три основных области течения потока жидкости при перемешивании. В турбулентной области ($Re_{ц} > 10\,000$) мощность, потребляемая мешалкой, определяется уравнением²:

$$N = C \rho n^3 d_M^5 \quad (II-11)$$

¹ Rushton, Costich, Everett, Chem. Eng. Progr., 46, 395, 470 (1950).

² Область турбулентного режима при $Re_{ц} > 10\,000$ следует называть автомодельной. Уравнение мощности для этих условий перемешивания нагляднее представлять в виде равенства. $K_N = C$ — Прим. ред.

вать воздействие на процесс перемешивания. При ламинарном режиме мощность, затрачиваемая на перемешивание, изменяется в соответствии с уравнением¹:

$$N = C' \mu n^2 d_M^3 \quad (II-12)$$

Значения коэффициентов C и C' для некоторых типов мешалок даны в табл. II-1.

¹ Удобнее применять единую форму записи, и для ламинарного режима течения уравнения мощности представлять в виде: $K_N = C' Re_{ц}^{-1}$. — Прим. ред.

ТАБЛИЦА II-1

Значения коэффициентов C и C' уравнений (II-11) и (II-12)¹

Тип мешалки ²	C' (ламинарный режим)	C (турбулентный режим)
Пропеллерная мешалка трехлопастная, с шаговым отношением 1	41,0	0,32
Пропеллерная мешалка трехлопастная, с шаговым отношением 2	43,5	1,00
Турбинная мешалка открытая, нормальная, с шестью прямыми лопатками	71,0	6,30
Турбинная мешалка открытая, с шестью изогнутыми лопатками	70,0	4,00
Турбинная мешалка открытая, с шестью стреловидными лопатками	71,0	4,00
Турбинная мешалка открытая, веерного типа, с шестью лопастями	70,0	1,65
Двухлопастная мешалка с прямыми лопастями	36,5	1,70
Турбинная мешалка закрытая, с шестью изогнутыми лопатками	97,5	1,08
Турбинная мешалка закрытая, со статором (сосуд без перегородок)	172,5	1,12

¹ Rushton, Oldshue, Chem. Eng. Progr., 49, 161, 267 (1953).

² Сосуд с четырьмя отражательными перегородками, каждая шириной $D/12$.

При числах Рейнольдса в интервале значений от 10 до 10 000 существует переходная область¹. В этой области вид кривой зависимости критерия мощности от

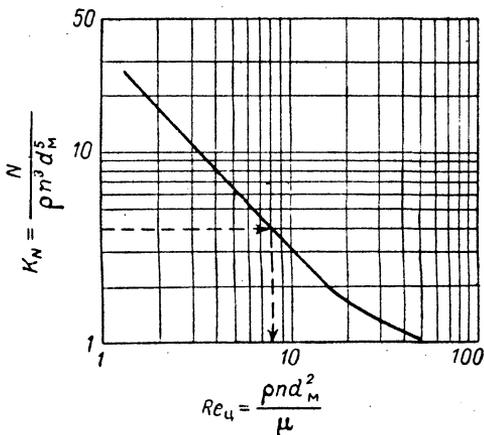


Рис. II-30. Типичная зависимость критерия мощности от критерия Рейнольдса для ньютоновской жидкости.

критерия Рейнольдса все время изменяется и соотношение между сопоставляемыми величинами не может быть представлено уравнением с постоянным значением показателя степени².

¹ Точнее — переходная область турбулентного режима течения. — Прим. ред.

² Имеется в виду уравнение вида $K_N = C' Re_{ц}^a$. — Прим. ред.

Определение значения вязкости при расчетах мощности, потребляемой в случаях перемешивания ньютоновских жидкостей, не представляет особых затруднений. Однако у ньютоновских сред вязкость является функцией градиента скорости сдвига, а иногда и времени перемешивания. До настоящего времени вообще нет данных, необходимых для расчета среднего значения градиента скорости сдвига, который создает мешалка в аппарате. Метцнер и Рид¹, а также Метцнер и Отто² приводят данные о напряжении сдвига при перемешивании ньютоновских сред в малогабаритных аппаратах. Эти авторы оценивали скорость сдвига по кривой зависимости критерия мощности от критерия Рейнольдса (такого вида, как показанная на рис. II-30), предварительно полученной для исследуемой мешалки при перемешивании ньютоновских жидкостей. На основании данных о расходе мощности при перемешивании ньютоновской среды рассчитывали значение критерия мощности и по графику находили критерий Рейнольдса. Установив таким путем величину критерия Рейнольдса, вычисляли затем значение эквивалентной вязкости. Если имеются данные о зависимости вязкости от градиента скорости сдвига для конкретной ньютоновской среды, то эквивалентная скорость сдвига в перемешиваемой системе может быть оценена, как это показано на рис. II-31.

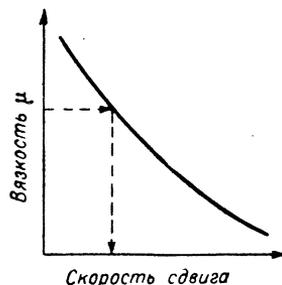


Рис. II-31. Определение градиента скорости сдвига при перемешивании по известному значению эквивалентной вязкости.

При масштабном увеличении размеров аппарата с мешалкой (в частности, при переходе от модели к натуре) наиболее важным вопросом является установление механизма явления. Следует определить, является ли основным для данного процесса образование суспензии, массопередача или химическая реакция. Обычно испытания, которые могут быть проведены в условиях периодического ведения процесса, наиболее удовлетворяют задачам исследования. При изучении хода химической реакции результат превращения определяют во времени для установления влияния концентрации исходных материалов. Результаты опытов, полученные при работе с несколькими различными скоростями вращения мешалки, обычно дают возможность установить общий механизм процесса.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Обыкновенно наиболее важной единственной переменной, определяющей моделирование, является мощность, потребляемая мешалкой. На рис. II-32 представлены кривые, показывающие возможные соотношения между технологическими результатами процесса и затратами мощности. Наклон линий позволяет четко судить о механизме процесса. Например, если тангенс угла наклона выше 0,4, то это означает, что итоговый технологический результат данного процесса определяется массопередачей. Если тангенс угла наклона имеет значение в пределах от нуля до 0,1, то в

¹ Metzner, Reed, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 434 (1955).

² Metzner, Otto, Am. Inst. Chem. Engrs J., 3, 3 (1957).

этом случае, следовательно, результат процесса определяется химическим превращением или механизмом собственно перемешивания.

Если процесс определяется образованием взвеси, то важно изучить действие как радиальнопоточных, так и аксиальнопоточных мешалок.

Каждый индивидуальный процесс имеет свою масштабную характеристику¹. Если имеет место собственно образование суспензии, то процесс следует определенным, ему присущим закономерностям. Если основное влияние оказывает скорость массопередачи, то могут быть использованы методы, сходные с предложенными Баркером и Трейбалом². Если процесс контролируется

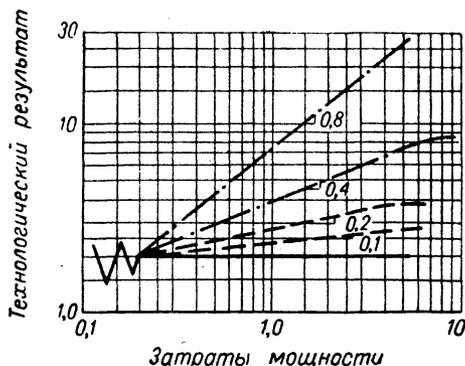


Рис. II-32. Зависимость технологического результата от потребляемой мощности, полученная при изучении процесса на опытной установке.

химической реакцией, то может быть установлен порядок реакции и кривые скорости реакции могут быть использованы как вспомогательные для моделирования по Мак-Маллину и Веберу³.

Нет необходимости всегда обязательно соблюдать геометрическое подобие, так как для определенных целей отношение линейных размеров крупногабаритных аппаратов может быть изменено с тем, чтобы сохранить надлежащие соотношения других параметров. Например, отношение удельных затрат мощности в двух различных системах не может быть таким же, как соотношения насосного действия, максимального, среднего и минимального напряжения сдвига в этих двух системах. Условия перемешивания в крупногабаритном аппарате не могут быть точно такими же, как в малогабаритном сосуде, и поэтому необходимо исследовать влияние всех переменных, чтобы обеспечить необходимые условия проведения процесса.

ЭКОНОМИКА

Стоимость аппаратов с мешалками меняется в широких пределах в зависимости от качества металла.

¹ Иначе говоря, увеличение размеров аппарата, предназначенного для каждого данного процесса, следует производить в соответствии с закономерностями этого процесса. — *Прим. ред.*

² Barker, Treybal, *Am. Inst. Chem. Eng. J.*, 6, 289 (1960).

³ McMullin, Weber, *Chem. a. Met. Eng.*, 42, (5), 254 (1935).

Для ориентировки в табл. II-2 приводятся относительные цифры. Эти данные характеризуют преимущественно аппараты с турбинными мешалками.

ТАБЛИЦА II-2

Относительная стоимость аппаратов с мешалками¹

Тип оборудования	Относительная стоимость
Вал и мешалка стальные, сосуд открытый	1,0
Вал и мешалка из нержавеющей стали, сосуд открытый	1,3
Вал и мешалка из нержавеющей стали, сосуд закрытый; сальник на давление до 1 Мн/м ² (с гарантией)	1,7
Вал и мешалка из нержавеющей стали; сменное герметичное уплотнение на давление до 1 Мн/м ² (с гарантией)	2,1

Стоимость аппаратов с перемешивающими устройствами зависит от мощности и скорости вращения мешалки, обе эти характеристики должны быть приняты во внимание при рассмотрении данных о стоимости оборудования. Однако, чтобы определить стоимость аппарата, предназначенного для того же процесса химического превращения, но большего размера, можно для ориентировочной оценки воспользоваться соотношением:

$$\text{Стоимость аппарата} \sim \text{объем аппарата}^{0,6}$$

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

3. Штербачек, П. Тауск, *Перемешивание в химической промышленности*, перев. с чешск., Госхимиздат, 1963. — У. Л. Уилкинсон, *Ньютоновские жидкости*, Гидромеханика, перемешивание и теплообмен, Изд. «Мир», 1964. — В. В. Кафаров, *Процессы перемешивания в жидких средах*, Госхимиздат, 1949. — В. И. Бегачев, Л. Н. Брагинский, И. С. Павлушенко, сб. «Процессы химической технологии» (гидродинамика, тепло- и массопередача), Изд. «Наука», 1965, стр. 120. — Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, И. С. Павлушенко, *ЖПХ*, XXXVII, № 9, 1984 (1964). — С. Я. Гзовский, *Хим. и нефт. маш.*, № 3 (1965). — М. Д. Глуз, И. С. Павлушенко, *ЖПХ* XXXIX, № 11, 2475; № 12, 2719 (1966); XXXX, № 7, 1485 (1967). — И. Н. Карасев, С. Я. Гзовский, *Хим. и нефт. маш.*, № 6, 16 (1964). — И. С. Павлушенко, М. Д. Глуз, *ЖПХ* XXXIX, № 10, 2288 (1966). — И. С. Павлушенко, Е. М. Демьянова, *ЖПХ*, XXXIX, № 7, 1492 (1966). — И. С. Павлушенко, С. С. Максимова, сб. «Процессы химической технологии» (гидродинамика, тепло- и массопередача), Изд. «Наука», 1965, стр. 78. — МН 5874-66. Аппараты с перемешивающими устройствами вертикальные. Перемешивающие устройства механические. Параметры, конструкции и исполнительные размеры. — РТМ 144-66. Перемешивающие устройства механические. Область применения, методика расчета. — Holland, Chapman, *Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks*, New York, 1966. — Uhl, Gray (ed.), *Mixing. Theory and Practice*, New York, v. 1, 1966; v. II, 1967.

¹ Соотношения, приведенные в табл. II-2, характерны для промышленности США. — *Прим. ред.*

ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ¹

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Выщелачиванием называется процесс отделения растворимых веществ от нерастворимой твердой фазы путем растворения в жидком растворителе². Растворимая составная часть может быть чистой жидкостью либо раствором, а также другим твердым веществом, которое более или менее тесно смешано с нерастворимым материалом. Твердая фаза может состоять из отдельных частичек, таких как кристаллический осадок, или может быть полупроницаемым материалом, состоящим из клеток, как, например, древесина, рыба печень. По этой причине растворимая составная часть либо быстро растворяется в растворителе и отделяется от нерастворимой твердой фазы, либо удерживается в полостях между частицами или внутри клеток и растворяется только после диффузии через слой нерастворимого материала. Иногда вещества называются растворимыми только после химического взаимодействия с растворителем.

Выщелачивание мало отличается от промывки осадков после фильтрации, и многие типы аппаратов для выщелачивания сходны с промывной секцией различных фильтров. Однако при выщелачивании от нерастворимой твердой фазы отделяется большее количество растворимого вещества, чем при промывке осадков после фильтрации, и свойства нерастворимой фазы во время выщелачивания могут изменяться в значительно большей мере. Скорость растворения определяется коэффициентом массопередачи от растворимого вещества к растворителю или зависит от скорости диффузии через стенки клеток или от скорости химической реакции либо от обоих факторов. Для повышения скорости диффузии желательно измельчение частиц твердой фазы до возможно меньших размеров. Это, однако, может привести к серьезным затруднениям при проведении процессов физического отделения твердой фазы от раствора.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Оборудование для выщелачивания разделяется на два типа: установки для обработки твердых веществ проницаемых, с открытыми порами, в которых растворитель проходит (фильтруется) через неподвижный слой твердого материала, и установки для обработки твердых веществ непроницаемых или материалов, разлагающихся в течение процесса выщелачивания. В установках второго типа твердые вещества перемешиваются с жидкостью, а затем отделяются от нее. Установки обоих типов могут быть как периодического, так и непрерывного действия.

Оборудование для выщелачивания фильтрационно-проточного типа. Аппараты для выщелачивания фильтрационно-проточным методом подразделяются на следующие виды:

- открытые сосуды и чаны,
- диффузионные батареи,
- скребковые экстракторы,
- ковшевые экстракторы,
- червячные (винтовые) экстракторы,
- горизонтально-дисковые экстракторы.

¹ Cofield, Chem. Eng., 58 (1), 127 (1951). — Lamont, Canad. J. Chem. Eng., 36, 153 (1958). — McCabe, Smith, Unit Operations of Chemical Engineering, ch. 13, New York, 1956.

² Автор раздела не разграничивает процессы выщелачивания и экстракции. — Прим. ред.

Аппараты двух первых видов представляют собой большие емкости с ложными днищами, на которых неподвижным слоем располагается твердая фаза. Материал орошается растворителем до тех пор, пока содержание извлекаемого вещества не уменьшится до предела, устанавливаемого технико-экономическими расчетами, после чего материал выгружается. Обычно растворитель подается противотоком через батарею аппаратов, причем свежий растворитель направляется в аппарат, содержащий наиболее истощенный материал. В типичной операции обогащения руды используются аппараты размерами 53×20×5,5 м, в которых

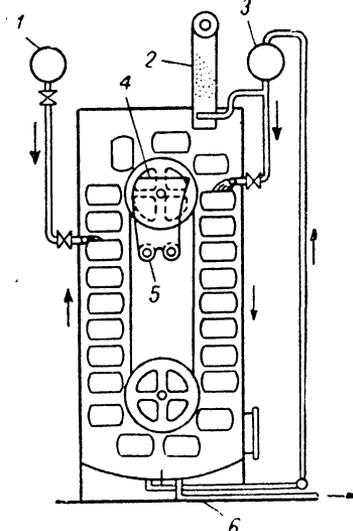


Рис. II-33. Схема многоковшевого экстрактора для соевых бобов:

1 — свежий растворитель; 2 — сухие хлопья бобов; 3 — частично обогащенный растворитель; 4 — бункер для влажных хлопьев; 5 — лопастной транспортер; 6 — растворитель, обогащенный извлекаемыми веществами.

перерабатывается 9 тыс. т руды за цикл продолжительностью 13 суток. Аппараты некоторых конструкций работают под давлением, чтобы предотвратить испарение легколетучих растворителей или повысить скорость фильтрации. Батареи аппаратов, работающих под давлением, при противотоке растворителя называются диффузионными батареями.

Крупнозернистые материалы выщелачивают фильтрационно-проточным методом также в аппаратах с движущимся слоем материала, например, в одно- и много-ярусных скребковых экстракторах, аппаратах с многоковшевым подъемником, аппаратах с червячным (винтовым) транспортером и аппаратах других типов. На рис. II-33 показана¹ схема многоковшевого экстрактора для обработки таких материалов, как соевые бобы.

¹ McCabe, Smith, Unit Operations of Chemical Engineering, ch. 13, New York, 1956.

производительностью от 0,6 до 6,0 кг/сек. Ковши с дырчатыми днищами закреплены на движущейся бесконечной ленте. Сухой материал загружается в опускающиеся ковши в верхней части установки и орошается частично обогащенным раствором. Когда ковши поднимаются на другой стороне аппарата, материал орошается свежим раствором, идущим противотоком. Остаток после извлечения выгружается из ковшей на лопастной транспортер в верхней части аппарата, а растворитель, обогащенный целевыми компонентами, откачивается со дна кожуха аппарата.

Экстрактор непрерывного действия с червячным транспортером, предназначенный для обработки легко

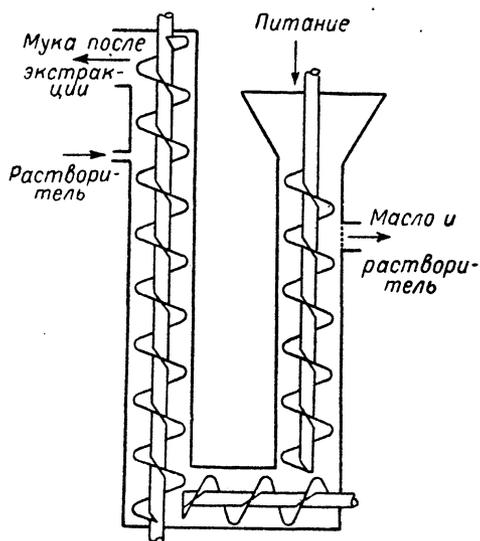


Рис. II-34. Схема червячного экстрактора.

проницаемых твердых материалов, схематически показан на рис. II-34¹. Червяки вращаются с различными скоростями так, чтобы сжимать материал в горизонтальной секции. Твердые вещества и растворитель движутся через U-образный аппарат противотоком.

В ротационном экстракторе несколько секций движутся по кругу над неподвижным дырчатым диском. Секции последовательно загружаются твердым материалом, проходят под оросительными устройствами и разгружаются через специальное большое отверстие в диске.

Подробное описание различных аппаратов для выщелачивания приводится в специальной литературе².

Оборудование для выщелачивания из раздробленных твердых материалов. Оборудование для выщелачивания из тонкораздробленных твердых веществ при перемешивании и последующем отделении твердой фазы включает следующие виды аппаратов:

- аппараты с мешалками,
- аппараты с пневмоциркуляционным перемешиванием,
- отстойники,
- центрифуги непрерывного действия.

Аппараты с мешалками. Аппараты с турбинными мешалками, установленными по оси сосуда, обычно применяют для растворения твердых веществ в жид-

костях и для выщелачивания из тонкоизмельченных твердых материалов. При обычном растворении интенсивность перемешивания оказывает большое влияние на результат процесса, но если растворение контролируется диффузией внутри частиц твердой фазы, то интенсивность перемешивания оказывает малое влияние или вообще не играет никакой роли. Коэффициент массопередачи при обычном растворении твердого вещества в жидкости может быть найден для случая перемешивания шестилопастной турбинной мешалкой в сосуде с перегородками, целиком заполненном жидкостью (т. е. при отсутствии свободной поверхности жидкости) из критериального уравнения¹:

$$\frac{KD}{D_d} = 0,052 \left(\frac{\rho n d_m^2}{\mu} \right)^{0,84} \left(\frac{\mu}{\rho D_d} \right)^{0,5} \quad (\text{II-13})$$

где K — коэффициент массопередачи, м/сек; D — диаметр аппарата, м; D_d — коэффициент диффузии, м²/сек; d_m — диаметр мешалки, м; n — скорость вращения мешалки, 1/сек; μ — динамический коэффициент вязкости раствора, н·сек/м²; ρ — плотность раствора, кг/м³.

В литературе² имеются также данные о скорости растворения в сосудах без перегородок, в частности, при перемешивании турбинными мешалками с четырьмя наклонными лопатками. Приведены корреляции для минимальной скорости вращения мешалки, при которой обеспечивается суспендирование всей твердой фазы, и для скорости вращения, при которой воздух засасывается в жидкость центральным вихрем. Растворение твердых веществ должно проводиться при скорости вращения мешалки, лежащей между этими двумя предельными значениями.

Если процесс контролируется внутренней диффузией, то единственным определяющим фактором является время пребывания материала в аппарате. Интенсивность перемешивания оказывает малое влияние на скорость растворения, и поэтому мощность, подводимая к мешалке, должна быть минимальной, достаточной только для поддержания твердых частиц во взвеси на желательном уровне. Могут применяться радиальнопоточные и аксиальнопоточные турбины, пропеллерные мешалки и лопастные мешалки большого диаметра. При непрерывном проведении процесса время пребывания в аппарате некоторых частиц, особенно наименьших или наибольших размеров в данной смеси, может значительно отличаться от среднего времени пребывания всего материала в сосуде. Это обстоятельство следует принимать в расчет при проектировании аппаратов для выщелачивания и при моделировании по результатам испытаний на опытной установке.

Аппараты с пневмоциркуляционным перемешиванием. Руды золота, урана и других металлов часто выщелачивают в аппаратах большой емкости с пневмоциркуляционным перемешиванием, которые иногда называют аппаратами Пачука. Типичный аппарат этого типа представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд с коническим дном, обычно имеющим угол конусности 60°, диаметром около 7 м и общей высотой около 14 м. В некоторых аппаратах этого типа воздух, подаваемый через отверстие в нижней части конического дна, свободно поднимается в объеме жидкости. Более часто по центру аппарата вертикально устанавливают циркуляционную трубу (для аппарата

¹ Barker, Treybal, Am. Inst. Chem. Engrs J., 6, 289 (1960).

² Nagata, Soc. Chem. Engrs (Japan), 20, 11 (1956). — Nagata, Adachi, Yamaguchi, Mem. Fac. Eng. Kyoto Univ., 20, 72 (1958).

¹ McCabe, Smith, Unit Operations of Chemical Engineering, ch. 13, New York, 1956.

² Coffield, Chem. Eng., 58 (1), 127 (1951).

указанных выше размеров диаметром $\sim 0,45$ м), проходящую от дна почти до поверхности жидкости (см. рис. II-14). Воздух подают к нижнему концу этой трубы, и образующаяся трехфазная система (газ—жидкость—твердые частицы) поднимается по трубе со значительной скоростью. Воздух выделяется на поверхности жидкости, а перемешиваемая взвесь движется по кольцевому пространству аппарата вниз и снова увлекается в циркуляцию. В литературе¹ приводится описание работы аппаратов этого типа с центральной циркуляционной трубой и без нее. Уменьшение длины циркуляционной трубы от 14 до 6 м приводит к повышению скорости растворения при обработке золотой руды цианидным способом².

Установки для непрерывного выщелачивания. Аппараты с мешалками и пневматическим перемешиванием

обычно работают периодически. После того как выщелачивание прошло до требуемого предела, перемешивание прекращают и отделяют твердые частицы осаждением под действием силы тяжести или фильтрованием на отдельно смонтированных фильтрах. Непрерывное противоточное выщелачивание обеспечивается при использовании нескольких отстойников, соединенных последовательно, как это делается при проведении непрерывной противоточной декантации (стр. 173). Если контакт между фазами в отстойнике недостаточен, то между каждыми двумя отстойниками устанавливают аппарат с мешалкой. Если частицы твердой фазы очень малы и осаждение под действием силы тяжести проходит неудовлетворительно, отстойники могут быть заменены осадительными центрифугами различных типов.

ИОНООБМЕН³

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБОРУДОВАНИЯ

Ионообменные процессы обычно проводят в аппаратах колонного типа, снабженных трубопроводом, клапанами и дополнительными устройствами, необходимыми для регенерации смолы на месте. Конструкция таких колонн определяется требуемой производительностью, величиной партии, которая должна быть обработана за время между двумя регенерациями смолы, и объемом смолы, который необходим по условиям процесса. Вообще говоря, производительность определяет наименьший и наибольший допустимые диаметры колонны. Высота слоя смолы должна быть достаточной для того, чтобы в аппарате находился необходимый объем смолы и чтобы была обеспечена высота слоя, минимальная для эффективной работы оборудования. Требуемая минимальная высота слоя определяется эмпирически. Если слой смолы слишком мал, то трудно обеспечить равномерное распределение жидкости и в течение цикла не может быть достигнут полный обмен. Часть слоя смолы высотой менее 50—75 мм неизбежно не будет полностью использована из-за неравномерного распределения потока жидкости, что при малой общей высоте слоя приведет к значительным потерям. Особенно трудно обеспечить равномерное распределение, если оборудование должно работать при значительных изменениях производительности. Обычно в установках для водоочистки допустимо четырехкратное изменение скорости потока. При обработке ценных продуктов или при относительно высоких концентрациях ионов в растворе предпочтительнее меньшие изменения нагрузки.

Если требуемый объем смолы значительно больше, чем объем колонны, который соответствует данной производительности, желательно накопление продукта в промежуточной емкости, чтобы сделать возможным проведение процесса с наименьшей приемлемой произ-

водительностью. Если для данной производительности требуется большая колонна, чем нужно, чтобы загрузить необходимый объем смолы, то следует найти компромиссное решение. Иногда в этом случае трудности могут быть существенно снижены, если использовать установку, состоящую из нескольких параллельно включенных колонн небольшого размера с автоматической регенерацией. Обычно при такой системе в одной колонне проводится регенерация смолы, а остальные колонны позволяют регулировать производительность. Как будет рассмотрено ниже, непрерывно действующее оборудование легче приспособить к работе в указанных крайних случаях, что позволяет резко снизить требования к смоле.

Перед тем как устанавливать размеры ионообменного оборудования, необходимо иметь полный анализ воды или раствора, подлежащего обработке. Должна быть известна также поглотительная способность смолы. Наиболее часто встречающиеся ионообменные смолы не обладают селективными свойствами; все одноименные ионы будут обмениваться данной смолой вне зависимости от того, требуется ли это по технологическим соображениям или нет. В литературе приводится большое количество данных о поглотительной способности и применению различных смол, но эти сведения недостаточно точны для практического использования и при проектировании могут быть полезны только специалистам. В случаях, когда процесс, протекающий в сходных условиях, еще недостаточно освоен на производстве и при разработке всех крупных проектов новых производств, целесообразны лабораторные работы или испытания на опытной установке для определения действительной емкости смолы, степени регенерации, общего срока службы и качества получаемого продукта.

Обычно модельный переход к промышленному оборудованию почти любого размера возможен по результатам, полученным на колоннах диаметром 25—50 мм, но выполнять такое моделирование должны только специалисты.

В табл. II-3 приведены типичные характеристики оборудования. Эти данные следует использовать только для предварительной оценки, но нельзя их рассматривать как обязательные.

Представленные области использования оборудования относятся к обработке воды. Допустимые скорости движения потока и высоты слоя смолы при химических процессах несущественно отличаются от приведенных.

¹ L a m o n t C a n a d. J. Chem. Eng., 36, 153 (1958).

² Сомнительные сведения. Как правило, уменьшение высоты центральной трубы приводит к понижению скорости циркуляции. — Прим. ред.

³ N a c h o d, S c h u b e r t, Ion Exchange Technology, N. Y., 1956 (есть перевод — см. стр. 141). — R o b e r t s, Developments in Continuous Ion Exchange Equipment for AEC Applications, Oak Ridge Natl. Lab. Rept ORNL-2504, May 21, 1958. — R y a n, Wheelwright, US AEC, Rept HW-55893, Jan. 2, 1959. — S e t t e r, G o o g i n, M a r r o w, US AEC, Rept Y-1257, July 9, 1959.

ТАБЛИЦА 11-3

Проектные характеристики ионообменных аппаратов с неподвижным слоем

Тип смолы	Наибольшая и наименьшая нагрузки, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$	Наименьшая высота слоя, м	Наивысшая рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	Рабочая емкость, кг-экв CaCO_3 на 1 м^3	Количество регенерирующего вещества
Катионит	4,8–8,2 0,7–1,4	0,6–0,75 0,6–0,75	115 115	40–75	2,3–6,8 кг NaCl
				25–45	1,8–5,4 кг H_2SO_4 (плотность 1840 $\text{кг}/\text{м}^3$)
				35–70	4,5–13,6 кг HCl (плотность 1163 $\text{кг}/\text{м}^3$)
Слабо- и среднесолевой анионит	2,7–4,8 0,7–1,4	0,75–0,9 0,75–0,9	40 40	40–55	1,4–1,8 кг NaOH
Сильноосновной анионит	3,4–4,8 0,7–1,4	0,75–0,9 0,75–0,9	40–50 40–50	20–35	1,8–3,6 кг NaOH
Эквивалентная смесь катионита с сильноосновным анионом	5,4–8,2 ¹	0,9–1,2	40	10–20	Так же, как для катионита и анионита по отдельности

¹ Нагрузки до 70 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$ допустимы при очистке конденсатной или деионизированной воды.

ТИПИЧНАЯ ИОНООБМЕННАЯ КОЛОННА

Типичный ионообменник представляет собой вертикальный цилиндрический котел с защитной облицовкой или из нержавеющей стали, работающий под давле-

пределителя, а иногда слоем кусков кварца или антрацита определенной крупности. Распределитель может быть спроектирован так, чтобы предотвращать потери частицы смолы. Для этого прикрывают перфорированную трубу горизонтальной сеткой из нержавеющей

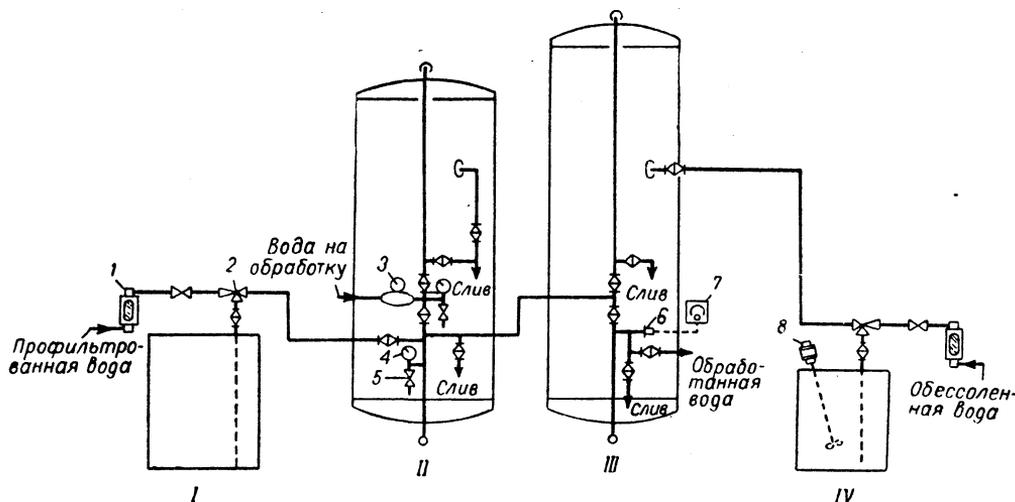


Рис. 11-35. Технологическая схема двухслойной обессоливающей установки:

I — бак с кислотой 1,37 × 1,52 м; II — катионообменник 1,68 × 3,35 м; III — анионообменник 1,52 × 3,96 м; IV — бак со щелочью 1,07 × 1,22 м.
1 — расходомер; 2 — эжектор; 3 — расходомер; 4 — манометр; 5 — клапан для отбора проб; 6 — датчик; 7 — прибор для определения электропроводности; 8 — мешалка.

нием. Облицовки обычно делают из натуральной или синтетической резины. Разбрызгивающие распределители устанавливают у крышки и у дна аппарата, часто отдельный распределитель устанавливают для подачи регенерирующего раствора. Слой зерен ионообменной смолы поддерживается решеткой нижнего рас-

стали или полихлорвинила или же помещают такие сетки между перфорированными пластинами, установленными у крышки или дна колонны. Аппарат снабжают вентилями, позволяющими управлять нисходящим потоком, производить промывку восходящим потоком, вводить регенерирующий раствор и отмывать

излишек этого раствора, как показано схематически на рис. II-35. Если установка предназначена для обработки продуктов более ценных, нежели вода, насколько возможно полнее удаляют эти продукты перед регенерацией и столь же тщательно освобождаются от промывной воды перед заполнением колонны раствором. Некоторое разбавление водой неизбежно, так как

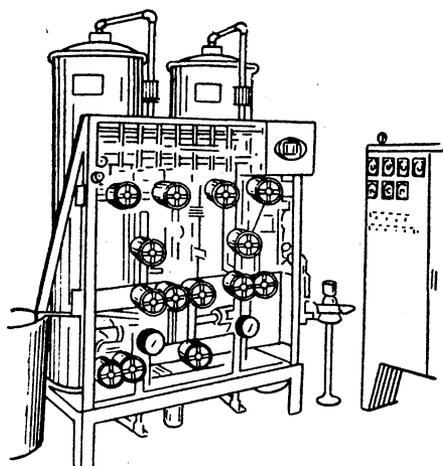


Рис. II-36. Автоматическая двухслойная обессоливающая установка пакетного типа.

смолы — пористые материалы. Потери могут быть сведены до минимума при продувке слоя смолы воздухом для удаления из смолы воды или раствора, а также при улавливании растворенного продукта, находя-

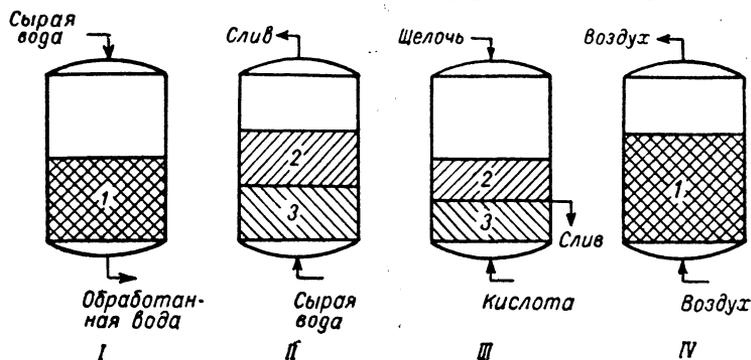


Рис. II-37. Принцип действия ионообменника со смешанным слоем смолы:

I — рабочий период; II — период промывки обратным током; III — период регенерации; IV — период смешивания смол.

1 — смесь смол; 2 — анионит; 3 — катионит.

Поскольку процесс регенерации совершается при последовательном действии нескольких клапанов, его целесообразно автоматизировать. В многоколонных установках обычно осуществляется непрерывный процесс, причем переключение отдельных колонн на регенерацию выполняется автоматически. Контроль работы оборудования основан на измерениях электропроводности. Для продуктов, электропроводность которых при ионообменной обработке изменяется незначительно, могут применяться объемные методы контроля. Автоматическая двухслойная (пакетного типа) обессоливающая установка с пневматическими клапанами, действующими от реле времени, показана на рис. II-36.

ИОНООБМЕННИКИ СО СМЕШАННЫМ СЛОЕМ

Типичный ионообменник, описанный выше, содержит только один тип смолы (либо катионит, либо анионит) и регенерация смолы в этом случае осуществляется раствором одного реагента — либо раствором сильной кислоты, либо раствором сильного основания. В ионообменниках со смешанным слоем катионит и анионит находятся в одной колонне. В течение рабочей стадии или стадии загрузки иониты находятся в виде однородной смеси. Перед регенерацией при промывке обратным током отделяют легкий анионит от тяжелого катионита. Аппарат снабжен сетчатым распределителем, расположенным в плоскости раздела двух слоев ионитов так, что каждый ионит по отдельности может быть регенерирован на месте.

Наиболее общий метод регенерации, иллюстрируемый на рис. II-37, позволяет вести одновременно регенерацию двух смол, причем раствор щелочи течет через слой анионита вниз к распределителю, расположенному в плоскости раздела слоев ионитов, а раствор кислоты проходит вверх через слой катионита. Регенерирующие растворы взаимно ограничивают про-

шегоса в растворах, выходящих из колонны при операциях, связанных с регенерацией.

Высота колонны должна быть значительно больше высоты слоя смолы, чтобы дать возможность слою расширяться во время промывки потоком, идущим в направлении, обратном движению потока обрабатываемой жидкости. Обычно высота свободной части колонны составляет от 50 до 100% высоты слоя смолы.

никновение щелочи в слой катионита и кислоты в слой анионита и нейтрализуются до поступления в сливную трубу. После нейтрализации и промывки анионит и катионит снова смешивают, подавая в колонну сжатый воздух. Нижний распределитель обычно сетчатый, поскольку трудно обеспечить подачу сжатого воздуха через несущий слой без его нарушения и поскольку необходимо устранить возможность загрязнения продук-

та. Чтобы обеспечить равномерную по высоте отработку смолы, часто применяют сосуды с горизонтальным плоским дном, а в колоннах большого диаметра вваривают горизонтальное ложное дно в стандартный аппарат с выпуклым днищем.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИОНООБМЕННЫХ УСТАНОВОК

Применительно к ионообменникам, как и в отношении других типов оборудования, термину «автоматический» может быть придано разное содержание. В полностью автоматизированной ионообменной установке должны быть обеспечены: 1) хранение запаса реагентов для регенерации; 2) автоматическое перекачивание реагентов из хранилища в ионообменники и автоматическое разбавление этих реагентов; 3) кондуктометрическое (или основанное на других принципах) определение качественных характеристик вытекающей жидкости, а при необходимости корректировка процесса; 4) возможность отличать нарушение режима, связанное с отработкой смолы от скоропреходящего понижения качества продукта и принимать соответствующие меры в каждом случае; 5) полностью автоматизированный процесс регенерации, включая автоматический контроль потоков и разбавления регенерирующих растворов; 6) полностью автоматизированный переход к рабочей стадии или переключение в резерв (смотря по надобности); 7) безусловно надежная защита, исключающая какой-либо риск загрязнения вытекающей жидкости регенерирующими растворами; нижний слив из ионообменной колонны или же подача воды или продукта через верхние патрубки в хранилища реагентов для регенерации; 8) сигнализация о любом нарушении заданного режима и устройства, извещающая аппаратчика о причинах, вызвавших нарушение режима, а также о месте, где это нарушение произошло.

Некоторые установки (многие из них большой производительности) имеют все эти особенности. Регистрирующие приборы и тщательно разработанные щиты управления дают возможность аппаратчику четко управлять процессом. Стоимость таких установок определяется в основном стоимостью контрольно-измерительных приборов, а не размерами основного ионообменного оборудования и, следовательно, надо идти на компромисс, особенно если ионообменники невелики. Однако автоматический контроль весьма надежен даже при небольшой производительности. Автоматическая аппаратура, отвечающая установленным техническим требованиям, частично уменьшает стоимость рабочей силы, но часто стоимость содержания автоматических установок превосходит стоимость ручного управления установкой, в частности, если оборудование не отвечает условиям эксплуатации. Весьма желательно применение даже самой ограниченной автоматизации — от 3 до 7 пункта, — стоимость которой не выходит за разумные пределы. Надо также включить пункт 8 (сигнализация), но, может быть, в значительно более простом оформлении, чем на крупных установках.

ИОНООБМЕННАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ

Ионообмен наиболее широко применяется при обработке воды. При использовании соответствующих ионообменников (отдельных или в серии) вода почти любого природного источника может быть обработана так, что будет пригодна для любой цели — от простых операций промывки, где требуется только умягчение

воды, до наиболее ответственных случаев в производстве химикатов и электронике, где может требоваться вода с удельным электрическим сопротивлением свыше 100 *ком·м*. Если вода в источнике содержит муть, соли железа, марганца, свободный хлор или органические вещества, может быть необходима или желательна предварительная обработка воды другими способами.

Умягчение воды. Общезвестным примером ионообмена является умягчение воды. Для этого процесса используют цеолит или катионитовую смолу в натриевом цикле. Регенерацию проводят обычной поваренной солью. В таком ионообменнике происходит простой обмен ионов натрия на ионы кальция и магния так, что вытекающая вода не будет содержать солей, образующих накипь, и не будет препятствовать действию мыла или других моющих средств. Умягчение воды является распространенным и хорошо известным процессом, который не нуждается в более обстоятельном рассмотрении.

Катионообмен. Катионообменные смолы являются соединениями того же типа, что и применяемые для умягчения воды. Регенерация этих смол может быть проведена серной или соляной кислотой. Катиониты содержат подвижный ион водорода и способны удалять ионы натрия в той же мере, как ионы кальция и магния. Таким образом, вода, прошедшая катионообменник, будет иметь кислую реакцию. Если в воде находится большое количество карбонатов, то содержание всех растворенных твердых веществ может быть снижено в результате катионообмена и последующего удаления свободной двуокиси углерода, например, при аэрировании. Остающиеся анионы удаляют в анионообменниках, как описано ниже.

Анионообмен. Различают два главных типа анионитовых смол слабоосновные и сильноосновные. Слабоосновные смолы (здесь под этим термином понимаются также смолы, которые иногда называют «среднеосновные») действуют как адсорбенты сильных кислот. Таким образом, вода, которая была «декаатионизирована» и освобождена от растворенных газов, при прохождении через такую смолу может быть «деионизирована». Аниониты регенерируют раствором едкого натра, а в некоторых случаях кальцинированной содой или аммиаком.

Слабоосновные анионитовые смолы применяют, главным образом, при получении деионизированной воды для промывок, при составлении растворов для гальванических ванн, а также приготовлении растворов других химических и фармацевтических препаратов, когда существенно важным условием является особая чистота. Эти аниониты применяются чаще, чем сильноосновные смолы, так как они дешевле. Однако слабоосновные аниониты не могут удалить из воды растворенные в ней слабые кислоты, такие как двуокись углерода и двуокись кремния. Сильноосновные аниониты, впервые полученные в 1948 г., обменивают подвижные гидроксильные ионы на анионы этих очень слабо ионизированных кислот и даже на анионы нейтральных солей — таких, например, как поваренная соль.

Деионизация воды. Декаатионизированная вода после прохождения через сильноосновную анионообменную смолу полностью деионизируется, так как все катионы будут обменяны на ионы водорода, а все анионы на гидроксильные группы. В действительности вода после однократного прохождения через катионообменник и последующего прохождения через анионообменник с сильноосновной смолой содержит незначительное

остаточное количество растворенных солей — обычно от двух до пяти частей на миллион частей гидрата окиси или карбоната натрия. Содержание двуокиси кремния, как правило, снижается до одной части на десять миллионов частей или менее, а путем специальной обработки можно получить воду для питания котлов сверх высокого давления с содержанием двуокиси кремния менее двух частей на сто миллионов.

Прохождение через вторую катионито-анионитовую установку может обеспечить дальнейшее уменьшение содержания примесей в воде. Однако такое устройство может оказаться очень громоздким и дорогим, а поэтому в случаях, когда требуется сверхчистая вода с электрическим сопротивлением 10 ком·м и выше, обычно используют деионизаторы со смешанным слоем. Если полистирольную катионообменную смолу с активной сульфогруппой тщательно смешать с анионообменной смолой типа четвертичного аммониевого основания, то вода, проходящая через слой такой смеси ионообменных смол, обрабатывается, как при прохождении нескольких катионито-анионитовых установок, и содержание ионов в ней снижается до минимума. Аппаратура, действующая по этому принципу, обычно употребляется при получении особо чистой воды в производстве электронного оборудования и чистых химикалий, воды для питания котлов высокого давления, воды для ядерных реакторов¹ и в ряде других случаев.

Обработка воды в ионообменнике со смешанным слоем имеет ряд преимуществ. Кроме того, что получается вода с электрическим сопротивлением, близким к теоретически возможному, этот метод обработки обеспечивает более однородную очистку и позволяет производить воду с более постоянным значением рН, нежели это достижимо при раздельном воздействии катионообменных и анионообменных смол. Содержание кремневой кислоты может быть снижено до пределов, доступных аналитическому определению. Имеются сообщения² о получении воды с содержанием одной части кремневой кислоты на миллиард частей при общем содержании растворенных твердых веществ одна часть на десять миллионов и рН в пределах от 6,8 до 7,0.

Часто вода, получаемая при ионообменной очистке, имеет более высокое качество, чем это требуется по условиям производства, так что мелкие неполадки в работе ионообменной установки обнаруживаются значительно раньше, чем произойдет такое изменение качества воды, которое может сказаться на основных производственных процессах. Изменения качества воды, поступающей на очистку, и скорости потока, даже значительно превосходящие расчетные нормы, оказывают очень малое влияние или даже совсем не влияют на качество очищенной воды. Когда смешанный слой не может быть использован непосредственно для очистки сырой воды, его часто применяют для окончательной обработки.

Кривые, представленные на рис. II-38 и II-39, позволяют сопоставить результаты, достижимые при использовании ионообменных установок трех основных типов: двухслойной со слабоосновным анионитом, двухслойной с сильноосновным анионитом и ионообменника со смешанным слоем. Как показано на рис. II-38³, двухслойный ионообменник со слабоосновным анионитом дает возможность получать воду с более низким

рН, чем ионообменник с сильноосновной смолой. Это объясняется присутствием растворенной двуокиси углерода, которая является результатом образования в катионообменнике нестойкой угольной кислоты. Свободная двуокись углерода удаляется сильноосновными

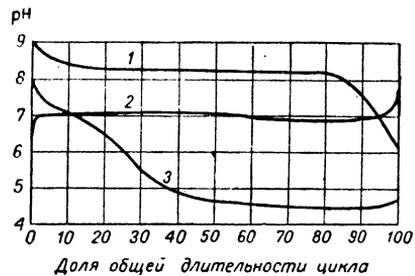


Рис. II-38. Изменение рН деионизированной воды за время рабочего цикла в ионообменных установках трех основных типов:

1 — сильноосновной анионит; 2 — смешанный слой; 3 — слабоосновной анионит.

анионитами. Кривые на рис. II-38, представляющие ход изменения рН в двухслойных ионообменных установках с сильноосновной анионитовой смолой, показывают выравнивание рН, происходящее при сравнительно большом рабочем цикле и последующее понижение рН, вызванное истощением анионитовой смолы.

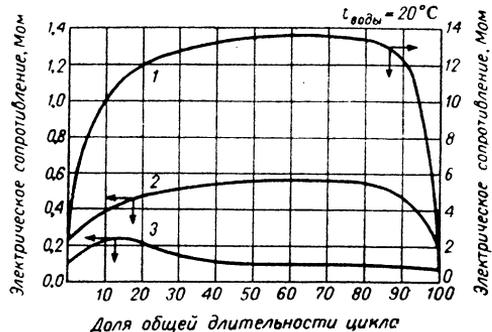


Рис. II-39. Изменение электрического сопротивления деионизированной воды за время рабочего цикла в ионообменных установках трех основных типов:

1 — смешанный слой; 2 — сильноосновной анионит; 3 — слабоосновной анионит.

Если бы катионитовая смола истощалась ранее анионитовой, то имело бы место быстрое повышение рН. Ионообменник со смешанным слоем, как показывает тот же рис. II-38, позволяет получать в течение всего рабочего цикла воду более постоянного качества с рН очень близким к 7,0. Вода, обработанная в ионообменнике со смешанным слоем, обычно столь чиста, что на величину рН существенно влияют очень небольшие изменения количества растворенного углекислого газа. Образец деионизированной воды, выставленный на воздух, абсорбирует двуокись углерода и рН быстро падает.

¹ Thompson, Reents, Ind. Eng. Chem., 51, 1259 (1959).

² Henderson, Chem. Processing (June 1958).

³ Все кривые, представленные на этом рисунке, взяты из показаний нормальных контрольно-измерительных приборов.

Примеры применения ионообмена для очистки воды. *Натриевый цикл катионообмена.* Это общезвестный цеолитовый или основной ионообменный процесс умягчения воды. При прохождении жесткой воды через катионит, регенерированный поваренной солью, удаляются кальций и магний, которые дают накипь и взаимодействуют с мылом. Ионы этих металлов замещаются подвижным ионом натрия, образующим только растворимые соли. Уменьшения количества растворенных твердых веществ при такой обработке не происходит.

Натриевое умягчение воды с последующим хлоридным циклом анионообмена. Этот процесс применяется для уменьшения жесткости и щелочности воды, предназначенной для питания малопроизводительных котельных агрегатов низкого давления. Все анионы, находящиеся в воде, оказываются замененными ионом хлора сильноосновной анионитовой смолы, регенерированной хлоридом натрия. Простота этой операции является ее главным преимуществом. Общее количество растворенных твердых веществ, в частности кремневой кислоты, при такой обработке не уменьшается.

Натриевый цикл умягчения с последующим гидроксильным циклом анионообмена. В этих процессах все растворенные твердые вещества оказываются замененными едким натром, а содержание кремневой кислоты доводится до низкого уровня (хотя и не до столь низкого, как в случае, когда анионообмену предшествует водородно-катионный обмен). Вода, прошедшая такую обработку после частичной нейтрализации щелочи, иногда используется для питания котлов, а также применяется в производстве каустической соды.

Водородный цикл катионообмена, совмещенный с натриевым циклом катионообмена. При этих процессах щелочи могут быть заменены двуокисью углерода, а последняя удалена из воды. Соответствующее количество воды, умягченной в натриевом цикле (или, иногда, сырой воды), смешивают с водой, прошедшей водородный цикл для нейтрализации в ней минеральных кислот, и получают воду с нулевой жесткостью, низкой щелочностью и уменьшенным содержанием растворенных твердых веществ. Такая вода пригодна для питания котлов низкого и среднего давления (до 4 Мн/м²). Кремневая кислота не удаляется.

Водородный цикл катионообмена с последующим слабоосновным анионообменом. Для этого процесса используется двухслойный ионообменник со слабоосновной смолой, в котором все катионы (менее нескольких тысячных частей) заменяются водородным ионом и удаляются все сильные кислоты. В воде остается растворенная двуокись углерода в количестве, эквивалентном исходному количеству карбонатов. Кремневая кислота не удаляется.

Водородный цикл катионообмена с последующим сильноосновным анионообменом. В этом случае при ионообмене удаляются двуокись углерода и кремневая кислота. Все катионы заменяются ионами водорода, а все анионы — гидроксильными группами. Иногда, по экономическим соображениям, до обработки воды сильноосновным анионитом проводят обработку слабоосновной ионообменной смолой и перед заключительным анионообменом механически удаляют из воды образовавшуюся двуокись углерода. Вода, обработанная этим методом, широко используется для питания котлов и других целей.

Водородный цикл катионообмена и сильноосновной анионообмен в смешанном слое. Ионообменник со смешанным слоем позволяет получать воду исключительно высокой чистоты для питания котлов высокого дав-

ления, ядерных реакторов и очень многих других процессов.

В промышленной практике часто применяются и другие схемы ионообменной обработки воды. Иногда, например, последовательная обработка катионитом, слабоосновным анионитом, азарция или механическое удаление газа и заключительная очистка в аппарате со смешанным слоем могут быть экономически более выгодны, чем обработка в одном смешанном слое. Выбор той или иной схемы определяется обычным сопоставлением капиталовложений и эксплуатационных расходов. Разработаны¹ графики, облегчающие сопоставление эксплуатационных расходов, при разных схемах ионообменной обработки воды.

ИОНООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Экономика. Вообще говоря, стоимость ионообменного удаления твердых веществ значительно больше стоимости осаждения химическими методами. Например, уменьшение жесткости воды при осаждении бикарбонатов известью требует меньшего расхода химикалиев, чем ионообмен. Для малых объемов, однако, ионообмен по стоимости оборудования и простоте обработки может оказаться более выгодным. Как правило, ионообменная очистка воды с общим содержанием растворенных твердых веществ более шести частей на десять тысяч (в пересчете на эквивалент CaCO₃) экономически нецелесообразна. Однако могут быть и исключения, в частности, когда потребность в воде мала, а другой вариант очистки оказывается дорогостоящим.

Количества химикалиев, необходимые для регенерации ионообменных смол, всегда превышают стехиометрические соотношения. Однако этот недостаток часто перекрывается простотой операции и легкой воспроизводимостью результатов, а также отсутствием фильтров или другого оборудования для отделения твердой фазы от жидкости. При экономическом сопоставлении ионообмена с осаждением химическими методами в случаях обработки воды или проведения других процессов химической технологии часто оказывается, что по капиталовложениям и затратам на рабочую силу предпочтительнее ионообмен, тогда как по издержкам на необходимые химикалии выгоднее химические методы. При сопоставлении ионообмена и дистилляции, если концентрация обмениваемых ионов отвечает условиям проведения ионообмена, по капиталовложениям обычно имеет преимущество ионообмен. Конечно, в каждом конкретном случае должно быть проведено полное технико-экономическое сопоставление, и приведенные данные следует рассматривать лишь как ориентировочные.

Применение аппаратов с неподвижным слоем смолы для очистки химических соединений. В химической промышленности ионообменники с неподвижным слоем смолы находят ограниченное применение. Более часто при обработке продуктов химических производств используются аппараты с движущимся слоем, так как в этих аппаратах возможно непрерывное проведение процесса. Тем не менее, обычное оборудование с фиксированным слоем смолы, весьма сходное с оборудованием, применяемым для обработки воды, во многих случаях оказывается весьма удобным. Очень подходят ионообменники с неподвижным слоем для

¹ Kahler, Reents, Chem. Eng., 64 (1), 206 (1957).

периодических процессов удаления нежелательных ионов из растворов. Как и при обработке воды, ионообмен наиболее целесообразно применять для удаления относительно малых количеств ионизированных твердых веществ из неполярной жидкости. Примерами могут служить процессы удаления солей из сырого глицерина или из растворов сахара. При очистке глицерина, содержащего около 1% растворенных солей, система катионо- и анионообменников, за которой следует ионообменник со смешанным слоем, позволяет получить для дальнейшего выпаривания до требуемой концентрации раствор химически чистого глицерина¹. В процессах очистки растворов сахара и глицерина обработка смолами, адсорбирующими красящие вещества, часто предшествует обработке ионообменными смолами. Сырой глицерин, полученный омылением и содержащий 30% глицерина и ~2% поваренной соли, для получения химически чистого продукта концентрацией 99,5% очищают комбинированным способом ионоэкслюзии² и ионообмена с последующим трехкорпусным выпариванием.

Кроме названных, имеется много других сходных случаев применения аппаратов с неподвижным слоем для очистки химических соединений. Ионообмен обычно используется для удаления солей при получении таких органических продуктов, как этанол, метанол, формальдегид, этиленгликоль³. Ионообмен обычно эффективен при очень малых концентрациях примесей, подлежащих удалению. Эта особенность резко отличает ионообмен от других основных процессов химической технологии, и часто поэтому ионообмен оказывается единственно возможным методом очистки. Например, ионообменные смолы применяют для улавливания следов золота из промывных вод в операциях покрытия золотом. Когда смола насыщается золотом, ее сжигают. Этот способ находит практическое применение, хотя концентрация золота в растворе столь мала, что оно не может быть выделено никаким другим способом.

Посредством ионообмена могут быть регенерированы ценные растворы, используемые в различных технологических процессах, загрязненные растворяющимися в них ионизированными твердыми веществами. Типичным примером такого процесса может служить удаление окислов металлов из растворов хромовой кислоты, употребляющихся при гальваническом хромировании и анодировании алюминия⁴.

Характеристика ионообменного оборудования непрерывного действия. Многие химические процессы, осуществляемые ионообменными методами в лаборатории, не могут быть с достаточно высокими экономическими показателями реализованы в заводских условиях при использовании ионообменников с неподвижным слоем, которые применяются для обработки воды или для простой очистки. К этим процессам, наиболее трудным для осуществления, относятся разделение, регенерационное концентрирование, очистка или обмен. Используя ионообмен, можно разделить два и более ионов

одинаковых знаков, пользуясь различием их относительного распределения между раствором и ионообменной смолой. Редкие земли в промышленности разделяют слоистой хроматографией в длинном ряду из ионообменных колонн с неподвижным слоем смолы. В этом случае метод оправдывается высокой стоимостью редкоземельных элементов.

Регенерационное концентрирование, очистка и обмен — примеры ионообменных процессов, при которых сначала данный ион из одного раствора сорбируется ионообменной смолой, а затем десорбируется в другой раствор. Если сорбируется ион целевого продукта, то это пример регенерации и концентрирования, если ион представляет собой нежелательную примесь, то это пример процесса очистки раствора. При обмене существо процесса заключается в превращении одной соли в другую, например, гидроксида кальция в гидроксид натрия. Когда концентрация ионов, которые должны быть превращены в другую форму (например, кальциевый и магниевый ионы, находящиеся в воде, в натриевый или водородный ионы), составляет несколько частей на десять тысяч, целесообразно проектирование аппаратов с неподвижным слоем смолы, продолжительность рабочего цикла или загрузочного периода которых будет много часов или даже несколько суток, а длительность регенерации не превысит 2 ч. С другой стороны, в более сложных сорбционно-десорбционных процессах, с относительно высокими концентрациями веществ и более сложной регенерацией или десорбцией, за несколькими минутами загрузочного периода может следовать многочасовая регенерация. В этом случае, чтобы обеспечить непрерывный процесс, потребовалась бы большая батарея аппаратов с огромным объемом смолы. Значительные капиталовложения в сочетании с высокими издержками производства часто делают такие процессы экономически нецелесообразными.

Было сделано много попыток спроектировать оборудование, которое лучше отвечало бы условиям проведения ионообмена в химических производствах. Удачные варианты решения этой задачи показывают, что можно существенно снизить и капиталовложения и издержки производства. В правильно спроектированных установках с автоматическим контролем и управлением можно производить разделение в таких случаях, когда оно неосуществимо никаким другим способом, причем расход химикатов на регенерацию, за счет более производительного использования емкости смолы, будет соответствовать стехиометрическим соотношениям.

Непрерывное проведение ионообменных процессов лежит в основе технологии на урановом заводе, перерабатывающем 13 кг урана в 1 сек. После выщелачивания руды уран в виде сульфатного комплекса находится в растворе, который может быть сконцентрирован и очищен при анионообмене. Однако в руде содержатся также глинистые шламы, которые в процессе выщелачивания образуют вязкую пульпу. Чтобы исключить операцию фильтрования, которая была бы необходима при обычном проведении процесса ионообмена, на упомянутом выше заводе используют крупнозернистую смолу, свободно засыпанную в решетчатые корзины из нержавеющей стали. Эти корзины-контейнеры периодически поднимаются и опускаются в ванне, через которую течет обрабатываемая пульпа. Такое перемещение по вертикали обеспечивает поддержание смолы во взвешенном состоянии и предохраняет ее от загрязнения шламом. Пульпа на сорбцию подается через 10 последовательно соединенных ванн (размерами 15×1,83×1,83 м), в каждой из которых помещается по

¹ Rahles, Reents, Stromquist, J. Am. Oil Chem. Soc., 29, 133 (1952).

² Эксклюзия (исключение) — процесс, протекающий при использовании ионообменных смол, которые не требуют химикалов для регенерации. Отделение растворенных веществ достигается потому, что такая смола «экслюдирует» («исключает») электролит из зерна смолы, но позволяет неэлектролиту проникать в глубь зерна.

³ Nachod, Schubert, Ion Exchange Technology, New York, 1956.

⁴ Gilbert, Morrison, Kahler, Proc. Am. Electroplaters Soc., 39, 31 (1952).

10 корзин (размерами 1,2×1,2×1,2 м), содержащих по 0,4 м³ ионообменной смолы. Десорбция урана в это же время проводится в других 4 последовательно соединенных ваннах. Корзины совершают пульсационное движение с частотой $\frac{1}{12}$ цикла в 1 сек при размахе 0,38 м. Эффект непрерывно-противоточного действия установки достигается за счет последовательного переключения ванн с сорбции на десорбцию в течение 14-часового цикла.

Несколько позднее был предложен аппарат с пульсирующим перемещением смолы (рис. II-40), нашедший в США и Японии применение на заводах, производящих уран, плутоний, а также нерадиоактивные

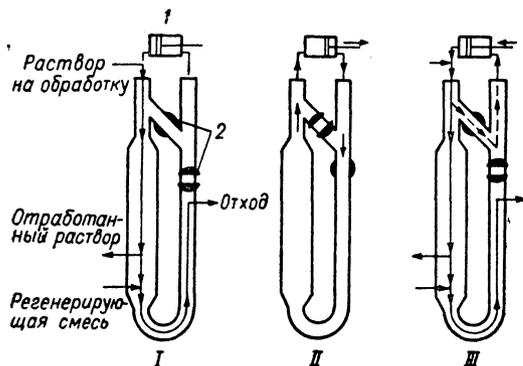


Рис. II-40. Стадии работы ионообменника с пульсирующим перемещением смолы:

I — период подачи раствора (несколько минут); насос, перемещающий смолу, остановлен или работает на обводную линию. II — период перемещения смолы (несколько секунд); подача раствора не производится. III — начало периода подачи раствора; насос, перемещающий смолу, меняет направление движения (или переключается на обводную линию); смола осаждается в аппарате.

1 — насос, перемещающий смолу; 2 — клапаны на линии движения смолы.

материалы. По принципу работы это скорее аппарат периодического, а не непрерывного действия, так как подача смолы и растворов чередуется, а не осуществляется одновременно, однако на производстве эта особенность не имеет значения. Растворы протекают через смолу, загруженную плотным слоем, который при работе аппарата не расширяется и обеспечивает дифференциально-противоточный контакт между двумя фазами. В аппаратах этого типа сочетаются высокой выход и малая высота, эквивалентная теоретической ступени, т. е. преимущества работы с неподвижным слоем с эксплуатационными преимуществами непрерывно-противоточного проведения процесса. Продолжительность периода подачи раствора обычно составляет несколько минут. Слой смолы периодически перемещается на небольшое (сравнительно с длиной слоя) расстояние в моменты прекращения подачи раствора (на несколько секунд) за счет гидравлического давления. Столб смолы скользит, как поршень в цилиндре, смазанный жидкостью, находящейся в слое, причем отдельные частицы смолы сохраняют свое положение друг относительно друга.

Два клапана на корпусе, представляющем собой замкнутую петлю, заполненную смолой, и источник, создающий перепад гидравлического давления, являются основными элементами аппаратного оформ-

ления пульсационного метода. На рис. II-41 они изображены проходными клапанами и гидравлическим поршнем, периодически меняющим направление своего движения¹. Клапаны действуют как обратные и пропускают смолу только в одном направлении. Насос, установленный дистанционно, перемещает по контуру аппарата смолу, и почти таким же способом группа обратных клапанов и диафрагма или поршневой насос нагнетают раствор. Дополнительные клапаны, установленные на пути движения смолы, служат для принудительного разобщения потоков раствора в различных секциях аппарата. Остановка подачи питания и выключение потоков в течение периода движения смолы предотвращают помехи движению смолы со стороны этих потоков. Шаровые или пробковые проходные клапаны применяют в аппаратах диаметром до 200 мм, а клапаны с поворотной заслонкой — в аппаратах диаметром до 900 мм. Диаметр клапана для прохода смолы может быть меньше диаметра аппарата, если это значительно дешевле. На больших аппаратах успешно используют клапаны диаметром меньше $\frac{1}{3}$ диаметра аппарата.

Для уменьшения сопротивления изменение диаметра канала, по которому движется смола, должно быть плавным (коническим). Гидравлическое давление, обеспечивающее движение смолы, может быть создано

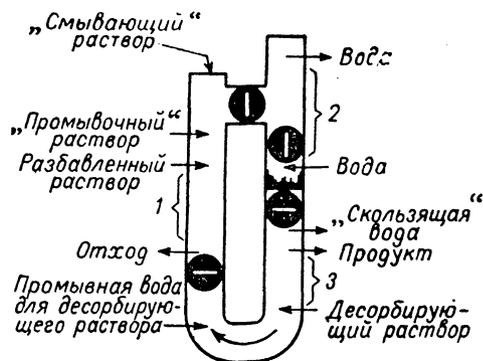


Рис. II-41. Принцип действия ионообменника Y-12 с пульсирующим перемещением смолы:

1 — сорбционная секция; 2 — разделительная секция; 3 — секция элюирования.

различными источниками, например, насосом, гидравлическим аккумулятором или просто напором воды из водопровода. Гидравлический аккумулятор может быть усилен насосом (меньшим, чем насос, применяемый непосредственно), напором воды из сети (меньшего сечения, чем в случае создания давления непосредственно водой из водопровода) или сжатым воздухом. Насос может работать на обрабатываемом растворе или на масле, передающем действие насоса раствору в аппарате. Устройство, приводящее в движение смолу, может быть простого или двойного действия, т. е. может либо только «толкать» смолу, либо и «толкать» и «тянуть» ее. В аппаратах небольших размеров применяют приводы, которые только «тянут» смолу, например создают вакуум на стороне потока, движущегося вниз, а затем соединяют это пространство с атмосферой.

¹ Setter, Googin, Marrow, US AEC, Rept. Y-1257, July 9, 1959.

В урановом восстановительном ионообменнике У-12 с пульсирующим перемещением смолы, схематически изображенном на рис. II-41, сорбционная секция при

содержащего уран, которые выщелачиваются серной кислотой, частично очищаются и подаются в ионообменник в виде суспензии, содержащей от 2 до 10

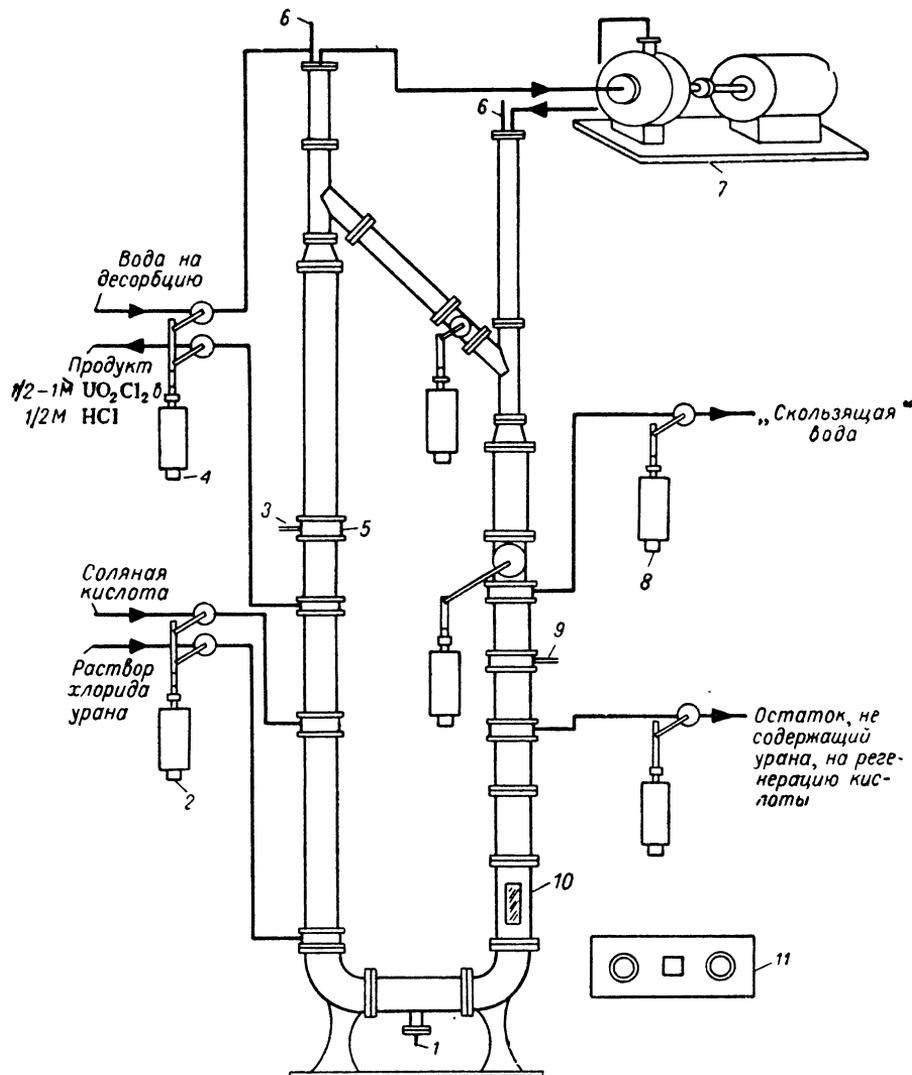


Рис. II-42. Схема ионообменника с пульсирующим перемещением смолы для концентрации и очистки урана:

1 — клапан выпуска смолы; 2 — клапаны с программным регулированием, управляющие подачей растворов; 3 — датчик кондуктометра для регулятора расхода продукта; 4 — клапаны с самостоятельным программным регулированием от соответствующего кондуктометра, управляющие подачей и выводом растворов; 5 — клапаны с программным регулированием, управляющие циркуляцией смолы; 6 — сливной клапан; 7 — насос, обеспечивающий перемещение смолы; 8 — клапаны с самостоятельным программным регулированием от соответствующего кондуктометра, управляющие выводом «скользящей» воды; 9 — датчик кондуктометра для регулятора расхода «скользящей» воды; 10 — смотровое стекло для наблюдения за перемещением смолы; 11 — программный регулятор процесса.

диаметре 0,6 м имеет длину 10 м. Полная высота аппарата около 18 м. Диаметр других секций аппарата составляет 0,3 м. На линии движения смолы установлено 4 клапана с поворотной заслонкой (номинальный диаметр 0,2 м). Установка обеспечивает удовлетворительную обработку нескольких тонн отходов шлака,

объемн. % твердой фазы (фторид магния, активированной окиси алюминия или углерода).

Хотя смола в течение периода прохождения раствора образует плотный слой, этот слой каждые 5 мин передвигается, и движение смолы предотвращает как фильтрацию твердых частиц через слой, так и заку-

порывание его. Разбавленный раствор сульфата («промывочное питание») служит для удаления слабо сорбирующихся положительно заряженных частиц загрязняющих примесей, стремящихся перемещаться вместе со смолой. Вода («смывающее питание») выталкивает обратно раствор сульфата и удаляет также большую часть твердых частиц. В разделительной секции встречным потоком воды смола очищается от мути, от твердых частиц, поступивших со смолой, а также от измельченных зерен смолы, поскольку иначе будет понижаться давление в сорбционной секции, которая должна работать при высоких скоростях течения раствора. В секции «элюирования» («вытеснения») уран десорбируется и выделяется в концентрированном и очищенном виде при обработке подкисленным десорбирующим раствором нитрата аммония. «Скользашую» воду, поступающую со смолой, выводят отдельно от получаемого раствора, чтобы избежать излишнего разбавления. Концентрацию определяют по удельной электропроводности на кондуктометре, установленном между двумя разгрузочными окнами.

Смола до возвращения в сорбционную секцию обрабатывается водой для удаления раствора нитрата аммония. Гидравлический аккумулятор, усиленный сжатым воздухом, перемещает смолу. Байонетные распределители, которые обеспечивают подачу и прекращение подачи раствора, представляют собой перфорированные трубки из нержавеющей стали (прикрытые сеткой из нержавеющей стали), которые введены в аппарат через отверстия с фланцем. Три таких распределителя установлены параллельно у каждого впускного или разгрузочного отверстия на секции диаметром 0,6 м и два установлены параллельно на секции диаметром 0,3 м.

На рис. П-42 показана схема японского уранового очистительного ионообменника с пульсирующим перемещением смолы (изготовлен Иллинойской компанией обработки воды). Это гуммированный аппарат диаметром 200 мм, высотой около 6 м. На линии перемещения смолы установлено 2 шаровых клапана (диаметром 150 и 200 мм). Смола перемещается центробежным насосом, работающим на легком масле. Концентрат урановой руды растворяют в соляной кислоте, концентрируют раствор перегонкой, ~5 М раствор подают в ионообменник. Уран сорбируется анионитовой смолой в виде уранил-хлоридного комплекса. Смола, содержащая адсорбированный уран, промывается 6—8 М HCl для удаления загрязнений, после чего обрабатывается водой для десорбции. Вода разрушает уранил-хлоридный комплекс, поскольку понижается концентрация соляной кислоты.

Аппараты с пульсирующим перемещением смолы применяют для проведения различных вариантов адсорбционных и ионообменных процессов.

Проектирование ионообменного оборудования непрерывного действия. Расчеты ионообменников непрерывного действия могут быть выполнены на основе общих

представлений о теоретической ступени, о единице переноса и о коэффициенте распределения или факторе разделения таким же образом, как и расчеты аппаратов для ректификации, жидкостной экстракции и других сходных процессов массопередачи. В ионообменных аппаратах высота, эквивалентная теоретической ступени, обычно измеряется миллиметрами и может составлять лишь несколько диаметров зерен смолы. Однако время пребывания на теоретической ступени — величина относительно более постоянная, чем высота, эквивалентная теоретической ступени. Поэтому в практическом приложении к непрерывному ионообмену для выработки приемлемых соотношений основных размеров аппарата высокая производительность на единицу поверхности важнее, нежели малая высота, эквивалентная теоретической ступени. При малых отношениях высоты к диаметру каналный и концевой эффекты могут оказывать большее влияние на высоту, эквивалентную теоретической ступени, чем скорость диффузии, поверхность раздела фаз, размеры частиц или скорость движения потока. Фактор разделения и коэффициент распределения при расчетах ионообменников находят из данных по равновесию между смолой и раствором, полученных в условиях периодического ведения процесса или из кривых изменения концентрации во времени при работе с неподвижным слоем смолы. Наименьшие значения высоты эквивалентной теоретической ступени или высоты единицы переноса могут быть найдены из опытов при периодическом ведении процесса или при неподвижном слое смолы, но должны быть проверены на промышленных непрерывнодействующих противоточных аппаратах для учета влияния канального эффекта и других возможных нарушений структуры потока.

Масштабное увеличение размеров ионообменников с пульсирующим слоем смолы было успешно выполнено при сохранении скорости течения потока постоянной (такой же, как в секции малого диаметра) путем увеличения высоты каждой секции аппарата на величину, равную увеличению диаметра. Масштабное увеличение высоты аппарата и скорости потока при постоянном диаметре аппарата обычно выполняется исходя из предположения о постоянстве времени пребывания на теоретической ступени.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Ионообменная технология, под ред. Ф. Находа и Дж. Шуберта, перев. с англ., Металлургия, 1959. — Сб. «Ионообменная технология, Изд. «Наука», 1965. — И. Н. Плаксии. С. А. Тэттару, Гидрометаллургия с применением ионитов, Изд. «Металлургия», 1964. — А. А. Герасименко. М. А. Абрамова, П. В. Головин, Ионообменные смолы в пищевой промышленности, Изд. АН УССР, 1962. — Г. Осборн, Синтетические ионообменники, перев. с англ., Изд. «Мир», 1964. — Д. И. Рябчиков, И. Н. Цитович, Ионообменные смолы и их применение, Изд. АН СССР, 1962. — Б. Н. Ласкорин, Н. М. Смирнова, М. Н. Гантман, Ионообменные мембраны и их применение, Госатомиздат, 1961.

СМЕШИВАНИЕ И ОБРАБОТКА ПАСТ¹

Первоначально пастой называли цемент или клей, но постепенно понятие, определяемое этим термином,

расширилось и теперь пастой называют также смеси твердых веществ и жидкостей, составленные в разных соотношениях, и высококонсистентные эмульсии двух или более жидкостей. Сцепляемость уже не является обязательным качеством паст, к числу которых в настоящее время относят кремы, смазки, пульпу, тесто, илы и т. п.

¹ Bullock, Chem. Eng. Progr., 47, 397 (1951). — Bullock, Ceram. Age., 68 (4), 18 (1956). — Bullock, Chem. Eng., 66 (8), 177 (1959). — Fischer, Chem. Eng., 67 (16), 107 (1960). — Uhl, Chem. Eng. Progr., Symp. Ser., 17, 51, 93 (1954). — Uhl, Voznick, Chem. Eng. Progr., 56, 72 (1960).

При обработке паст неизбежно приходится иметь дело с очень разнообразными материалами и весьма различным оборудованием. Здесь рассматриваются процессы, при проведении которых пастообразное состояние достигается в любое время обработки материала. Пастообразное состояние либо может сохраняться в течение всей операции, либо материал в этом состоянии может быть только на какой-то стадии процесса. Ниже приводится классификация материалов, описываются основные процессы и оборудование, которое используется для обработки паст.

Пасты весьма широко различаются по физическим свойствам и структуре. При обработке паст может оказаться необходимым иметь дело с материалами различного физического состояния и разной пластичности. Процесс переработки сам по себе может зависеть от факторов, не связанных непосредственно со смешиванием. Кроме того, необходимо отметить, что сложившиеся на практике традиции различных отраслей промышленности мешают сколько-нибудь строгому определению свойств, присущих пастообразному состоянию, например, вязкости или других характеристик материала.

Обработка паст заключается в смешивании отдельных частиц или их агрегатов, получении дисперсий газа, жидкости или твердых частиц в жидкости, составляющей сплошную фазу, и растворении какого-либо материала в другом. В этой главе преимущественно рассматривается обработка систем, образованных одной жидкой и одной твердой фазами, хотя при этом нельзя не касаться систем, содержащих другие фазы.

В простых случаях обработка паст состоит в смешивании; в более сложных случаях при обработке паст в хорошо регулируемых условиях проводятся эндо- или экзотермические реакции. Может оказаться необходимым смачивание или высушивание твердого вещества в очень ограниченных пределах. Часто требуемое физическое состояние конечного продукта имеет первостепенное значение и оборудование проектируется или выбирается не только для смешивания, но также для проведения процессов гранулирования, чешуирования, получения порошков или мазей определенной плотности. Когда целью операции является доведение смесей определенных химических реагентов до заданного физического состояния особенно необходим тщательный выбор оборудования и строгий контроль условий обработки.

ПРОСТОЕ СМЕШИВАНИЕ

Процесс простого смешивания иллюстрируется схемой¹, представленной на рис. II-43. На этой схеме черные и белые кружки представляют первичные частицы различных ингредиентов. Группы одинаковых кружков изображают агрегаты, состоящие из частиц того или другого вещества.

Если продукт должен представлять собой густую пасту, структура ее и состав должны быть однородны. Если продуктом является жидкая паста, то входящие в ее состав твердые частицы могут оседать либо соединяться в агрегаты при транспортировке или хранении.

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ

Получение дисперсий предусматривает более тщательную обработку, чем простое смешивание или пере-

мешивание, поскольку в результате должна быть получена система, однородная по составу и структуре. При получении дисперсий обычно оказывается необходимым разрушать агрегаты, состоящие из частиц дисперсной фазы, до первичных частиц. Система, которая образуется в результате такой обработки, представлена на рис. II-43, *d*. Диспергирование требует значительных затрат энергии, а также оборудования с малыми зазорами, в котором возможно некоторое перетирание материала. Необходимая однородность паст не может быть, однако, достигнута только за счет физической

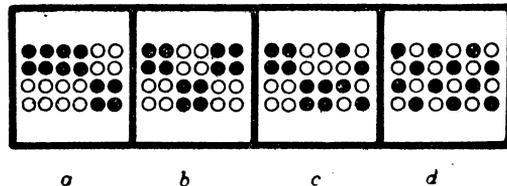


Рис. II-43. Распределение агрегатов при смешивании:

a — беспорядочная смесь агрегатов; *b* — однородная смесь агрегатов; *c* — смесь агрегатов и первичных частиц такого же общего состава, как и смесь *b*; *d* — совершенно однородная смесь первичных частиц.

работы. Образования агрегатов и их выделения можно избежать только при выполнении одного или нескольких следующих условий:

1. Плотности обеих фаз не должны существенно различаться.
2. Частицы дисперсной фазы должны оставаться раздельными посредством защитного коллоида.
3. Частицы должны быть так малы, чтобы могло происходить броуновское движение.
4. Сплошная фаза должна быть высоковязкой или должна сильно сгущаться для того, чтобы препятствовать осаждению частиц под действием силы тяжести.

Применение диспергирования. Диспергирование может требоваться для получения однородных суспензий промышленных продуктов, сохраняющих свои свойства в течение времени хранения их или транспортировки; для разрушения агрегатов частиц с целью получения гладкого покрытия, как это необходимо при производстве красок; для перетирания частиц в условиях, препятствующих образованию агрегатов, или для получения полного цвета дорогостоящих пигментов. Имеет большое значение применение защитных коллоидов, предотвращающих образование агрегатов тонкоизмельченных частиц. Например, незашитенная свежесдиспергированная коллоидная сера может образовывать агрегаты, больше исходных (до диспергирования), а некоторые пигменты, полученные из металлов, как показывают наблюдения, в отсутствие защитного коллоида могут образовывать тонкие металлические пластинки.

Техника диспергирования. Весьма важен выбор диспергирующих агентов и защитных коллоидов. Диспергирующий агент должен быть в состоянии разделить агрегаты на составляющие его частицы, а защитный коллоид должен отделить от окружающих заряженные частицы для того, чтобы воспрепятствовать образованию агрегатов. Если диспергирующий агент растворим в жидкой фазе, то раствор должен смачивать частицы диспергируемого материала, чтобы обеспечить легкое и равномерное проникновение раствора в глубь

¹ Bullock, Chem. Eng. Progr., 51, 243 (1955).

агрегатов. Если диспергирующий агент представляет собой тонкоизмельченное твердое вещество, то оно должно быть равномерно смешано со всем количеством диспергируемого материала — так, чтобы образовать многочисленные сложные каналы, по которым в массу материала могла бы проникать жидкая фаза. Простым примером, разъясняющим действие твердых диспергирующих агентов, является размешивание какао-порошка с сахаром. Сухой порошок какао очень плохо смачивается как водой, так и молоком, но если какао сначала смешать с сахаром, то жидкость очень быстро проникает в массу порошка. Примерами сухих смесей этого типа являются также пищевые концентраты.

Ограничения. Существенное влияние на процесс диспергирования оказывает pH среды и концентрация других ионов в водной фазе особенно при получении эмульсий типа вода в масле. Необходимо принимать во внимание и устранять внешние электрические воздействия, так как получение устойчивых дисперсий и эмульсий возможно только в отсутствие электрического поля. Обстоятельство, кажущееся незначительным, может вызвать нарушение электрического равновесия. Так, например, небольшой острый выступ на краю статора коллоидной мельницы может иметь электрический потенциал, достаточно высокий, чтобы разрушить свежеприготовленную эмульсию, выгружаемую из мельницы. Такие выступающие части на деталях аппаратов должны быть удалены, а поверхность отшлифована как весь окружающий металл.

Влияние температуры. Водные эмульсии и дисперсии, разумеется, необходимо предохранять от чрезмерно низких или высоких температур. При образовании кристаллов льда концентрируется чистая вода и дисперсия разрушается. Последующее таяние кристаллов льда не приводит к восстановлению первоначальной структуры дисперсии. Также и высокие температуры, близкие к точке кипения, обычно разрушают структуру, а кипение приводит к разрушению дисперсии.

ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ

Принципы работы оборудования. Обработка паст — это прежде всего перемешивание или смешивание. Существует около сорока типов смесителей, которые, в общем, могут удовлетворить потребности, возникающие при этом процессе. Однако в аппарате любого типа для получения вполне однородной пасты должны обеспечиваться определенные основные действия, которые влияют на выбор скорости движения, форму и величину рабочих элементов, воздействующих на обрабатываемый материал. Особенности течения паст делают непригодными высокоскоростные мешалки, которые в этих случаях обычно неэффективны, так как обладают свойством образовывать полость в обрабатываемой массе, не вызывая никакой циркуляции. Удар и напряжение сдвига должны создаваться в непосредственной близости к лопастям мешалки, а не на расстоянии от нее. Эти условия обеспечиваются в месителях с гребенчатыми мешалками, лопасти которых входят в зазор между неподвижными пальцами, или в месителях, имеющих небольшой зазор между лопастями и корпусом. Некоторые пасты так сильно прилипают к рабочим поверхностям, что при обработке их необходимы весьма малые скорости сдвига. При столь малых скоростях требуется значительное время для того, чтобы материал мог достичь зоны активной обработки. Сдвиг с малой скоростью в сочетании с

размазыванием или перетиранием обычно приводит к получению хороших паст. Многократное наслаивание, растягивание и сжатие также способствуют получению тонкой и однородной смеси. Совокупное воздействие на обрабатываемый материал перечисленными способами осуществляется в глиномялках, краскотерках и резиномесителях.

Условия эксплуатации. Чтобы оборудование для обработки паст периодического действия полностью соответствовало назначению и было эффективным, должны выполняться следующие четыре основных условия:

1. Баки аппарата должны удовлетворительно вмещать все ингредиенты смеси.

2. Обрабатываемый материал должен постепенно перемещаться в рабочую зону аппарата при движении сосуда, лопастей или рабочих поверхностей.

3. Рабочие элементы аппарата должны действовать на материалы таким образом и столь интенсивно, чтобы обеспечить заданную степень дисперсности.

4. Готовый продукт в конце работы должен выгружаться из бака быстро и полностью.

В месителях непрерывного действия, если часть материала не возвращается постоянно на рециркуляцию, продукт требуемого качества должен быть получен за один проход массы через рабочую зону. Для этого питатель или иные загрузочные устройства должны обеспечить непрерывную, равномерную подачу однородной исходной массы в рабочую зону месителя. Кроме того, чтобы обеспечить непрерывное получение однородного продукта, необходимо смешивать достаточно большой объем материала, прошедшего рабочую зону (усреднять продукт). Высказанные соображения имеют особое значение для экструдеров, в которых сечение рабочей зоны чрезвычайно мало, а материал движется только в одном направлении (от загрузочной воронки до сопла). Успешная работа таких аппаратов возможна лишь при исключительно высокой однородности смеси ингредиентов, подаваемых в питатель.

СТАНДАРТНЫЕ ТИПЫ ОБОРУДОВАНИЯ

Месители со сменным баком. Месители со сменным баком представляют собой аппараты периодического действия, в которых вертикальный сосуд является самостоятельным элементом конструкции. Баки легко устанавливаются на станине аппарата и столь же легко снимаются. Изготавливаются месители этого типа с баками емкостью от 4 до 600 дм³. Наиболее общий тип таких аппаратов — это малогабаритный меситель, показанный на рис. II-44. Наличие сменных баков позволяет точно измерять или взвешивать отдельные партии материалов до того, как они поступают собственно в меситель. Смесительный чан можно использовать также для транспортировки готовой партии на следующую операцию или для хранения. Обеспечивается тождественность каждой партии и легко выполняется контрольное взвешивание.

Сменные баки сравнительно дешевы. Разумный запас баков позволяет производить очистку их в отдельном помещении, приспособленном для наиболее эффективного выполнения этой операции. При производстве красок и чернил, когда смешивание предшествует размалыванию или перетиранию и когда продолжительное время работают с одним и тем же составом массы или цветом, баки могут служить длительное время без очистки, если только масса не высыхает или поверхность бака не окисляется.

В большинстве конструкций месителей со сменными баками месильные устройства вынимаются из бака либо вертикальным подъемником, как это показано на

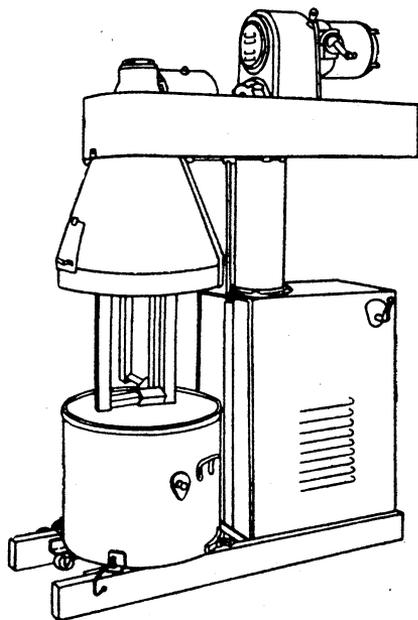


Рис. II-44. Меситель со сменным баком.

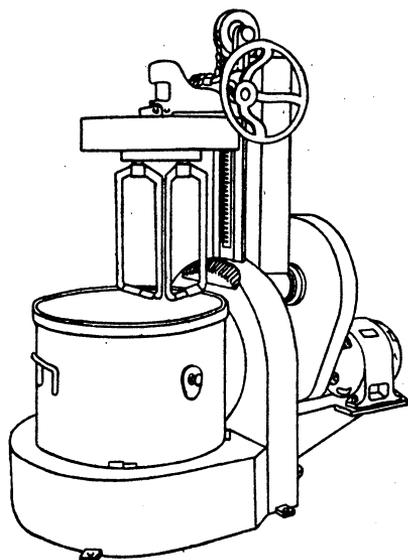


Рис. II-45. Меситель со сменным баком и планетарным движением мешалки.

рис. II-44, либо посредством поворотной головки. В некоторых месителях этого типа бак опускается вниз от месильных устройств. После того как месильные устройства вынуты из сосуда, дают стечь продукту в бак и, если нужно, очищают лопасти. При снятом баке

полная очистка лопастей и их опор не представляет затруднений. Если необходимо, в бак наливают соответствующий растворитель и очищают лопасти, вращая их в растворителе.

Тщательное смешивание в месителях со сменными баками осуществляется двумя путями. В месителях од-

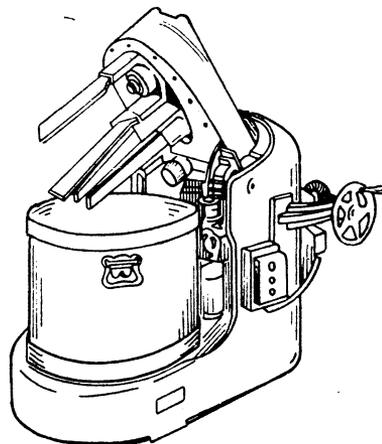


Рис. II-46. Меситель со сменным баком на вращающемся столе.

ного типа, например, показанного на рис. II-45, лопасти совершают наряду с вращательным и планетарное движение: вращающиеся лопасти описывают в баке полную окружность. В аппаратах иного конструктивного

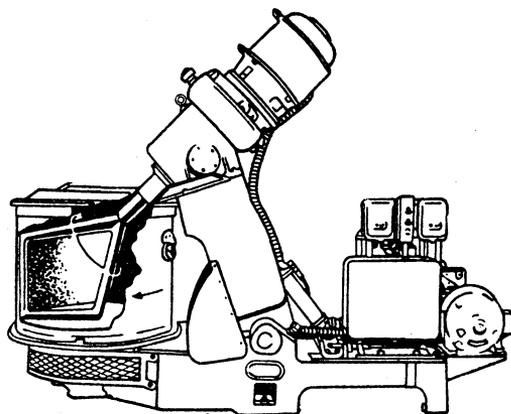


Рис. II-47. Меситель со сменным баком и ромбовидной мешалкой на наклонном валу.

типа, как изображено на рис. II-46, бак устанавливается на вращающемся столе так, что при работе все участки стенки бака последовательно проходят мимо лопастей с минимальным зазором. В месителе, представленном на рис. II-47, применяется мешалка ромбовидной формы, вал которой расположен наклонно. В этом аппарате вращается бак, устанавливаемый на вращающемся столе, и мешалка, кромки лопастей которой при каждом обороте очищают дно и стенку бака.

В месителях используются вращающиеся рабочие органы многих конструктивных форм — от простых горизонтальных лопастей до сложных гребенчатых мешалок. Вращение стола и планетарное движение рабочих органов месителя обеспечивают перемещение материала к центру и от центра бака, но в основном движение происходит в горизонтальной плоскости. Поэтому рабочие части месителей профилируют и устанавливают наклонно, чтобы вызвать также движение в вертикальном направлении. При использовании сбивалок и бил, например в хлебопечении, вертикальное перемещение не является необходимым, так как в этом случае циркуляция зависит от образования полостей вокруг вращающихся валов и поворотов массы в обратном направлении у стенки бака.

Во время смешивания в месителях со сменными баками гидродинамические характеристики среды обычно изменяются. Вязкие растворители часто нагреваются,

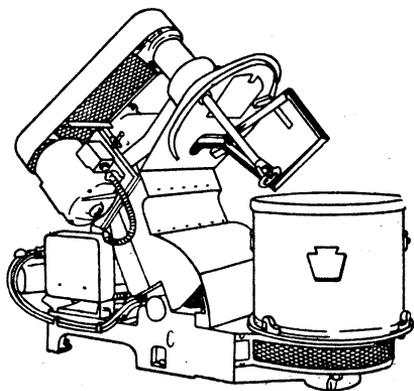


Рис. П-48. Меситель двойного действия со сменным баком.

вследствие чего их вязкость снижается. Подвижные растворители смачивают мелкие твердые частицы и образуют малоподвижную пасту. При изготовлении некоторых красок и чернил в начале цикла может происходить чрезмерное распыливание или разбрызгивание. Чтобы в этих условиях уменьшить продолжительность цикла, применяют двухскоростные электродвигатели и в начале операции смешивание проводят при малой скорости вращения, за счет чего добиваются уменьшения распыливания и разбрызгивания. Когда изменение скорости неосуществимо, часто можно избежать отмеченных затруднений при соблюдении необходимого порядка загрузки ингредиентов смеси.

Месители со сменными баками малых размеров обычно приводятся в действие одним электродвигателем. Однако с увеличением размеров месителей скорость вращения поворотного стола должна уменьшаться в большей мере, чем скорость вращения мешалок, и становится более экономичным применение двух двигателей. Наличие двух двигателей позволяет в широких пределах изменять условия проведения процесса, например, при грубом, предварительном перемешивании может вращаться только бак, а мешалки будут неподвижными или, наоборот, могут работать мешалки в неподвижном баке, чтобы смешать различные слои материала в отсутствие центробежной силы, возникающей при вращении чана.

Меситель двойного действия, показанный на рис. П-48, снабжен тремя электродвигателями. Эта машина

представляет собой сочетание высокоскоростного диспергирующего устройства с обычными ромбовидной мешалкой и вращающимся столом. Рассматриваемый агрегат хорошо иллюстрирует соотношение мощностей, потребляемых различными элементами месителя. Так, в месителе с баком емкостью 230 дм^3 для производства густых типографских красок вращающийся стол приводится в действие электродвигателем мощностью $1,5 \text{ кВт}$, мешалка вращается двухскоростным электродвигателем мощностью $5,6 \text{ кВт}$, а высокоскоростной диспергатор диаметром 150 мм снабжен электродвигателем мощностью $11\text{—}15 \text{ кВт}$.

Сменные баки могут быть изготовлены из различных материалов с тем, чтобы избежать коррозии или загрязнения продукта. Баки неизбежно подвергаются грубому обращению и должны быть сделаны толстостенными с хорошим креплением основания и закранины. Эффективность смешивания зависит от сохранения баками строго цилиндрической формы, необходимой, чтобы обеспечить одинаковый зазор между стенкой бака и рабочими частями месителя. Дно должно быть рассчитано так, чтобы бак можно было легко устанавливать точно по центру на основании машины или на вращающемся столе. Должны быть предусмотрены скобы (предпочтительно три) для крепления бака. Ручки для подъема бака, скобы или цапфы должны быть закреплены значительно выше центра тяжести загруженного бака. Площадь крепления ручек (скоб, цапф) должна быть достаточно большой, чтобы распределить нагрузку и избежать прогибов стенок котла. Если для подъема загруженного бака применяется цепь, то надо следить за тем, чтобы петля, идущая от жесткой горизонтальной крестовины под цапфы или скобы бака, шла вертикально вниз. Крестовина должна иметь размер, больший диаметра бака, а цепи или тросы, идущие к крану или другому подъемному механизму, должны быть натянуты от концов крестовины к крюку. Такой способ подъема предохраняет бак от сдвливания цепями, идущими непосредственно от скоб к крюку подъемника.

Большинство чанов разгружается при опрокидывании, но иногда они снабжаются вентилями или клапанами так, что оказывается возможным в широких пределах регулировать количество продукта, подаваемого на следующую операцию. При использовании вентиляей или клапанов необходимы меры по предохранению их от порчи или случайного открывания.

Месители со стационарными сосудами. Месители со стационарными сосудами рекомендуются в случаях, когда сменные баки для транспортировки или хранения продуктов применять невыгодно, когда объем партии более $0,6 \text{ м}^3$ и когда исходные материалы и готовый продукт удобно подавать по постоянному трубопроводу или желобу. В месителях со стационарными сосудами должны осуществляться такие же виды воздействий на обрабатываемый материал, как и в месителях со сменными баками. Материал должен постепенно перемещаться в рабочую зону, где он подвергается интенсивной обработке в узком зазоре. Поскольку сосуд и опоры, несущие рабочие органы месителя, являются частью одного и того же устройства, в месителях этого типа могут быть обеспечены очень узкие зазоры, позволяющие получать интенсивный сдвиг.

В стационарных сосудах, вообще говоря, используются мешалки всех типов, которые применяются для перемешивания подвижных сред, как это описано в разделе «Перемешивание подвижных сред». Однако в оборудовании, предназначенном для обработки паст,

находят применение только приведенные ниже типы месителей.

Месители с рамной мешалкой. Одной из наиболее старых конструкций месителей со стационарным сосудом является аппарат с рамной мешалкой показанной на рис. II-11. Рамная мешалка представляет собой плоское вращающееся устройство из горизонтальных и вертикальных полос, которые разрезают пасту на разных уровнях и у стенки сосуда. Для создания областей интенсивного сдвига на стенках сосуда часто укрепляют неподвижные полосы. Мешалка работает с малой скоростью вращения, чтобы исключить возможность вращения содержимого сосуда, как сплошной

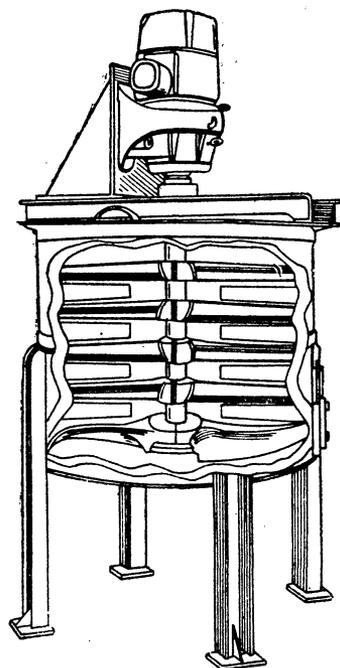


Рис. II-49. Меситель с многорядной лопастной мешалкой и контролостями.

массы. Медленное смешивание материала достигается за счет умеренного действия центробежной силы, возникающей при вращении мешалки. Движение смешиваемой массы может ускоряться при использовании наклонных лопаток. В месителях с рамной мешалкой успешно обрабатываются краски, крахмальные клейстеры, шпатлевки и клеи.

Месители, снабженные многорядной мешалкой с контролостями. Меситель, снабженный многорядной мешалкой с контролостями, является видоизменением месителя с рамной мешалкой. Как изображено на рис. II-49, в месителях этого типа лопасти мешалки, вращающиеся в горизонтальной плоскости, проходят между неподвижными горизонтальными контролостями. Мешалка такой конструкции обладает значительной поверхностью, вдоль которой происходит сдвиг, и вызывает более многочисленные вихревые потоки. Вращающиеся лопасти иногда устанавливают не в одной плоскости, а располагают уступом, поворачивая вокруг

вала и смещая друг относительно друга на одинаковый угол с тем, чтобы обеспечить более равномерное распределение энергии и улучшить смешивание. Концам лопастей придают такую форму, чтобы они перемещали материал к центру сосуда.

Такой же результат смешивания достигается при использовании гребенчатых мешалок, вертикальные лопасти которых проходят в зазорах между неподвижными вертикальными пальцами.

Месители с рамно-якорной мешалкой. К числу давно известных конструкций месителей со стационарным сосудом относится аппарат с рамно-якорной мешалкой¹ такого типа, как представленный на рис. II-12.

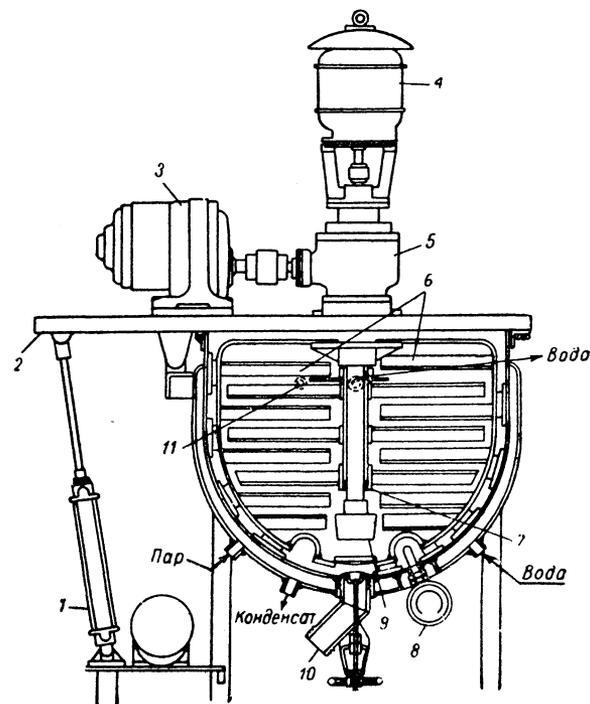


Рис. II-50. Схема месителя с мешалками, вращающимися в противоположных направлениях:

1 — гидравлический подъемник; 2 — несущий мост или швеллер; 3 — электродвигатель для турбины; 5 — коробка передач; 6 — лопасти; 7 — вал; 8 — термометр; 9 — гомотенизирующая головка; 10 — разгрузочный вентиль; 11 — предохранительный клапан.

В месителях с рамно-якорной мешалкой материал не накапливается в углах у дна сосуда, исключаются также спекание и порча от перегрева. Вся теплообменная поверхность, находящаяся в контакте с обрабатываемым материалом, равномерно очищается мешалкой, что способствует увеличению коэффициента теплоотдачи. Чтобы повысить скорость теплопередачи и напряжения сдвига, якорную мешалку видоизменяют, как показано на рис. II-50. Два ряда горизонтальных лопастей устанавливают на соосных валах, вращающихся в противоположных направлениях так, что лопасти, по-

¹ Автор называет мешалки этого типа подковообразными и якорными, что не согласуется с терминологией, принятой в Советском Союзе. — *Прим. ред.*

саженные на один вал, проходят в зазоры между лопастями, закрепленными на другом валу. Относительная скорость сдвига при этом будет определяться суммой обеих скоростей вращения, а действие центробежной силы окажется весьма малым. Наружная полоса, изогнутая по форме сосуда, может быть снабжена скребками для очистки стенки сосуда и улучшения теплопередачи. В аппаратах такого типа успешно обрабатывают клеи, консистентные смазки, косметические препараты и пасты, которые в течение процесса смешивания требуют быстрого нагрева или охлаждения.

Месители с конической мешалкой. Некоторые псевдопластичные или тиксотропные среды нельзя обрабатывать обычными лопастями, так как даже медленно движущиеся лопасти лишь образуют полость в объеме материала. Чтобы вызвать достаточное напряжение сдвига и перемещение массы, надо удерживать материал в непосредственной близости от рабочих поверхностей, вызывающих сдвиг и транспортирующих массу. Необходимые условия достигаются при использовании вращающегося конуса, представленного на рис. II-51. Полые усеченные конусы внутри несут узкие лопатки, идущие

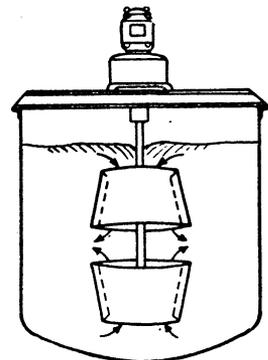


Рис. II-51. Схема аппарата с коническими мешалками.

вдоль образующей конуса, а иногда выступающие за плоскости оснований конуса, если нужно энергичное смешивание. Эти внутренние лопатки, во-первых, обеспечивают вращение смешиваемого материала, заполняющего конус, вместе с конусом, а во-вторых, создают сдвигающие усилия. Центробежная сила прижимает материал к внутренней поверхности конуса и перемещает материал вдоль этой поверхности от меньшего сечения конуса к большему. Сдвигающее усилие возникает вдоль внутренней кромки лопаток и на их концах, где материал входит и выходит из конуса. Два конуса можно устанавливать большими сечениями друг к другу, чтобы создавать общее движение материала от поверхности и от дна сосуда к середине или, наоборот, меньшими сечениями друг к другу, чтобы перемещать материал из средних слоев к поверхности и ко дну аппарата.

Месители с червячной мешалкой в направляющей трубе. Месители этого типа были разработаны для смешивания мыла. Рабочим элементом месителя является червяк, установленный в направляющей трубе. Малый зазор между червяком и внутренней поверхностью трубы, а также высокая скорость вращения червяка обеспечивают быстрое движение материала и значительные сдвигающие напряжения. Червяк поднимает материал по трубе, а под действием силы тяжести материал опускается на дно сосуда. Если углы в сосуде хорошо закруглены; то такой меситель может применяться для смешивания волокнистых материалов. В больших месителях этого типа равномерно отбеливается концентрированная бумажная масса, содержащая от 16 до 18% твердой фазы.

Месильные машины. Когда тестообразный материал месят вручную, тесто вытягивают, переворачивают и продавливают, чтобы отдельные слои соединились между собой, до тех пор пока не будет достигнута тре-

буемая однородность. Механическое устройство, в котором наиболее близко воспроизводится этот процесс, называется месильной машиной. Состоит эта машина (рис. II-52) из двух особой формы лопастей с параллельными осями вращения, установленных в корыте. Дно корыта изогнуто таким образом, что между лопастями вдоль корыта образуется гребень.

Существующие конструкции месильных машин деляют на два основных типа — нормальные и усиленные. В нормально нагруженных месильных машинах высота слоя загрузки не ограничивается, в корыте имеется значительное пространство над лопастями; смешивание происходит между роторами, а также между роторами и стенкой корыта. Эти месильные машины бывают легкого, среднего и тяжелого типа, мощность,

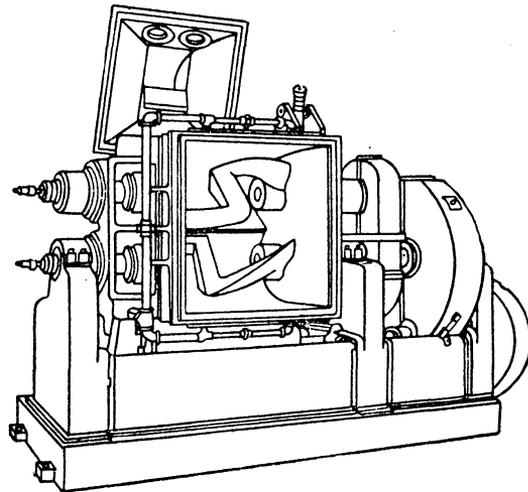


Рис. II-52. Месильная машина средней мощности.

потребляемая на единицу объема, изменяется в пределах от 30 до 400 квт/м^3 . Лопасти месильной машины при вращении описывают цилиндры, плотно прилегающие ко дну камеры смешивания по всей его площади. Гладкие вертикальные стенки дают возможность материалу немного подниматься над лопастями, и рабочий уровень держится так низко, что материал не касается куполообразной крышки корыта. Для смешивания различных материалов лопасти делают разных форм (рис. II-53), но все конструкции роторов таковы, что при их вращении материал поступает в рабочую зону. Относительное положение лопастей и соответствующее взаимное перекрывание дают возможность избежать налипания смешиваемого материала на лопасти. Разгрузка машины может осуществляться при опрокидывании корыта либо через люк, расположенный сбоку, либо через люк или несколько люков на дне корыта. Зазоры в месильных машинах относительно велики и для обработки материалов чрезвычайно вязких они непригодны.

Усиленные конструкции месильных машин, как, например, показанная на рис. II-54, предназначены для особо тяжелых условий эксплуатации — смешивания пластмасс, резины и т. п. В машинах этого типа объем загруженного материала ограничен крышкой, по очертаниям соответствующей цилиндру, описываемому лопастями. Затвор опускается вниз на загруженный

материал механическим или гидравлическим способом. В обычных случаях смешивания давление на материал составляет от 0,1 до 0,14 Мн/м^2 , при регенерации каучука давление достигает 1,0 Мн/м^2 . Зазор между роторами и стенками крайне мал, и именно здесь происходит смешивание. Согласно Камзу¹, смешивание в месильных машинах усиленной конструкции происходит между роторами и стенками камеры, но не между самими роторами. Поскольку между роторами не совершается никакой работы, коэффициент трения меж-

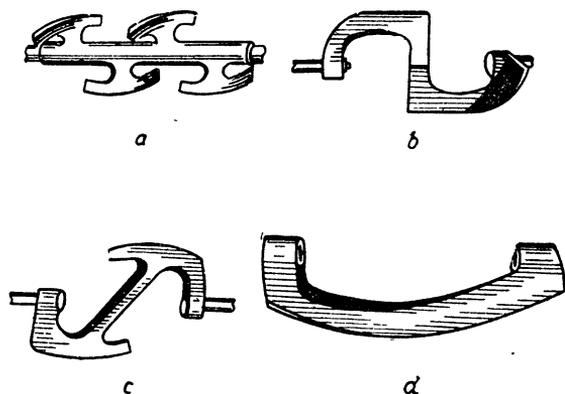


Рис. II-53. Лопасты роторов месильных машин: а — тип «рыбий хвост»; б — тип Z; с — тип L; д — спиральная лопасть.

ду ними не имеет значения. Вращение роторов машины с различными скоростями дает возможность одному ротору счищать сырой материал с тыльной стороны другого ротора и выводить ингредиенты смеси из этого пространства.

Весьма высокие затраты энергии у месильных машин, работающих со скоростью вращения менее 1 об/сек , требуют установки валов больших диаметров. Сочетание тяжелых валов, особо прочных лопастей, минимальных зазоров и ограниченных объемов загрузок делает возможным использование месильных машин усиленных конструкций только для обработки малых количеств материала. Производительность машин увеличивается при использовании мощных приводов и повышении скорости вращения роторов до предела, определяемого способностью материала сохранять требуемые свойства в условиях такой обработки. В ограниченном объеме совершается большая работа сил трения, и при обработке термолабильных материалов охлаждение является серьезной проблемой. Например, в месильной машине с рабочим объемом 0,25 м^3 при 0,33 об/сек и мощности привода около 185 квт продолжительность обработки партии материала составляет 10 мин . Такая же машина при 0,67 об/сек нуждается в приводе мощностью примерно 370 квт , но обеспечивает обработку партии материала за 5 мин .

В табл. II-4 приводятся некоторые технические характеристики месильных машин.

Смесительные бегуны. Смесительные бегуны представляют собой неподвижную или вращающуюся плоскостонную круглую чашу, внутри которой установлены катки (собственно бегуны) и два или более гребка (плужка). Первоначально бегуны предназначались для

грубого дробления, которое осуществлялось широкими катками, вращающимися в неподвижной чаше вокруг центральной стойки. В настоящее время смесительные бегуны применяются в литейном производстве для смешивания малых количеств увлажняющих и вяжущих веществ с частицами песка как для шпательной, так и для формовочной земли. При обработке паст смеси-

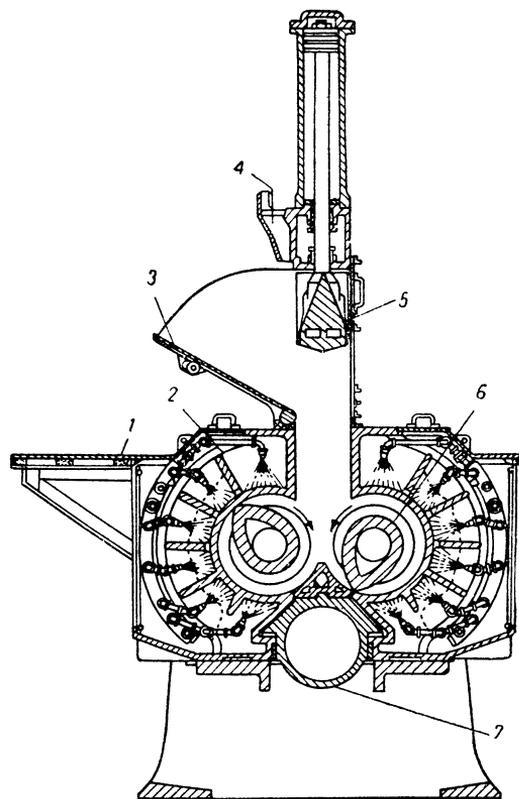


Рис. II-54. Схема месильной машины тяжелого типа:

1 — платформа для аппаратчика, 2 — форсунки, 3 — откидная крышка загрузочного бункера (с ручным управлением или механическим приводом); 4 — патрубок для присоединения вытяжного вентилятора; 5 — плунжерный затвор; 6 — полый ротор (с водяным охлаждением или паровым обогревом), 7 — скользящий разгрузочный затвор (с механическим приводом).

тельные бегуны употребляются, главным образом, для смешивания шпатлевок, глины, аккумуляторных паст, обмазок сварочных прутков, шоколадных обмазок и т. п.

В смесительных бегунах вращение чаши или гребков постепенно перемещает материал под катки, где происходит интенсивное смешивание. Поскольку в смесительных бегунах имеет место относительное движение гребков, катящихся бегунов и чаши, в результате которого происходит смешивание, то точная схема движения этих частей машины определяется, главным образом, вкусом изготовителя. На рис. II-55 показана типовая схема смесительных бегунов, в которых катки и гребки вращаются в неподвижной чаше

¹ Com es, India Rubber World, May, p. 178 (1950).

Характеристики месильных машин¹

Номер станины	Показатели	Особо нагруженные				Очень сильно нагруженные (роторы с тангенциальными лопастями)		Сильно нагруженные (роторы с взаимноперекрывающимися лопастями)		Нормально нагруженные (роторы с взаимноперекрывающимися лопастями)		
		3 800	6 000	7 600	9 500	11 000	13 500	8 500	9 700	12 000	12 000	12 000
500	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	3 800	6 000	7 600	9 500	11 000	13 500	8 500	9 700	12 000	12 000	12 000
	Размеры корыта, <i>дм</i>	25,40×20,32	25,40×20,32	25,40×25,40	25,40×31,75	28,70×25,40	28,70×31,75	28,70×31,75	26,16×25,40	26,16×31,75	26,16×31,75	26,16×31,75
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	750	190	190	150	150	150	150	75	75	75	75
400	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	1 900	3 000	3 800	4 750	5 500	6 800	8 500	9 700	12 000	12 000	12 000
	Размеры корыта, <i>дм</i>	20,32×16,26	20,32×16,26	20,32×20,32	20,32×25,40	22,86×20,32	22,86×25,40	22,86×31,75	26,16×25,40	26,16×31,75	26,16×31,75	26,16×31,75
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	600	150	150	110	110	110	95	75	75	75	75
320	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	950	1 500	1 900	2 400	2 750	3 400	4 250	4 850	6 000	6 000	7 600
	Размеры корыта, <i>дм</i>	16,26×12,95	16,26×12,95	16,26×16,26	16,26×20,32	18,29×16,26	18,29×20,32	18,29×25,40	20,83×20,32	20,83×25,40	20,83×25,40	20,83×31,75
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	450	110	110	95	95	95	75	55	55	55	45
253	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	475	760	950	1 200	1 350	1 700	2 150	2 400	3 000	3 000	3 800
	Размеры корыта, <i>дм</i>	12,95×10,41	12,95×10,41	12,95×12,95	12,95×16,26	14,48×12,95	14,48×16,26	14,48×20,32	16,51×16,26	16,51×20,32	16,51×20,32	16,51×25,40
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	300	95	95	75	75	75	55	45	45	45	37
205	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	240	380	475	600	680	850	1 050	1 200	1 500	1 900	1 900
	Размеры корыта, <i>дм</i>	10,41×8,38	10,41×8,38	10,41×10,41	10,41×12,95	11,68×10,41	11,68×12,95	11,68×16,26	13,21×12,95	13,21×16,26	13,21×20,32	13,21×20,32
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	190	75	75	55	55	55	45	37	37	37	30
165	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	120	190	240	300	340	430	530	600	760	950	950
	Размеры корыта, <i>дм</i>	8,38×6,67	8,38×6,67	8,38×8,38	8,38×10,41	9,40×8,38	9,40×10,41	9,40×12,95	10,54×10,41	10,54×12,95	10,54×16,26	10,54×16,26
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	110	55	55	45	45	45	37	30	30	22	22
132	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	60	95	120	150	170	215	270	300	380	475	475
	Размеры корыта, <i>дм</i>	6,75×5,33	6,67×5,33	6,67×6,67	6,67×8,38	7,49×6,67	7,49×8,38	7,49×10,41	8,51×8,38	8,51×10,41	8,51×12,95	8,51×12,95
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	75	37	37	30	30	30	22	19	19	15	15
106	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	30	49	60	76	87	110	135	150	190	240	240
	Размеры корыта, <i>дм</i>	5,33×4,32	5,33×4,32	5,33×5,33	5,33×6,67	5,97×5,33	5,97×6,67	5,97×8,38	6,79×6,67	6,79×8,38	6,79×10,41	6,79×10,41
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	45	22	22	19	19	19	15	11	11	7,5	7,5
85	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	15	24	30	38	42	53	68	76	95	120	120
	Размеры корыта, <i>дм</i>	4,32×3,43	4,32×3,43	4,32×4,32	4,32×5,33	4,83×4,32	4,83×5,33	4,83×6,67	5,33×5,33	5,33×6,67	5,33×8,38	5,33×8,38
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	30	15	15	11	11	11	7,5	5,5	5,5	3,7	3,7
68	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	7,6	12	15	19	22	27,5	34	38	49	53	53
	Размеры корыта, <i>дм</i>	3,43×2,79	3,43×2,79	3,43×3,43	3,43×4,32	3,87×3,43	3,87×4,32	3,87×5,33	4,32×4,32	4,32×5,33	4,32×6,67	4,32×6,67
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	15	7,5	7,5	5,5	5,5	5,5	3,7	2,2	2,2	2,2	2,2
55	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	3,8	6	7,6	9,5	11	13,5	17	19	24	27,5	27,5
	Размеры корыта, <i>дм</i>	2,79×2,22	2,79×2,22	2,79×2,79	2,79×3,43	3,11×2,79	3,11×3,43	3,11×4,32	3,43×3,43	3,43×4,32	3,43×5,33	3,43×5,33
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	7,5	3,7	3,7	2,2	2,2	2,2	1,5	1,1	1,1	1,1	1,1
43	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	1,9	3	3,8	4,5	5,3	6,8	8,3	9,5	12,0	15,0	15,0
	Размеры корыта, <i>дм</i>	2,22×1,78	2,22×1,78	2,22×2,22	2,22×2,79	2,48×2,22	2,48×2,79	2,48×3,43	2,79×2,79	2,79×3,43	2,79×4,32	2,79×4,32
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	4,5	2,2	2,2	1,5	1,5	1,5	1,1	0,75	0,75	0,75	0,75
35	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	0,95	1,5	1,9	2,4	2,65	3,4	4,2	4,9	6,0	7,5	7,5
	Размеры корыта, <i>дм</i>	1,78×1,43	1,78×1,43	1,78×1,78	1,78×2,22	1,97×1,78	1,97×2,22	1,97×2,79	2,22×2,22	2,22×2,79	2,22×3,43	2,22×3,43
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	3,0	1,5	1,5	1,1	1,1	1,1	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5
28	Рабочая емкость, <i>дм</i> ³	0,45	0,76	0,95	1,2	1,3	1,7	2,1	2,4	3,0	3,7	3,7
	Размеры корыта, <i>дм</i>	1,43×1,14	1,43×1,14	1,43×1,43	1,43×1,78	1,59×1,43	1,59×1,78	1,59×2,22	1,78×1,78	1,78×2,22	1,78×2,79	1,78×2,79
	Подводная мощность (наибольшая), <i>квт</i>	1,5	0,75	0,75	0,56	0,56	0,56	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37

¹ Номинальная или общая рабочая емкость, указанная в таблице, может отклоняться на 10% в большую или меньшую сторону в зависимости от конструкции роторов и свойств смешиваемых материалов.

вокруг центральной стойки¹. В бегунах, изображенных на этом рисунке, движение катков и гребков совершается против часовой стрелки. Наружный гребок перемещает обрабатываемый материал от стенки чаши под каток, идущий за гребком, внутренний же гребок смещает материал от центральной стойки под каток, движущийся следом за этим гребком. Катки раздавливают материал, разрушают куски и агрегаты.

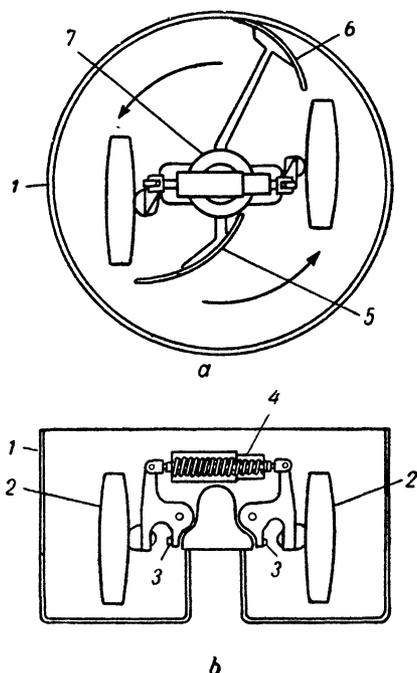


Рис. II-55. Схема смесительных бегунов:

a — план; *b* — поперечный разрез. 1 — чаша; 2 — катки (бегуны); 3 — винты для регулировки расстояния между ободом катка и основанием чаши; 4 — нажимная пружина для регулировки давления катков; 5 — внутренний гребок; 6 — наружный гребок; 7 — центральная стойка.

Поскольку катки имеют широкие ободы, а вращаются они вокруг центральной стойки по окружности малого радиуса, то только одна линия на окружности обода катка точно зацепляется с материалом, лежащим на дне чаши. В полосе под ободом, расположенной внутри этой границы, каток сдвигает материал в направлении обратном своему движению, а в полосе, лежащей снаружи линии зацепления, — вперед по движению катка. Это смещение материала под катком вызывает размазывание его, как при вращении, что ведет к весьма тщательному смешиванию ингредиентов.

Низкоконсистентные жидкие смеси нельзя обрабатывать в смесительных бегунах, так как в этом случае силы трения будут недостаточны, чтобы вращать катки, и они будут поворачиваться вокруг стойки, как тяжелые, непроизводительные тихоходные лопасти. Вязкие, но не липкие материалы, которые могут смещаться и переворачиваться гребками, смешиваются эффек-

тивно, но весьма липкие материалы сбиваются перед гребками в комки и под катки не передвигаются.

Обычно смесительные бегуны имеют емкость (по объему загружаемого материала) от 30 дм^3 до 1,7 м^3 и потребляют мощность соответственно от $\frac{1}{4}$ до 56 квт . Масса катков колеблется в пределах от 3,6 до 1800 кг . Существуют бегуны, чаши которых защищены от истирания плитями, имеются также полностью закрытые конструкции бегунов, которые применяются при использовании летучих растворителей либо для обработки материалов под вакуумом или в среде инертного газа.

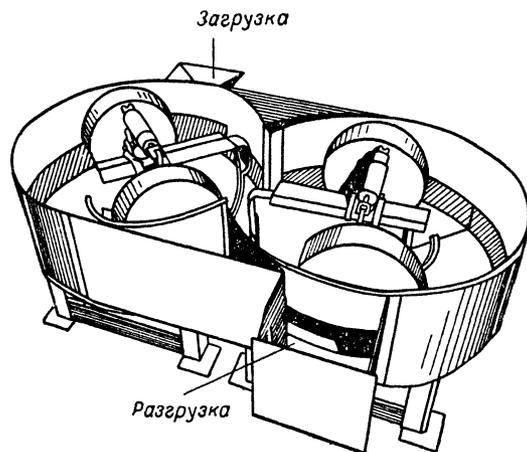


Рис. II-56. Смесительные бегуны непрерывного действия.

У бегунов непрерывного действия (рис. II-56) в точке пересечения двух чаш наружные гребки обеспечивают примерно одинаковое перемещение материала из одной чаши в другую, но материал накапливается в первой чаше до тех пор, пока скорость подачи материала и скорость выгрузки из разгрузочного отверстия во второй чаше не сравняются. Время пребывания материала устанавливается регулировочной дверцей.

Смесительные валки. Валковые машины выпускаются с одним, двумя или тремя валками и могут применяться как для периодического, так и для непрерывного проведения процесса. Материал пропускают между валками или между валком и неподвижным брусом, где происходит смешивание. Часть материала захватывается и непрерывно протягивается между валками или между валком и брусом, и здесь материал подвергается раздавливанию, раскалыванию и истиранию.

Обработка на валках требует наблюдения некоторых условий. Так, например, материал должен содержать достаточное количество жидкости, чтобы смачивать все время увеличивающуюся поверхность диспергируемых частиц. Жидкость необходима и для того, чтобы смазывать частицы, когда они проходят между валками, и для того, чтобы исключить возможность образования новых агломератов. Поскольку все раздробленные или диспергированные частицы в тонкой пленке должны быть немедленно окружены пленкой растворителя, подача материала на валки должна быть равномерной и в загружаемой массе не должно быть сухих кусков. Для предварительного смешивания материалов, подаваемых на валки, могут применяться месители со сменным баком.

¹ Bullock, Chem. Eng. Progr., 51, 243 (1955).

В зависимости от требований производства валки могут быть с обогревом или охлаждением. В связи с тем, что действие смесительных валков оказывается различным в зависимости от числа валков, различные типы машин рассматриваются особо.

Одновалковые машины. Одновалковые машины, как представлено на рис. II-57, состоят из валка с гладкой твердой поверхностью и перетирочного бруса с широкой трущей гранью. Практически результат обработки материалов на одновалковых машинах определяется только растирением. Захват материала между валком и брусом значительно слабее, чем между двумя вращающимися валками, и поэтому раздавливание будет происходить значительно слабее, чем в двухвалковых машинах. Однако за счет увеличения поверхно-

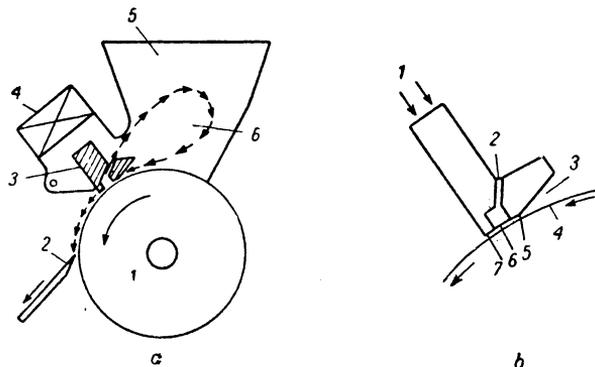


Рис. II-57. Схема одновалковой машины:

а — поперечный разрез: 1 — валок; 2 — нож; 3 — ребро бруса; 4 — гидравлический регулятор давления бруса; 5 — загрузочная воронка; 6 — направление движения материала. *б* — перетирочный брус: 1 — гидравлическое давление; 2 — отверстия для выхода пасты на рециркуляцию; 3 — клиновидная щель (захват); 4 — поверхность валка; 5 — первая перетирающая грань; 6 — перепускной канал (полость, находящаяся под давлением); 7 — вторая перетирающая грань.

сти соприкосновения перетирочного бруса и валка обеспечивается сдвиг больший, чем в двух- и трехвалковых машинах. Вследствие слабого захвата крупные частицы, находящиеся в обрабатываемом материале, скапливаются перед перетирочным брусом, что может привести к изменению состава продукта. Поэтому одновалковые машины рекомендуются для диспергирования, а не для перетира. Эти машины достаточно производительны при обработке материалов лишь в сравнительно узком диапазоне вязкостей. Смеси слишком подвижные не втягиваются в узкое пространство между перетирочным брусом и валком, тогда как весьма констентные пасты скапливаются перед брусом и также не поступают на обработку.

Двухвалковые машины. Двухвалковые машины имеют два параллельных валка, установленных на прочной станине с приспособлением для точной регулировки давления и расстояния между валками. Валки обычно монтируют в одной горизонтальной плоскости. Поскольку за один проход между валками достигается незначительное смешивание и происходит недостаточное диспергирование, то такие валки практически всегда применяются как машины периодического действия.

Чтобы увеличить перетирающее действие машин этого типа, валкам сообщают разные скорости вращения. Материал, прошедший через зазор между валками,

возвращается к точке загрузки, и цикл повторяется. Если валки имеют разную температуру, то материал обычно удерживается на более нагретом валке и возвращается к точке загрузки в виде плотного слоя. Этот прием устраняет возможность прохождения через машину загружаемого материала в виде двух тонких пленок, плотно прилегающих к поверхностям валков.

К концу процесса периодического смешивания крупные куски и агрегаты можно удалить, сбрасывая их между валками, а тонко смешанную массу — снять нажатием скребка навстречу нисходящей поверхности одного из валков.

Двухвалковые смесители применяются, главным образом, для приготовления паст в производстве чернил, красок и покровных материалов. Иногда они используются в трудных случаях смешивания, например, при обработке резиновых смесей, для чего часто употребляют рифленные валки.

Трехвалковые машины. Смесители с тремя валками являются машинами непрерывного действия, в которых валки одинакового диаметра устанавливаются параллельно на жесткой раме. Скорость вращения валков различна, причем приемный валок вращается с наименьшим числом оборотов, а разгрузочный — с наибольшим. Подшипники среднего валка установлены на станине неподвижно, а подшипники переднего и заднего валков могут перемещаться, за счет чего обеспечивается независимая регулировка зазоров между передним и средним, а также между задним и средним валками. Загружаемый материал входит в зазор между первым и вторым валками, которые продавливают пасту, раздавливая при этом частицы и агрегаты, а также истирая их за счет различия скоростей вращения. Поскольку слой пасты, выходящий из первого зазора имеет сравнительно большую толщину, то, вероятно, напряжение сдвига в этом слое незначительно. Зазор между вторым и третьим валками устанавливается меньшим, чем между первым и вторым, и поэтому толщина слоя пасты уменьшается. Уменьшение площади поперечного сечения слоя пасты компенсируется увеличением скорости вращения разгрузочного валка. В более тонком слое происходит дальнейшее дробление частиц, внутреннее истирание уменьшается, но за счет высоких скоростей увеличивается истирание вблизи валков. Повышение скорости вызывает в тонкой пленке некоторое напряжение сдвига. Материал у обоих мест захвата пасты совершает вращательное движение, которое также вызывает некоторое смешивание. Готовый продукт снимается с последнего валка по сужающемуся разгрузочному лотку, присоединенному к скребку, как показано на рис. II-58.

Для обеспечения удовлетворительной работы машины валки должны иметь диаметр, одинаковый по всей длине валка. Поверхность валков должна быть твердой и отшлифованной до зеркального блеска. Поскольку распорное давление между валками чрезвычайно велико, то диаметр валков должен быть достаточно большим, чтобы не возникло изгиба. Высококачественные подшипники должны быть тщательно закреплены в жесткой раме так, чтобы оси валков всегда находились в одной и той же плоскости — иначе невозможно обеспечить постоянный зазор и равномерный захват массы.

Главное назначение трехвалковых машин — диспергирование и перетирание чернил и паст пигментов, однако их можно использовать всегда, когда необходимо получение особо однородных систем.

Червячно-лопастные и червячные смесители. Червячные смесители различных конструктивных типов

особенно пригодны для обработки высоковязких пластических масс. Некоторые червячные машины применяются для формования изделий путем выдавливания, но обычно машины классифицируют не по назначению,

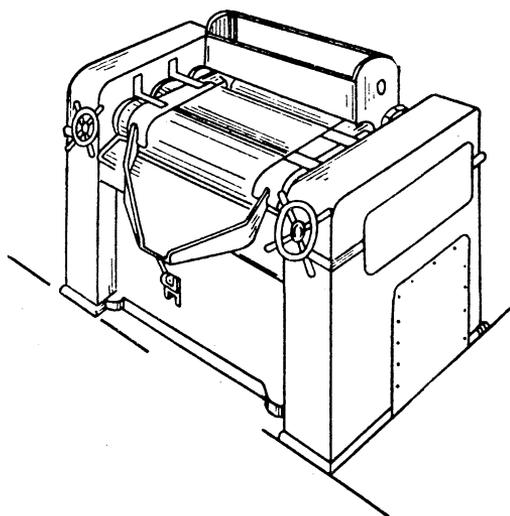


Рис. II-58. Трехвалковая машина.

а по форме их рабочих частей. Различают машины, в которых смешивание и перемещение материала производится червяками с короткими, прочными лопатками, укрепленными на вращающемся валу так, что концы лопаток образуют прерывистую винтовую линию (червячно-лопастные смесители), и машины с червяками, имеющими непрерывный виток или несколько непрерывных витков, если червяк многозаходный (червячные смесители).

Червячно-лопастные смесители. Червячно-лопастные смесители, как, например, представленный на рис. II-59, имеют один или два вала с укрепленными на них короткими, прочными лопатками. Червяки устанавливаются в цилиндрическом или корытообразном, обычно полностью закрытом корпусе, в котором находится обрабатываемый материал. В двухвалковых машинах червяки параллельны, расположены они могут быть как горизонтально, так и вертикально. Лопатки, посаженные на один вал, могут входить в зазоры между лопатками, закрепленными на другом валу, но могут быть и более короткими, так что цилиндры, описываемые обоими червяками, не пересекаются. Зазоры в смесителях этого типа настолько велики, что происходит значительное смешивание. Отдельные ингредиенты или частично смешанную массу подают с одного конца

Рис. II-59. Открытый двухвалвный червячно-лопастной смеситель.

машины. По мере того, как лопатки врезаются в материал, они проталкивают его вперед и перемещают по направлению к разгрузочному концу, фактически все время смешивая. Готовый продукт может выгружаться через одно-два открытых отверстия либо выдавливаться через одно или несколько сопел, которые дают грубо отформованные непрерывные полосы. Для того, чтобы нарезать полосы на куски, можно использовать автоматический нож. Червячно-лопастные смесители применяются больше всего в производстве керамики для смешивания глинистых масс и придания им пластичности.

Червячные смесители. Червячные смесители, применяемые для обработки паст, представляют собой машины, в которых червяк с непрерывным витком (или несколькими витками) вращается в точно пригнанном цилиндре (рис. II-60). Для удаления воздуха, уплотнения материала и создания достаточного давления,

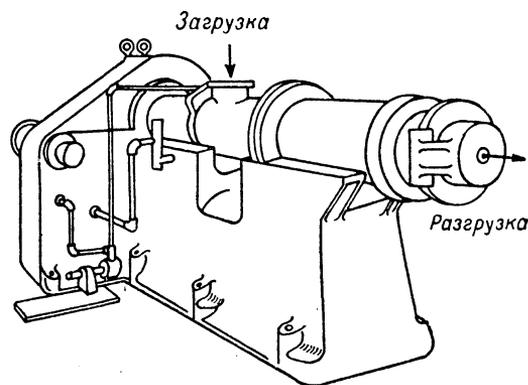


Рис. II-60. Червячный смеситель.

необходимого для продавливания материала через сопло, глубину канала или шаг винта по длине червяка делают различными.

Червячные смесители широко используют для обработки паст. Материал загружают в сухом, твердом виде, в машине он расплавляется в пасту, а при выгрузке снова затвердевает. В цилиндре смесителя материал подвергается действию напряжения сдвига, перетирается и смешивается. Непосредственное действие червяка дополняется действием решеток и дисков, через которые проходит материал перед продавливанием через сопло. Поскольку в зоне смешивания поперечное сечение канала невелико, а материал фактически движется в одном направлении, происходит смешивание только малых объемов материала. Поэтому ингредиенты должны быть равномерно смешаны перед подачей в загрузочную воронку.

Многочервячные смесители обеспечивают более значительное размазывающее действие и вызывают большее напряжение сдвига в материале, а также создают некоторое движение материала в обратном направлении, что улучшает смешивание.

Червячные машины применяют для обработки различных материалов — от мягких тестообразных продуктов и смесей, которые не требуют расплавления, до твердых пластиков, и в том числе таких, которые могут быть расплавлены только при температуре свыше 230° С. Методом выдавливания (экструзии) покрывают изоляцией провода и формуют сложные профили. Кроме того, большие количества искусственных смол пе-

ремешивают в червячных смесителях для получения шариков, которые используются при формировании пресованием и выдуванием.

Теория выдавливания (шприцевания или экструзии) и данные по моделированию на основании испытаний малогабаритного оборудования рассматриваются в работе Карлея¹.

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Пасты часто нагревают или охлаждают путем теплопередачи через стенки сосуда или стенки пустотелых размешивающих лопастей. Для достижения высоких скоростей теплопередачи существенно важны хорошее размешивание, большое отношение поверхности теплообмена к объему аппарата и частое удаление материала с поверхности. Иногда для охлаждения применяют испарение части растворителя, находящегося в смеси. Радиационное нагревание, которое применяется изредка как дополнительное средство, зависит от отражательной способности поверхности смеси.

В большинстве смесителей металлическая стенка аппарата представляет незначительное термическое сопротивление. Однако пристеночные слои нагреваемой или охлаждаемой среды, в особенности пастообразной, обычно имеют высокое сопротивление. Важно, следовательно, уменьшить до минимума сопротивление нагреваемой или охлаждаемой среды и перемещать пасту вдоль гладкой поверхности стенки и на удалении от нее постоянно и по возможности быстро. Лучший результат достигается при использовании скребка, плотно прижатого к стенке, который снимает со стенки пленку пасты при каждом обороте. Средние значения коэффициента теплопередачи составляют $30-200 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

Методы нагревания. Экономичность метода обогрева зависит от местоположения оборудования и доступности того или иного способа нагревания.

Прямой обогрев углем, нефтью или газом дешев, но неудобен, так как при этом существует постоянная опасность пожара, необходимо внимательное обслуживание, возможны неравномерный нагрев и окисление наружной поверхности стенок котла, охлаждение установки происходит медленно. Прямое нагревание пока еще широко применяется для обогрева лаковарочных котлов.

Косвенный обогрев воздухом или инертным газом, текущим по замкнутому контуру, экономичен, значительно менее опасен в пожарном отношении, не влечет повреждений стенки котла. Возможно довольно быстрое охлаждение установки при изменении направления движения циркулирующего газа. Такие системы обогрева применяются при рабочих температурах процесса свыше 150°C . Если температура превышает 480°C , канал и теплообменная поверхность должны быть изготовлены из нержавеющей стали.

Обогрев паром является наиболее распространенным способом нагревания. Этот метод экономичен и безопасен, процесс легко регулировать. В тонкостенных сосудах необходим автомат, выключающий вакуум, который образуется, если давление подаваемого пара понижается, а пар в рубашке конденсируется. Без этих мер предосторожности недостаточно прочные части аппарата могут разрушиться.

Жидкие теплоносители, например, вода, масло, некоторые органические соединения, расплавленные ми-

неральные соли позволяют легко регулировать температуру и обеспечивают равномерный обогрев обрабатываемого материала.

Электрообогрев осуществляется посредством омических сопротивлений в виде полос или лент, которые должны быть электроизолированы от корпуса аппарата, но находиться с ним в хорошем тепловом контакте. Нагреватели должны быть размещены таким образом, чтобы не было чередования горячих и холодных участков поверхности. Иногда нагреватели монтируют в алюминиевых блоках, форма которых соответствует форме стенок сосуда. Электрообогрев эффективен при температурах от 150 до 500°C . При электрообогреве обеспечивается точное регулирование температуры, стоимость обслуживания незначительна, электрическая энергия используется почти на 100% . Однако стоимость электроэнергии обычно велика, и это обстоятельство ограничивает применение электрообогрева.

Теплота трения в установках некоторых типов, например, месильных машинах усиленной конструкции, выделяется быстро и в значительных количествах. Иногда повышение температуры может быть выгодным, способствуя размягчению материала и ускорению химического превращения. Однако легко можно получить слишком высокие температуры, вредные для продукта, и поэтому, чтобы не делать частых остановок машины, следует предусмотреть возможность охлаждения. Нагревание за счет теплоты трения можно снизить, уменьшая количество работающих деталей, их площадь и скорость движения. Это приведет к увеличению времени смешивания, но облегчит охлаждение обрабатываемого материала.

Методы охлаждения. Охлаждение воздухом можно проводить, продувая воздух над поверхностью машины, площадь которой увеличивается за счет ребер. Воздухом или охлаждающим инертным газом можно также обдувать поверхность смеси при условии, что приняты меры, предохраняющие материал от загрязнения или окисления.

Испарение избытка воды или растворителя под вакуумом либо под атмосферным давлением обеспечивает хорошее охлаждение, так как испарение даже небольшого количества жидкости значительно снижает температуру. Следует, однако, иметь в виду, что удаление слишком большого количества растворителя может привести к порче продукта.

Загрузка льда непосредственно в смеситель — удобный способ быстрого охлаждения в тех случаях, когда допустимо происходящее при этом разбавление смеси. Загрузка сухого льда позволяет получать более низкие температуры, а выделяющийся углекислый газ создает хорошую инертную среду, но средство это значительно дороже.

Охлаждение водой или хладагентом, циркулирующим в рубашке или полых лопастях мешалок, используется во многих типах смесителей. В большинстве случаев это самый дешевый способ охлаждения.

ВЫБОР СПОСОБА ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА И НЕОБХОДИМОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Оборудование для получения нового продукта. При проектировании производства нового продукта должно быть проведено очень тщательное предварительное изучение вопроса. Для выявления определяющих условий необходимы исследования на лабораторных или опытных установках. Первоочередной проблемой является выбор и установка оборудования, обеспечивающего

¹ Carley, Ind. Eng. Chem., 45, 970, 974, 978, 989 (1953).

обработку больших количеств продукта при наименьших затратах.

При решении этой задачи лучше всего воспользоваться аналогией. Какой из продуктов, выпускаемых промышленностью, ближе всего по свойствам новому продукту? Каким способом получают этот продукт? Какие затруднения существуют на этом производстве?

В других случаях рекомендуется следующий порядок действия:

1. Обстоятельно перечислите все материалы, подлежащие обработке, в процессе производства и опишите их характеристики:

а) способ доставки материалов к промышленному оборудованию — в мешках, бочках, барабанах, навалом, по трубопроводу и т. д.;

б) нужно ли на месте хранить и взвешивать материалы;

в) физическое состояние материалов;

г) плотность и насыпные характеристики;

д) размер частиц или предельные значения крупности частиц;

е) вязкость;

ж) температуры плавления и кипения;

з) коррозионные свойства;

и) абразивные характеристики;

к) токсичность;

л) взрывоопасность;

м) вызывает ли материал раздражение кожи, глаз или легких;

н) чувствителен ли материал к воздействию воздуха, влаги или тепла.

2. Перечислите необходимые данные, характеризующие производство:

а) количество продукта, которое должно быть получено за 8-часовую смену;

б) состав готового продукта;

в) требования к точности методов анализа;

г) как часто изменения цвета, вкуса, запаха, сорта и других характеристик продукта требуют чистки оборудования;

д) является ли данная операция независимой или по ходу технологического процесса она связана с другими и работу соответствующей группы аппаратов надо синхронизировать;

е) происходит ли изменение физического состояния материала во время переработки;

ж) происходит ли химическое превращение; сопровождается оно выделением или поглощением тепла;

з) требуемый температурный режим;

и) в какой форме должен быть получен готовый продукт;

к) каким способом выгружается материал из аппаратов (перекачиванием, самотеком по трубе или желобу, при опрокидывании сосуда и т. п.).

3. Опишите подробно определяющие характеристики конечного продукта:

а) устойчивость эмульсии или дисперсии;

б) степень перемешивания агрегатов или первичных частиц;

в) основные требования к цвету продукта;

г) однородность распределения активного компонента или компонентов в дисперсии, как в медикаментах;

д) содержание влаги для прессования, выдавливания и т. д.

Ответы на эти вопросы позволяют определить тип оборудования для промышленного производства. Так, если исходные материалы поступают в кусках, выбирают машины, обеспечивающие дробление, например, смесительные бегуны или валковые машины,

Если материал обладает взрывчатыми свойствами, то в аппарате не должна выделяться теплота трения и не должны возникать искры. При обработке материала, обладающего раздражающим запахом, следует применять закрытые аппараты с соответствующей вентиляцией, а при необходимости предусматривать также пылеулавливание и очистку дымовых газов.

Не следует выбирать смесители непрерывного действия, если мал объем продукции, выпускаемой за смену. Если во время проведения процесса происходит изменение физического состояния материалов, то расход энергии следует определять по самой тяжелой стадии, когда вязкость среды имеет наибольшую величину. Если процесс сопровождается эндо- или экзотермической реакцией, то надо применять аппараты с рубашкой для нагревания или охлаждения.

Чтобы обеспечить получение вполне однородной смеси частиц, составляющих основную массу продукта, необходимы интенсивно действующие аппараты с небольшим зазором между неподвижными и рабочими элементами смесителя. Если один из ингредиентов вводится в очень малых количествах, рекомендуется отдельно смешивать этот ингредиент с частью какого-нибудь другого компонента смеси и затем прибавлять полученный концентрат к остальной массе для окончательного диспергирования. Такой метод дозирования особенно целесообразен при введении красителей, антиоксидантов и т. п. Приготовление концентрата может быть выполнено с лабораторной точностью, тогда как на смесительных установках ошибки взвешивания исправляются разбавлением основного компонента.

Четкие ответы на перечисленные выше вопросы могут выявить необходимость применения автоматического взвешивания и накопления концентрата, дозировки жидких компонентов и автоматического контроля продолжительности различных циклов производственного процесса.

Тщательное изучение всех факторов, определяющих течение процесса, позволяет снизить затраты на оборудование и существенно сократить пусковой период. Последнее особенно важно, так как потери, связанные с выпуском низкосортной или бракованной продукции, обычно очень велики.

Подготовка и порядок загрузки исходных материалов. В целях обеспечения максимального выпуска высоко-сортной продукции необходимо определенным образом корректировать физические свойства исходных материалов и загружать компоненты смеси в надлежащем порядке. Следует тщательно проверять качество ингредиентов смеси. Некоторые тонкодисперсные материалы, как, например, сажа, содержат большое количество воздуха. Такие материалы перед загрузкой рекомендуется уплотнять или увлажнять, чтобы удалить из них воздух. Для увлажнения порошкообразных материалов целесообразно использовать часть легкого растворителя. Если порошок нельзя увлажнить, то его можно уплотнить механическими средствами. Иногда оказывается необходимым удалить адсорбированный газ под вакуумом.

Многие ингредиенты (такие, как вулканизаторы, антиоксиданты и некоторые присадки), которые вводят в небольших количествах, в сухом состоянии часто склонны комковаться. Эти вещества до подачи на смешивание должны быть или распушены при просеивании на грохоте, если комки легко разрушаются, или размолоты на небольшой молотковой дробилке, вальцевой мельнице либо мельнице другого подходящего типа, если образовавшиеся комки имеют высокую ме-

ханическую прочность. Продолжительность смешивания сокращается и готовый продукт получается более однородным, если во всех ингредиентах агрегаты первичных частиц будут разрушены перед смешиванием.

Если какие-либо твердые компоненты, добавляемые в малых количествах, растворимы в жидкой части смеси, то целесообразно вводить их в виде раствора, принимая меры к тому, чтобы распределить этот раствор равномерно во всей массе. Если твердое вещество, прибавляемое в очень малых количествах, нерастворимо ни в одном из жидких компонентов смеси, мо-

жет оказаться необходимым вводить его в смесь в виде раствора в каком-либо нейтральном растворителе, предусмотрев выпаривание этого растворителя в конце операции смешивания.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

З. Штербачек, П. Тауск, Перемешивание в химической промышленности, перев. с чешск., Госхимиздат, 1963.
Н. А. Козулин, И. А. Горловский, Оборудование заводов лакокрасочной промышленности, изд. 2-е, «Химия», 1968.
Э. Бернхардт, Переработка термопластичных материалов, перев. с англ., Госхимиздат, 1962.

СУШКА С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Для сушки с перемешиванием применяется цилиндрический аппарат небольшой высоты с плоским дном и выпуклой или конической крышкой. Днище и стенки аппарата снабжены рубашкой для обогрева паром или другим теплоносителем. На вертикальном валу закреплена мешалка тяжелого типа, которая, медленно вращаясь, перемешивает материал в сушилке и перемещает его относительно поверхности нагрева. Лопасти мешалки обычно устанавливаются с очень малым зазором от стенки и иногда снабжаются пружинными скребками для очистки поверхности нагрева. Вал мешалки может входить в сушилку либо сверху — через крышку, либо снизу — через днище. Почти все

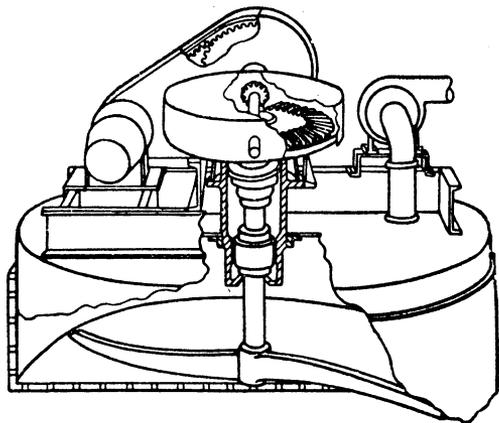


Рис. II-61. Атмосферная сушилка.

сушилки, даже работающие под атмосферным давлением, закрыты крышкой, на которой размещаются лаз, смотровые окна и выходное отверстие (через него естественной тягой удаляется горячий пар). Вакуумные сушилки закрыты плоской или куполообразной крышкой, оборудованной лазом, смотровыми окнами и штуцером для соединения с вакуумной линией. Оба типа сушилок имеют в боковой стенке отверстия (на уровне днища) для разгрузки высушенного продукта. В сушилках для липких материалов, которые в виде загустевшей массы налипают на мешалку, сверху или сбоку устанавливаются неподвижные скребки для очистки мешалки.

Сушилку, работающую под атмосферным давлением, называют иногда чашей для гранулирования. Одна из конструкций таких сушилок снабжена сетчатым фильтром для обезвоживания кристаллических твердых веществ перед их высушиванием. В другой специальной

конструкции в чугунную стенку кожуха залит змеевик. Сушилка, работающая под атмосферным давлением, изображена на рис. II-61, а вакуумная сушилка — на рис. II-62. Типовые установки имеют диаметр от 0,9

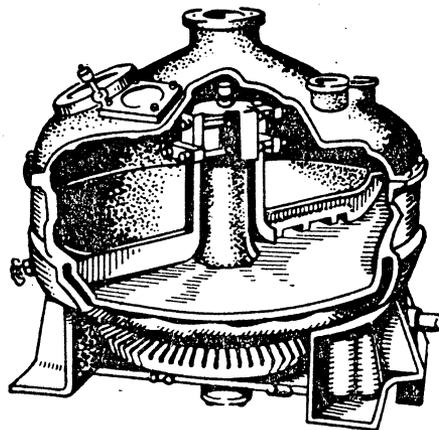


Рис. II-62. Вакуумная сушилка.

до 3,0 м и поверхность нагрева от 1,35 до 27 м². Загружаются они обычно на две трети емкости. Скорость вращения мешалки от 2 до 20 об/мин.

ПРИМЕНЕНИЕ

В периодически действующих сушилках с перемешиванием обрабатывают материалы, которые должны перемешиваться во время высушивания. Сушилки довольно легко очищаются и поэтому успешно применяются для разнообразных материалов, требующих сложной обработки. Они полезны в тех случаях, когда непрерывная сушка неэкономична, например, когда из высушиваемого материала должен быть удален и рекуперирован растворитель (при сушке под высоким вакуумом или когда выпаривание, кристаллизация и сушка, сопровождающиеся существенными изменениями физических свойств, должны проводиться в одном аппарате). Такие сушилки непригодны для сушки материалов, частицы которых измельчаются во время сушки или комкуются с образованием на поверхности твердой корки.

ПРОЕКТНЫЕ И РАБОЧИЕ ДАННЫЕ

Основными факторами, от которых зависит работа сушилки с перемешиванием, являются скорость теплопередачи и интенсивность перемешивания. Из них

Данные о работе сушилки с перемешиванием¹

Материал	Растворитель	Содержание растворителя, масс. %		Диаметр сушилки, м	Скорость вращения мешалки, об/мин	Рабочее давление (абс.), мм рт. ст.	Общий коэффициент теплопередачи K , $\frac{вт}{м^2 \cdot град}$	Общая продолжительность цикла, ч
		начальное	конечное					
Сульфат натрия	Вода	45	0,5	0,9	2	760	100	11
Карбонат натрия	Вода	74	14,4	0,9	2	760	215	6
	Вода	83,5	0,1	0,9	2	760	215	
Карбонат кальция	Вода	37,2	0,1	0,9	3	760	200	4
Рудная пульпа	TiCl ₄	70	1,0	...	...	760; 50	60	5,5
Сульфат натрия	Вода	57,1	7,5	0,9	2	65	130	
	Органический	39,0	1,0	...	...	50	85	
Хлорид натрия	Вода	81,5	0,6	0,9	2	65	290	10
Фосфат кальция	Вода	46,8	7,6	0,9	2,5	40	110	3
Хлорид лития	Вода	49,0	0,1	...	...	25	70	

¹ Harcourt, ASME Meeting, Niagara Falls, Sept. 17-23, 1936.

интенсивность перемешивания — фактор наиболее важный: перемешивание должно быть достаточно эффективным для того, чтобы предотвратит порчу материала в застойной зоне из-за перегрева и обеспечить удовлетворительную скорость теплопередачи. Для некоторых материалов интенсивность перемешивания лимитируется расходом энергии.

Часто высушиваемый материал в сушилке проходит ряд стадий; так, если необходимо высушить разбавленный раствор, то материал постепенно становится все более вязким, превращается в липкую массу, и, наконец, в свободно перемещающееся гранулированное твердое вещество. Необходимые скорость теплопередачи и интенсивность перемешивания заметно меняются во время сушки. Проектировать сушилку следует с учетом наиболее трудной стадии процесса.

Типичные данные о работе сушилки приведены в табл. II-5. Общий коэффициент теплопередачи K во время обработки в сушилке раствора или суспензии может быть определен по методам, изложенным в гл. III первого тома. Характерные пределы изменения K : 110 до 420 $вт/(м^2 \cdot град)$ (при учете теплопередачи только с той поверхности нагрева, которая находится в контакте с жидкостью). Подобные значения получаются при нагревании вязкой пасты с перемешиванием скребковой мешалкой. При высушивании паст и гранулированных твердых материалов средний общий коэффициент находится в пределах от 30 до 225 $вт/м^2 \cdot град$. Его изменения за время процесса зависят от плотности материала и содержания в нем влаги, а также от скорости вращения мешалки. При данных рабочих условиях общая продолжительность процесса сушки приблизительно пропорциональна объему нагрузки, приходящейся на единицу поверхности нагрева.

Расход энергии также изменяется во время цикла высушивания. На рис. II-63 приведены данные по сушке материала в сушилке диаметром 1,8 м с мешалкой, вращающейся со скоростью 11 об/мин. В течение первой половины цикла загружаемый материал был жидким раствором и расход энергии — низким. Когда материал превратился в липкую массу, расход энергии стал максимальным, но когда паста превратилась в твердые гранулы, расход энергии упал почти до половины максимального. Расход энергии во время той

части цикла, когда материал является жидкостью, можно определить по методам, описанным в разделе «Перемешивание подвижных сред». Удовлетворительных методов для определения максимального расхода энер-

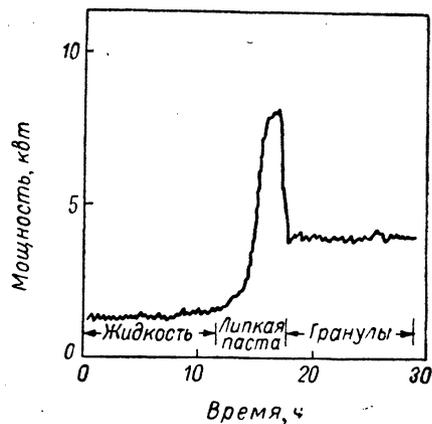


Рис. II-63. Типичная кривая расхода энергии во время процесса высушивания в сушилке с перемешиванием, $D = 1,8$ м.

гин не существует. Для стадии максимума рекомендуется данные опытной установки коррелировать по уравнению:

$$\frac{N_{\max}}{n^3 D^5 \rho_{\text{ТВ}}} = K \left(\frac{Mg}{\rho_{\text{ТВ}} n^2 D^4} \right)^m \quad (\text{II-14})$$

где N_{\max} — максимальная мощность; n — число оборотов мешалки; D — диаметр мешалки; $\rho_{\text{ТВ}}$ — плотность материала; M — масса загрузки; g — ускорение силы свободного падения; K и m — эмпирические постоянные группы¹, в уравнении (II-14) — безразмер-

¹ Группа $\frac{N}{n^3 D^5 \rho}$ представляет собой так называемый критерий мощности K_N . — Прим. ред.

ные, что дает возможность пользоваться любой системой единиц измерения.

Уравнение (II-14) основано на допущении, что силы сдвига материала ничтожны по сравнению с силами подъема. На рис. II-64 приведены в виде диаграммы данные по расходу мощности для сушилки с $D=1,8$ м, скоррелированные по уравнению (II-14).

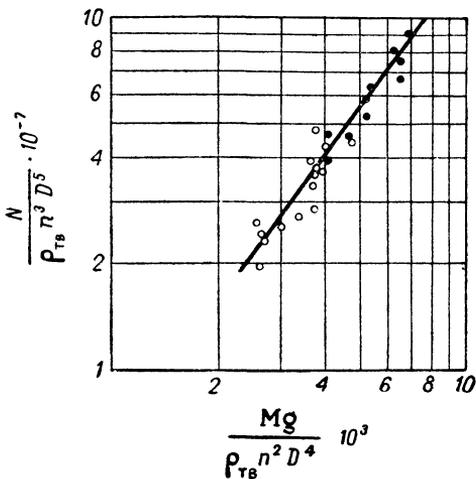


Рис. II-64. Корреляция расхода мощности для сушилки с перемешиванием:

○ — 13 об/мин; ● — 18 об/мин; $\rho_{ТВ} = 324$ кг/м³; $D = 1,8$ м.

В вакуумных сушилках скорость уходящего пара не должна превышать 0,6 м/сек, чтобы свести до минимума унос сухого материала. При расчете времени процесса должно быть предусмотрено время для загрузки материала, нагревания его до температуры сушки и для разгрузки высушенного продукта. Разгрузка продолжается от 15 до 30 мин.

Тепловой к п. д. обычно составляет 70—80% у вакуумных сушилок и 65—75% у атмосферных.

ОТЖИМАНИЕ¹

Отжиманием называется процесс отделения жидкости от двухфазной системы «твердое — жидкость» путем сжатия ее между сближающимися плоскостями в условиях, допускающих отвод жидкости.

Отжимание преследует ту же цель, что и фильтрование — разделение жидкой и твердой фаз. Однако при фильтровании исходная смесь, как правило, имеет достаточную текучесть и может перекачиваться насосом. При отжимании начальное содержание жидкости в материале невелико; разделение таких концентрированных систем и производится методами отжима. Отжиманием пользуются также и тогда, когда требуется более полное отделение жидкости от осадка, получаемого при фильтровании.

В некоторых случаях, как, например, при обезвоживании бумаги, отжимание предшествует процессу сушки, так как механические методы отделения воды всегда дешевле термических; поэтому отжиманием часто

¹ Bailey, Industrial Oil and Fat Products, New York, 1945, p. 469. — Dickey, Bryden, Theory and Practice of Filtration, ch. 9, New York, 1946.

ЭКОНОМИКА

Ориентировочная стоимость сушилок с мешалками приведена на рис. II-65. Эксплуатационные расходы значительно изменяются в зависимости от природы

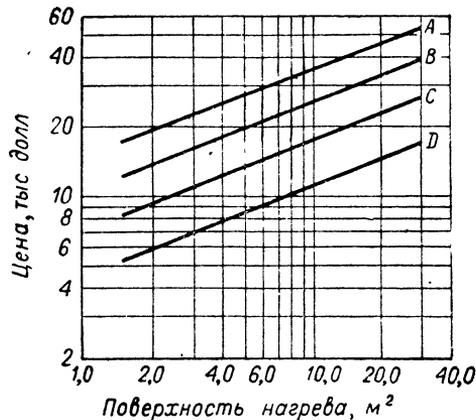


Рис. II-65. Стоимость сушилок с мешалкой. Кривая А — никелевая сталь, В — конструкция с залитым эвевонком; С — нержавеющая сталь, плакированная; D — углеродистая сталь (Bethlehem Foundry and Machine Co.).

материала и продолжительности процесса сушки. Так, например, стоимость расхода энергии может колебаться от 10 центов до 1 доллара на 1 т высушенного материала. Расходы на ремонт составляют в среднем 2—3% (годовых) от полной стоимости установки. Расход рабочей силы существенно изменяется в зависимости от оснащения вспомогательным оборудованием и автоматизации производства. При минимальном вспомогательном оборудовании требуется 1—2 человеко-часа для загрузки и разгрузки, а для обслуживания сушилки во время сушки около 1/2 человеко-часа на каждый час работы сушилки.

пользуются как первой стадией отделения влаги. В производстве растительных масел конкурируют процессы отжимания и экстракции растворителями; отжимание дает менее полное отделение, но зато оба продукта, масло и жмых, получают более высокого качества. При извлечении сока из сахарного тростника отжимание на трехвальцовом прессе комбинируется с экстракцией водой.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОТЖИМАНИЯ

Гидравлическими прессами периодического действия пользуются в промышленной практике издавна, хотя в настоящее время им на смену приходят прессы непрерывного действия. Основными типами периодических прессов являются пакетный, плиточный, чашечный, корзиночный и некоторые другие. Для непрерывных операций пользуются шнековыми и вальцовыми прессами различных типов.

Прессы периодического действия. Пакетный пресс. Материал для отжимания заворачивают в салфетки из

ткани и пакеты укладывают один на другой в ряд стальных коробок, устанавливаемых между неподвижной и подвижной плитами вертикального гидравлического пресса. Каждый пакет лежит на перфорированной пластине, находящейся поверх дренажных канавок плиты, и покрывается лежащей выше коробкой. Пакеты, загруженные в коробки, сжимаются гидравлическим прессом.

Пятнадцатипакетный пресс перерабатывает 8 т жмыха из хлопковых семян за сутки, понижая в них содержание масла с 30% до 6%. Один цикл прессования продолжается от 20 до 30 мин. Вначале применяется низкое давление прессования — около 13 ат на массу, а после того как начнет отделяться масло, это давление повышается до 110 ат (при давлении в гидравлической системе 270 ат). Максимальное давление выдерживается в течение нескольких минут с целью более полного дренажа жидкости.

Плиточный пресс. По принципу действия плиточный пресс аналогичен пакетному с той лишь разницей, что пакеты в салфетках во время прессования находятся на плитах и открыты с боков¹. В некоторых случаях плиты изготовляются полыми для целей нагревания; на поверхности плит обычно расположены канавки для стока отжатой жидкости. Чтобы обеспечить лучший дренаж, весь пресс может быть слегка наклонен назад. Такие прессы бывают и горизонтальными. При наличии нагреваемых паром пластин сначала можно получить на холоду масло высшего качества, а затем остатки его выжать при горячем прессовании. Эта часть масла получается несколько худшего качества.

Чашечный пресс. Подлежащий прессованию материал помещается в цилиндрическую чашу с фильтрующими прокладками или ситами, расположенными сверху и снизу, и сжимается с помощью гидравлического плунжера, входящего сверху. Фильтрующая ткань покрывает материал только сверху и снизу, поэтому она не подвергается растяжению и разрыву, как в пакетных и плиточных прессах. Так как прессуемый материал изолирован стенками со всех сторон, то здесь он может быть более жидким, чем в случае прессов других типов. На практике в прессе используются несколько чаш; дно такой чаши служит плунжером для расположенной ниже чаши.

Самое широкое применение эти прессы получили в кондитерской промышленности для прессования тертых бобов какао. Они применяются также для прессования оливок, пальмовых и подобных им орехов, а также для обезвоживания аморфных осадков в химической промышленности. За один цикл в прессе обычно обрабатывают до 270 кг тертых бобов какао под давлением 400 ат. Конечными продуктами являются масло какао и жмых какао-порошка в виде твердой монолитной лепешки.

Усовершенствованным чашечным прессом является комбинированный агрегат Карвера, включающий фильтр и гидравлический пресс, который используется как обычный фильтр-пресс до тех пор, пока его камера заполняется. Затем содержимое пресса подвергается гидравлическому давлению (отжатию) с целью дополнительного отделения жидкости из образовавшегося сухого осадка. Этот пресс применяется для получения порошка и масла какао, отделения кристаллов от других жидкостей, в том числе и для отделения химических осадков. Обрабатываемый материал для этого пресса должен быть достаточно текучим, чтобы можно

было перекачать его насосом; если необходимо, часть фильтрата можно добавить в исходную массу.

Корзиночный пресс. В корзиночном прессе материал для отжимания помещается в цилиндр, изготовленный из узких деревянных планок или стальных конических полос или даже перфорированного стального листа. При сжатии плунжером жидкость выходит через узкие щели или отверстия в стенке цилиндра и стекает в поддон основания пресса. В этом прессе не используются фильтровальными тканями, поэтому он более пригоден для отжимания волокнистых, не содержащих жира материалов, а отжатая жидкость может содержать примесь взвешенных частей.

Корзиночным прессом пользуются в производстве сидра и других фруктовых и овощных соков, для отжатия оливкового масла, рыбьего жира и других масел, не требующих высоких давлений, а также для обезвоживания пищевых отходов и выделения из них жира перед сжиганием. В прессах иногда применяется не гидравлический способ создания давления, а механический (с помощью нажимного винта).

Прессы непрерывного действия. **Шнековый пресс.** В таком прессе, например прессе Андерсона (рис. II-66),

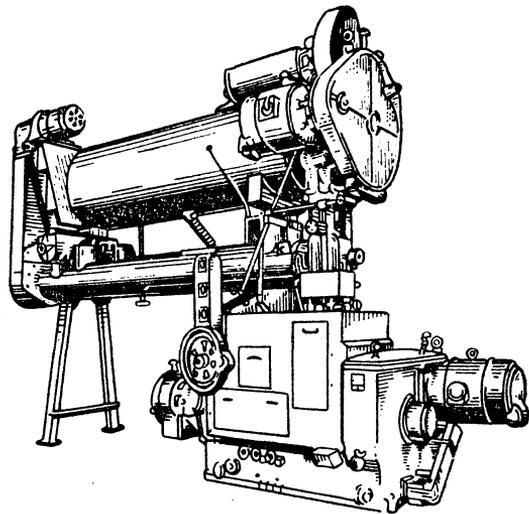


Рис. II-66. Пресс Андерсона со смесителем для масляных семян.

шнек плотно пригнан к корпусу с прямоугольными щелями. Для увеличения давления на материал корпус и шнек изготавливают сходящимися на конус в направлении разгрузочного конца. Этой же цели достигают также посредством изменения шага винта шнека при постоянном диаметре цилиндра. Разгрузочный конец корпуса частично закрывается регулируемым конусом или другим устройством, изменяющим размеры выходного отверстия и, таким образом, изменяющим давление на материал. При вращении шнека отжимаемый материал транспортируется вперед и при достаточном давлении из него начинает выжиматься жидкость, которая уходит через отверстия в корпусе пресса. При непрерывном процессе затраты рабочей силы и другие эксплуатационные расходы получаются ниже, чем при обслуживании гидравлического пресса. Непрерывные шнековые прессы широко применяются в промышленности растительных и животных масел,

¹ Этот пресс называется прессом открытого типа. — Прим. ред.

а также для обезвоживания бумажной массы, пластмасс, синтетического каучука, пищевых отходов и др. Во время обезвоживания материала вода для промывки или выщелачивания может впрыскиваться в одном или нескольких местах рабочего цилиндра. Возникающие при прессовании усилия сдвига частично разрушают структуру твердого вещества, оставляя неповрежденными отдельные волокна. Производительность шнековых прессов для масел колеблется от 3 до 1000 т сырья за сутки. Остаточное содержание масла в жмыхе находится в пределах от 2 до 18% в зависимости от сорта семян и типа пресса.

Вальцовые агрегаты. В вальцовых агрегатах непрерывного действия (рис. II-67), применяемых в трост-

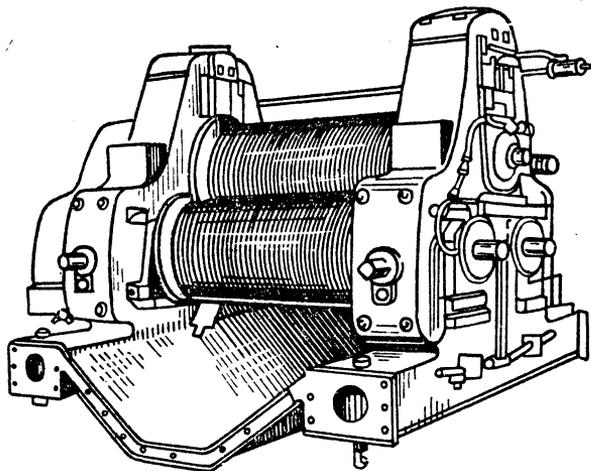


Рис. II-67. Трехвальцовый пресс для сахарного тростника.

никово-сахарной промышленности, одновременно происходит процесс дробления и отжимания. Трехвальцовый агрегат состоит из верхнего вальца, расположенного над и между двумя нижними. Верхний валец по концам прижимается двумя гидравлическими таранами. Материал сдавливается между верхним и первым нижним вальцами, а затем с помощью поворачивающей пластинки направляется на захват верхним и вторым нижним вальцами для повторного прессования. Вальцы изготовляются из чугуна с рифленой или желобчатой поверхностью. Иногда используются питающим вальцом для подачи материала на первую пару вальцов, что приводит к увеличению скорости питания агрегата и дает возможность уменьшить его размеры.

В тростниково-сахарной промышленности пользуются агрегатами из 4—7 пар вальцов, в которые распределительным транспортером подается размельченный тростник. Вначале тростник измельчается в сухом виде, затем в определенных местах следующих пар валков подается вода или слабый раствор в виде брызг для улучшения извлечения сахара.

В отличие от трехвальцовых агрегатов двухвальцовые осуществляют лишь отжатие жидкости без дробящих и разрывающих воздействий. Двойные вальцы широко используются для обезвоживания бумажной массы в бумагоделательных машинах. Подобные двухвальцовые устройства, часто с поверхностями, покрытыми фильтрующим материалом, применяются для от-

жимания воды или раствора из текстиля после крашения, отбеливания и подобных операций.

Дисковый пресс. Дисковый пресс непрерывного действия применяется для механического удаления влаги из таких материалов, как фруктовая и овощная мезга, синтетический каучук, древесная масса. Пресс состоит из двух вращающихся дисков, расположенных под некоторым углом друг против друга. Материал, подлежащий прессованию, поступает в расширенную часть, а разгружается через узкую щель после одно-четырёхкратного сжатия. Давление прессования может достигать 12 ат.

Вспомогательное оборудование. В процессе отжимания помимо прессов применяются гидравлические насосы разной производительности и давления; причем часто высокое и низкое давление создаются одним приводом. Насосы большой производительности и низкого давления необходимы в начале работы при подъеме давления, для формирования лепешки, а также на заключительной стадии для отключения пресса. Низкая производительность насоса и высокое давление жидкости нужны для окончательного, наиболее полного отжимания жидкости. Чтобы избежать возможных загрязнений, иногда в качестве жидкости в гидравлической системе пресса используется та же отжимаемая жидкость.

Для равномерного потребления жидкости в прессе устанавливаются аккумуляторы. Назначение их заключается в том, чтобы накапливать жидкость под давлением в отдельный резервуар при недостаточном потреблении жидкости прессом и отдавать ее в момент максимального потребления. Аккумулятор обычно представляет собою цилиндр с поршнем, нагруженный стальными болванками, камнем и т. п. Воздушные аккумуляторы обладают некоторыми преимуществами. Они имеют большую плавность хода, небольшой вес и требуют более легких фундаментов. Для систем высокого и низкого давления служат отдельные аккумуляторы.

Разработаны автоматические краны, которые после ручной подготовительных операций включают гидравлическую систему низкого давления, необходимую для начального периода работы пресса, когда появятся первые порции масла. Затем включают систему высокого давления для окончательного прессования. Дроссельные вентили предотвращают возможность быстрого, скачкообразного перехода к высокому давлению.

ТЕОРИЯ ОТЖИМАНИЯ

Теория процесса отжимания еще очень далека от своего завершения. В большинстве экспериментальных работ рассматривается поведение лишь отдельных конкретных материалов, что приводит к получению эмпирических, а не обобщенных уравнений.

Условия равновесия¹. Гернхем и Мэссон² изучали условия равновесия при отжимании, т. е. условия, соответствующие прекращению процесса вытекания жидкости под действием установившегося постоянного давления. Авторы считают знание этого состояния необходимым для изучения кинетики процесса отжимания и рекомендуют количество отжатой жидкости определять по разности между исходным ее содержанием и количеством, остающимся в материале после

¹ Имеется в виду равновесное состояние, достигаемое после окончания процесса отделения жидкости под действием постоянной нагрузки. — *Прим. ред.*

² Gurnham, Masson, Thesis, New York University, 1940 and 1942; *Ind. Eng. Chem.*, 38, 1309 (1946).

отжима. Количество жидкости, остающееся в отпрессованном материале, можно приблизительно определить по разности объемов полученной лепешки и твердого остатка в ней.

В результате замеров объемов различных материалов и соответствующих им давлений прессования высказана гипотеза, что приращение давления вызывает пропорциональное увеличение насыпной плотности твердого компонента системы:

$$\frac{dp}{p} = K d\rho_{\text{нас}} = K d \frac{1}{V}$$

или

$$\frac{dp}{d(1/V)} = Kp \quad (\text{II-15})$$

После интегрирования получим:

$$\lg p = k + \frac{k'}{V} \quad (\text{II-16})$$

Здесь p — давление на систему; $\rho_{\text{нас}}$ — насыпная плотность твердой фазы; V — удельный объем системы, считая по содержанию твердой фазы; K , k и k' — постоянные, зависящие от природы материала и условий прессования.

Исследования проводились в испытательном цилиндре Карвера. Изучались такие материалы, как хлопковое волокно, шерстяная пряжа, войлок, асбестовое волокно, бумажная масса, опилки и другие волокнистые материалы; они прессовались в сухом состоянии и смоченными водой, маслом и другими жидкостями. Применялось давление от 17 до 380 ат. Большинство данных Диерра по сахарному тростнику и багасе, которые рассматриваются ниже, подтверждают эту теорию.¹

Эмпирические уравнения. Диерр исследовал отжимание сока из сахарного тростника и багасы, пользуясь малогабаритным чашечным прессом. Им предложена формула:

$$V_{\perp} = \frac{C}{p^n} \quad (\text{II-17})$$

где V_{\perp} — объем лепешки, состоящий из волокна и неотжатого сока; p — давление прессования; C — постоянная для данного опыта; n — показатель степени, являющийся функцией p и зависящий от условий прессования.

Уравнение (II-17) является эмпирическим, но соответствует полученным данным с достаточной точностью. С помощью этого уравнения Диерр подсчитал величину давления, развиваемого в вальцевом прессе, и определил работу, затрачиваемую на прессование.

¹ В настоящее время в теории отжимания известно понятие о равновесных компрессионных характеристиках, которые в дифференциальной форме представляют собой зависимость $dp = a\varepsilon$, где a — коэффициент уплотнения, а ε — коэффициент пористости. В случае действия постоянной нагрузки кинетика нестационарного процесса отжимания описывается уравнением [Н. И. Саев, Изв. вузов, № 5 (1958); № 3 (1967)]:

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1, 3, 5}^{\infty} \frac{1}{i^2} \exp\left(-\frac{i^2 \pi^2}{4} \cdot \frac{c\tau}{h^2}\right)$$

где ε_1 , ε_2 — коэффициенты пористости исходного и конечного материала в равновесном состоянии; ε — коэффициент пористости через любой промежуток времени от начала действия нагрузки; c — коэффициент, зависящий от условий прессования и природы материала; h — приведенная высота слоя материала ($\varepsilon=0$). — Прим. ред.

Проверка показала, что расчет по уравнениям Гёрнхема и Мэссона дает результаты, близкие к данным Диерра. Исключение представляют условия прессования в чашечных прессах малого диаметра, в которых существенное влияние на процесс начинают оказывать стенки цилиндра, и начальные стадии прессования, когда в порах материала, возможно, находится воздух.

Ку с сотрудниками¹ изучал отжимание масел из 7 различных сортов семян. Опыты проводились при различных концентрациях жидкости. Использовался лабораторный пресс емкостью 1150 см³.

Авторы получили следующую формулу:

$$W = C'W_0 \frac{p^{1/2}\theta^{1/6}}{\nu^a} \quad (\text{II-18})$$

в которой W — количество отжатого масла; W_0 — количество масла в исходном материале; C' — постоянная прессования, зависящая от природы материала; p — давление; θ — продолжительность прессования; ν — кинематическая вязкость масла при температуре прессования; a — постоянная, зависящая от рода семян.

Исследования проводились в пределах давлений от 70 до 310 атм при температурах от 15 до 125°С, 15 значениях кинематической вязкости и продолжительности от 1/2 до 9 ч. Важным показателем, характеризующим процесс, является конечное содержание масла в семенах. Оптимальные значения в опытах находились в пределах от 5 до 13% в зависимости от рода семян и температур.

Непрерывное отжимание. Применительно к шнековым прессам непрерывного действия не разработано никакой исчерпывающей теории, хотя эти прессы имеют много общего со шнековыми питателями и экструдерами. К.п.д. шнека колеблется от 25 до 80%. Мощность, по-видимому, расходуется на преодоление усилий сдвига внутри массы и на перемещение материала по окружности внутри корпуса прессы. Для успешного отжимания в шнековом прессе лучше всего подходит волокнистая или другая подобная структура материала, обладающая достаточным внутренним сопротивлением растяжению. Например, бумажная масса или влажный уголь могут быть обезвожены, но шлам или глина легко проскальзывают через витки шнека. Для некоторых материалов внутреннее давление в шнековом прессе может достигать 138—276 ат.

Отжимание жидкости на вальцовых прессах изучалось применительно к бумажной массе. Было определено влияние на пресс основных параметров, хотя окончательные количественные выводы имеют только эмпирический характер. Общее давление, развиваемое посредством верхнего вальца, является важной переменной величиной. Однако его повышение не всегда может сыграть положительную роль, так как рост давления вызывает не только обезвоживание материала, но и закупорку его пор, в результате чего затрудняется отделение жидкости.

Состояние поверхности вальца (твердость) также является существенным фактором; у вальца с мягкой поверхностью увеличивается поверхность захвата и уменьшается давление на единицу поверхности материала, а следовательно, увеличивается длина пути рабочей зоны прессования. По сравнению с твердым такой валец производит менее тщательное обезвоживание материала. Аналогично вальцы большого диамет-

¹ Коо, Chen. Ind. Res. (China), 6, 9 (1937). — Коо, J. Chem. Eng. China, 4, 15, 207 (1937); 5, 47, 69 (1938); 7, 1, 23 (1940); 8, 1, 5 (1941). — Коо, Ind. Eng. Chem., 34, 342 (1942).

ра распределяют силу сжатия на большую площадь и увеличивают длину рабочей зоны прессования, что делает их менее эффективными по сравнению с вальцами малых диаметров. При увеличении окружной скорости уменьшается время пребывания материала в рабочей зоне захвата и уменьшается степень обезвоживания.

Важной, но мало изученной переменной является величина сопротивления потоку жидкости внутри материала. Внутреннее сопротивление потоку многократно изменяется по мере поступления материала в зоны захвата и сжатия. Поперечный поток жидкости способствует удалению ее из внутренних слоев материала, потск, параллельный движению ткани, но направленный в противоположную сторону, — единственное возможное движение жидкости в зоне захвата. Структура материала и ее изменение при сжатии существенно

влияют на процесс. Создание вакуума внутри перфорированных вальцов улучшает сток в зоне захвата и существенно увеличивает степень удаления жидкости. Действие трехвальцового агрегата, по-видимому, одинаково с действием двух двухвальцовых прессов; во второй паре вальцов происходит дальнейшее обезвоживание материала, так как при одном проходе никогда не достигается полное удаление.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Г. А. Кук. Процессы и аппараты молочной промышленности, т. II, Пищепромиздат, 1960.

М. Я. Дикис, А. Н. Мальский, Технологическое оборудование консервных заводов, Пищепромиздат, 1962.

А. Я. Соколов и др., Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств, изд. 2-е. Изд. «Машиностроение», 1969.

ОТСТАИВАНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ¹

Отстаиванием называют процесс удаления взвешенных твердых частиц из потока жидкости путем осаждения под действием силы тяжести. Процесс отстаивания можно разделить на сгущение и осветление. Основной целью сгущения является увеличение концентрации твердой фазы, а осветления — удаление

КЛАССИФИКАЦИЯ СУСПЕНЗИЙ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Классификация суспензий и наиболее распространенные методы определения размеров отстойника помещены в табл. II-6. В осветлителях образуются

ТАБЛИЦА II-6

Классификация отстаиваемых суспензий и методы испытания

Суспензия	Описание начала процесса отстаивания	Примеры	Методы определения площади осаждения	Методы определения высоты уплотненной зоны
I класс — разбавленная; независимое осаждение частиц	Частицы или хлопья осаждаются независимо друг от друга. Границы осаждения нет. Осаждение свободное. Скорость осаждения зависит от размеров частиц или хлопьев	Мутная вода, ил	Метод длинной трубки	Метод Коу и Клевенжера; метод Робертса
II класс — промежуточная; фазовое осаждение	Верхняя зона — свободное осаждение частиц. Нижняя — осаждение коагулированных частиц. Нет резкой линии раздела	Химические и металлургические пульпы, сточные воды, хлопья пыли	Метод длинной трубки; метод Клевенжера, Кинча	То же
III класс — концентрированная; массовое осаждение	Заметна определенная граница осаждения. Скорость осаждения уменьшается с увеличением концентрации твердых частиц. Скорость осаждения замедляется помехами со стороны частиц или хлопьев	Химические и металлургические пульпы, активированный шлам	То же	» »
IV класс — компактная; стесненное осаждение	Хлопья или частицы осаждаются в тесном соприкосновении друг с другом благодаря уплотнению	Все пульпы ¹	» »	» »

¹ Все пульпы в результате отстаивания приходят к этому классу.

твердого вещества из относительно разбавленного потока.

¹ Coe, Clevenger, Trans. Am. Inst. Mining Engrs, 55, 356 (1916). — Kynch, Trans. Faraday Soc., 48, 166 (1952). — Talmage, Fitch, Ind. Eng. Chem., 47, 38 (1955). — Roberts, Trans. Am. Inst. Mining Engrs, 1, 61 (1949). — Couperman, Trans. Am. Inst. Mining Engrs, 187, 223 (1950).

суспензии I класса и некоторые суспензии II класса, а в сгустителях обрабатываются остальные суспензии II класса и все суспензии III и IV классов.

Эмпирические методы испытаний суспензий, указанные в табл. II-6, разработаны с целью оценки размеров отстойника, определения сил тяжести, подъемной силы и сопротивления среды, которые действуют на

частицу при ее осаждении в жидкости. Эмпирические методы определения размеров аппаратов необходимы из-за многочисленности факторов, влияющих на скорость осаждения частицы. Среди этих факторов — плотность жидкости и частиц, вязкость, размеры частиц, их форма, концентрация и степень коагуляции.

Основными размерами, характеризующими отстойник, являются площадь и высота. Площадь должна быть настолько большой, чтобы скорость движения вверх осветленной жидкости, покидающей отстойник, не превышала скорости осаждения самой медленной частицы, которая должна быть отделена. Скорость движения вверх жидкости, покидающей отстойник, обычно выражается в $m/ч$ или в $m^3/m^2 \cdot мин.$

В отстойнике концентрация твердого вещества изменяется в широких пределах (в верхнем потоке, покидающем отстойник, концентрация твердой фазы мала, а в концентрированном нижнем потоке — велика). Хотя изменение концентрации по высоте происходит

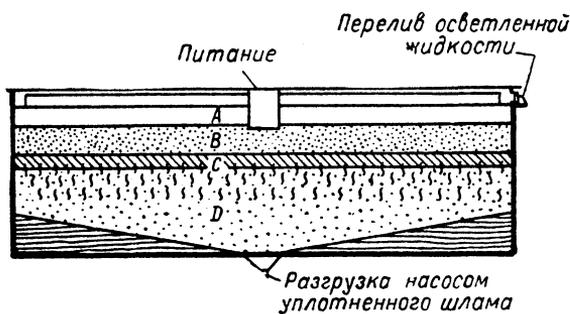


Рис. II-68. Зоны осаждения суспензии в неравном сгустителе.

Зоны: А — чистая вода или раствор; В — пульпа консистенции питания; С — пульпа промежуточной консистенции между зонами В и D; D — пульпа в сжатии.

непрерывно, однако на различной глубине можно выделить четыре зоны (рис. II-68). На рисунке показана непрерывность уплотнения в условиях подачи суспензии в центр, выхода чистой жидкости по периферии отстойника и разгрузка осадки снизу.

РАЗМЕРЫ ОТСТОЙНИКОВ

Определение площади осаждения. Как показано в табл. II-6, методы, применяющиеся для определения площади осаждения, зависят от характера суспензии. Методом длинной трубки пользуются при материалах, осаждающихся без ясно заметной границы раздела. Сюда относится весь первый класс суспензий и часть второго. Метод в особенности применим тогда, когда коагуляция является функцией времени.

Коагуляцией часто пользуются для преодоления действия броуновского движения путем увеличения видимых размеров частиц с помощью агломерации. Коагуляция может быть механической и химической. Механическая коагуляция достигается легкой циркуляцией, обеспечивающей необходимое время для агломерации частиц. Химическая коагуляция вызывается изменением рН или прибавлением высоковалентных органических реагентов (как крахмал и клей). Если степень коагуляции значительна, то время выдержки становится

важным фактором при регулировании содержания твердого вещества в верхнем потоке. Коагуляция твердого вещества может быть медленной, и крупные частицы могут продолжать увеличиваться за счет менее крупных, когда быстро осаждающиеся частицы объединяются с медленно оседающими. Вообще, при любой скорости верхнего потока его осветление будет заметно улучшаться с увеличением времени выдержки.

Прибор «длинная трубка» представляет собой трубку из пластмассы с внутренним диаметром около 75 мм и длиной около 2,5 м. Краны, вставленные через каждые 0,3 м длины, позволяют взять пробу на любой глубине для анализа суспензии на содержание твердого вещества. Испытание состоит в отборе проб по 200 $см^3$ суспензии, начиная с верхнего крана и до нижнего через определенные промежутки времени, пока осадок на дне трубки не станет плотным.

По методу длинной трубки определяется также концентрация твердого вещества в верхнем сливе как функция скорости перелива и времени осаждения. При этом испытании регистрируются уровень, время и концентрация твердого вещества. По этим данным можно рассчитать время осаждения и скорость перелива (в $m/ч$ или в $m^3/m^2 \cdot мин.$). Время осаждения определяется как время, прошедшее от начала подачи суспензии; скорость перелива находят при делении высоты, на которой взята проба, на время осаждения. Затем составляют диаграмму зависимости концентрации твердого вещества в переливе от скорости перелива. Из этой диаграммы следует, что коагуляция частиц твердого вещества в суспензии не является функцией времени осаждения. Из графика можно выбрать надлежащее соотношение продолжительности отстаивания в осветленной зоне и скорости перелива, которое даст желаемую чистоту слива.

Результаты статического испытания суспензии могут быть проверены в динамических условиях путем периодического введения проб в длинную трубку и анализа их на содержание взвешенного твердого вещества в жидкости, которая вытеснилась в перелив. Скорость подачи и уровень ввода в трубку выбираются в зависимости от скорости перелива и времени осаждения. Точку питания следует выбирать с таким расчетом, чтобы уходящий слив задерживался в аппарате на время, необходимое для удаления твердой фазы.

Высота расположения крана, через который вводится в трубку проба, равна скорости перелива (в $m/ч$), умноженной на соответствующее время осаждения. Например, скорость перелива равна 0,9 $m/ч$, а желаемое время осаждения составляет 2 ч; объем пробы, равный объему трубки высотой 0,3 м, должен вводиться через кран, расположенный на 1,8 м ниже верхнего уровня жидкости, через каждые 20 мин. Перед введением каждой пробы отбирается жидкость из самого верхнего крана и анализируется на содержание взвешенного вещества.

Упрощенный метод. При исследовании суспензий I класса и некоторых суспензий II класса применяется также и более простой метод определения времени осаждения в зоне осветления. Для этого на разное время в градуированные цилиндры помещают ряд проб суспензии. Верхний слой жидкости в цилиндре анализируется на содержание взвешенного твердого вещества. Результаты такого исследования можно представить в виде диаграммы содержания взвешенного твердого вещества в сливе в зависимости от времени осаждения. Эта методика дает только необходимое время осаждения; скорость перелива должна подбираться опытным путем.

Когда материал осаждается при наличии определенной поверхности раздела, как некоторые суспензии II класса и все — III и IV классов, объем обрабатываемого твердого материала определяется поверхностью раздела. В отстойниках наблюдаются различные концентрации (в кг жидкости на кг твердого вещества), начиная от концентрации осветленного перелива и кончая сгущенным нижним слоем. Можно считать, что каждой концентрации соответствует свой объем твердой фазы. Он определяется как способность материала данной концентрации достигать таких условий, когда массовая скорость твердого вещества, покидающего зону, равна или больше массовой скорости твердого вещества, входящего в эту зону. Достижение этого условия при определенной концентрации зависит от массовой скорости осаждения, которая должна быть равна или больше скорости перелива. Отстойник, содержащий суспензию с переменной концентрацией, имеет достаточную площадь осаждения или скорость перелива, которая ни в одной зоне не превышает скорости осаждения.

Метод Коу и Клевенжера. Этот метод¹ обычно применяется для определения площади осаждения, когда материал осаждается при четкой выраженной поверхности раздела. Для определения площади осаждения пользуются формулой материального баланса зоны с данной концентрацией:

$$F = \frac{1,333 (X_{нач} - X_{ос})}{\omega_{ос} \rho} \quad (II-19)$$

где F — площадь осаждения, m^2 на кг сухой твердой фазы в час; $\omega_{ос}$ — скорость осаждения, $m/ч$, при подаче суспензии с концентрацией $X_{нач}$; ρ — плотность жидкости, $кг/м^3$; $X_{нач}$ — концентрация питания, равная отношению массы жидкости к массе твердого вещества (Ж:Т); $X_{ос}$ — то же для удаляемого нижнего осадка.

Скорость осаждения зависит от $X_{нач}$ для некоагулирующихся суспензий. Зная ряд значений этой функции, можно найти необходимую площадь осаждения для различных концентраций по начальной скорости осаждения материалов, имеющих концентрации в пределах от концентрации питания до концентрации осадка. Концентрация, соответствующая максимальной величине площади F , представляет минимум производительности по твердой фазе и является критическим разбавлением.

Когда пользуются этим методом, начальную постоянную скорость осаждения находят опытным путем при помощи градуированных цилиндров: пробы суспензий берут разных концентраций, начиная от концентрации питания и до концентрации осадка. Образцы с разными концентрациями получают путем декантации отстаившей прозрачной жидкости и тщательного перемешивания остатка.

Метод Кинча. Метод Кинча также предназначен для определения производительности на единицу площади осаждения по сухому твердому веществу в «критических» условиях. Метод Коу и Клевенжера требует отдельных измерений начальной скорости осаждения для ряда начальных концентраций. Метод Кинча отличается от предыдущего тем, что предполагает непрерывное изменение концентрации на границе раздела, начиная с концентрации исходной суспензии и кончая концентрацией осадка. В этом случае наклон касательной и кривой осаждения представляет скорость

осаждения, соответствующую концентрации твердого вещества на границе раздела.

Следует отметить, что метод Кинча первоначально был разработан для частиц одинаковых размеров и формы. Любой метод, основанный на таких предположениях, будет иметь ограниченное применение. Но в коагулированных суспензиях размеры и форма агломерированных частиц близки к равномерным. Поэтому метод Кинча более подходит для коагулированных суспензий, чем для суспензий с большим разнообразием форм и размеров частиц. На основе видоизмененного метода Кинча получена следующая формула для площади осаждения:

$$F = \frac{t}{C_0 H_0} \quad (II-20)$$

где F — площадь установки, m^2 на кг сухого твердого вещества в час; t — время, ч, найденное путем пересечения касательной к кривой осаждения с горизонтальной линией, соответствующей высоте H , которую занимало бы твердое вещество в градуированном цилиндре, если бы оно имело концентрацию, желательную для сгущенного осадка; C_0 — концентрация исходной суспензии, кг сухого твердого вещества на m^3 ; H_0 — начальная высота исходной суспензии в градуированном цилиндре.

В противоположность методу Коу и Клевенжера, метод Кинча не указывает максимальной площади установки на единицу массы, так как уравнение (II-20) не дает правильных решений при разбавлениях ниже критического. Поэтому в подобных случаях обязательно определять критическое разбавление по кривой осаждения. Были испробованы различные эмпирические методы для определения этой критической точки.

Определение высоты отстойника. В отстойнике занятый объем делится на следующие зоны: зона осветленной жидкости, зона питания, переходная зона и зона уплотнения. Из методов, применяемых для определения площади осаждения, только метод длинной трубки дает оценку высоте осаждения и притом только частичную. Время осаждения и скорость перелива, найденная по методу длинной трубки, используются для определения требуемой высоты зоны осветленной жидкости и зоны питания. Высота переходной зоны всегда устанавливается эмпирически; высота же зоны уплотнения может быть определена с помощью лабораторных опытов в градуированных цилиндрах.

В зоне уплотнения отстойника концентрация изменяется от величины, соответствующей началу уплотнения, до концентрации осадка, покидающего отстойник. Считают, что концентрации в начале уплотнения соответствует такая структура осадка, что дальнейшее ее увеличение приводит уже не к осаждению, а к взмучиванию. Из-за этого явления при опытным определении высоты зоны уплотнения пользуются скребковой мешалкой, вращающейся со скоростью около 0,1 об/мин.

Высота зоны уплотнения определяется делением объема зоны уплотнения на площадь осаждения. Объем зоны уплотнения вычисляется по промежутку времени между моментом входа твердого вещества в зону уплотнения и моментом выхода его из зоны в виде осадка. Если известен средний объем шлама на единицу веса сухого вещества, то объем зоны уплотнения находят умножением этого среднего объема на общий вес твердого вещества в зоне уплотнения.

Разбавление в начале уплотнения произвольно и определяется по кривой осаждения суспензии (высота

¹ C. O. Clevenger, Trans. Am. Inst. Mining Engrs, 55, 356 (1916).

границы осадка как функция времени осаждения). Эта кривая вычерчивается по данным опытного осаждения суспензии в градуированных цилиндрах со скребковыми мешалками, делаящими 0,1 об/мин. Прямолинейный участок зоны уплотнения на кривой осаждения экстраполируется до пересечения с ординатой или осью высот. Расстояние между точкой пересечения и высотой суспензии в нулевой момент времени делится пополам и полученный отрезок проектируется по горизонтали на кривую осаждения. Высота суспензии в цилиндре, соответствующая этой проекции, указывает, какова была бы концентрация твердой фазы в начале уплотнения, если бы она равномерно распределялась по всей высоте.

Выбранная концентрация осадка должна быть меньше конечной концентрации, которой можно достигнуть. Этот выбор может основываться на опыте по перекачке насосом шлама требуемой концентрации или экономическими соображениями. Высота, которую твердая фаза занимала бы в градуированном цилиндре, если бы она была равномерно перемешана при заданной концентрации осадка, рассчитывается, исходя из этой величины и известного содержания твердой фазы в цилиндре (плотность осадка, наличие зависимости плотности осадка от концентрации твердой фазы упрощает этот расчет). Эта высота указывается на кривой осаждения. Разность между временем, соответствующим требуемой концентрации осадка, и началом его уплотнения представляет время осаждения в зоне уплотнения.

Средний объем зоны уплотнения на единицу массы сухого твердого вещества определяется интегрированием кривой осаждения в пределах между верхней и нижней границами зоны уплотнения. По среднему объему зоны уплотнения на единицу массы твердого вещества рассчитывается объем зоны и ее высота.

Метод Робертса. Определение высоты зоны уплотнения можно вести по методу Робертса¹, который представляет собой видоизменение метода Коу и Клевенжера и применим ко всем видам суспензий. Часть кривой осаждения, соответствующая зоне уплотнения, изменяется по логарифмическому закону. По методу Робертса эта логарифмическая функция интегрируется графически, при использовании полулогарифмической сетки. Средний объем зоны уплотнения находят по площади над прямой линией, вычерченной на полулогарифмической сетке, тогда как при методе Коу и Клевенжера пользуются площадью под кривой линией, нанесенной на обычную сетку. При правильном использовании оба метода дают одинаковую высоту зоны уплотнения. По методу Коу и Клевенжера необходимо использовать данные «время — поверхность раздела» только на участке до точки желаемой концентрации осадка и включая эту точку. По методу Робертса данные по осаждению требуются вплоть до конечной точки уплотнения, причем на диаграмме значения логарифма ($D - D_{\infty}$) вычерчиваются в зависимости от времени (D — разбавление в любое конечное время, а D_{∞} — разбавление в бесконечное время).

Практические размеры отстойника. Когда требуемая площадь осаждения определена, в расчет вносятся поправки в виде коэффициентов надежности. Один из коэффициентов учитывает изменения в характеристиках исходной суспензии: температуры, концентрации твердой фазы, pH среды и размеров частиц. Этот коэффициент надежности колеблется в пределах от

1,10 до 1,25 в зависимости от изменения этих переменных и их влияния на процесс осаждения. Другой коэффициент предусматривает поправку на неэффективную часть объема отстойника, обусловливаемую возмущениями на впуске. Этот коэффициент в значительной степени зависит от размеров отстойника и колеблется в пределах от 1,10 для установок диаметром около 30 м и больше и до 1,50 для установок диаметром 4,5 м и меньше. Произведение этих двух коэффициентов вводится в виде поправочного множителя в расчет площади осаждения.

Высота отстойника представляет собою сумму высот четырех зон: зоны осветленной жидкости, питания, промежуточной и уплотнения. По методу длинной трубки определяется объем и высота зоны осветленной жидкости и зоны питания. При использовании других методов испытания следует предусматривать высоту осветленной зоны от 0,3 до 1,8 м, меньшие высоты могут быть взяты в случае быстро осаждающихся материалов (например, концентраты руд). Для зоны питания обычно предусматриваются высоты около 0,6 м. Для промежуточной зоны также принимается высота около 0,6 м (даже когда пользуются методом длинной трубки).

Зона уплотнения подлежит расчету, затем вводится коэффициент надежности, равный 1,75, обеспечивающий максимальную концентрацию осадка и позволяющий ограничить скопление осадка. Сумма высот четырех зон составляет общую высоту отстойника.

ГСГУСТИТЕЛИ

Периодические густители. Периодические осадительные резервуары (рис. II-69). Это простейшие и старейшие аппараты для сгущения суспензий. Сначала резервуар наполняется суспензией для уплотнения. Через предусмотренный промежуток времени, который зависит от характера осаждения, прозрачный верхний

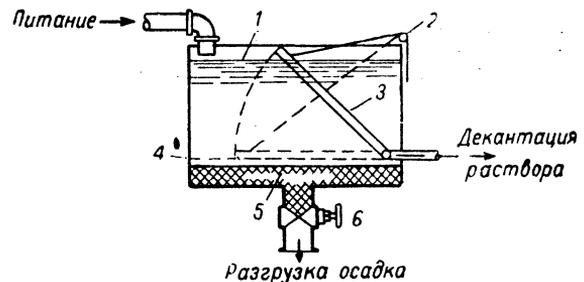


Рис. II-69. Периодический отстойник:

1 — верхний уровень воды; 2 — цепь; 3 — подвижный сифон; 4 — нижний уровень воды; 5 — осадок; 6 — клапан.

слой жидкости удаляется через подвижный сифон или через соответствующий перелив в стенке резервуара. После того как декантирован желаемый объем жидкости, уплотненный осадок удаляется через разгрузочный клапан или люк.

Периодические осадительные резервуары изготовляют любой формы и размеров, чаще всего — цилиндрической формы. Резервуары обычно устанавливают группами, чтобы разделить процесс на стадии наполнение — отстаивание — выгрузка.

¹ Roberts, Trans. Am. Inst. Mining Engrs, 1, 61 (1949).

Осадительные конуса. Осадительный конус представляет собою конический резервуар с углом конуса от 45 до 60°. Обычно они действуют периодически, но могут работать и непрерывно, если их снабдить внизу выходным клапаном, который можно регулировать либо автоматически, либо вручную.

Конус Аллена. Конус Аллена показан на рис. II-70. Питание поступает через центральный приемник 1. Осветленная жидкость переливается в круговой ло-

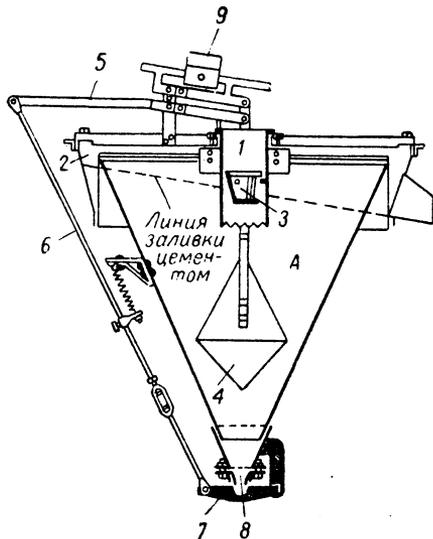


Рис. II-70. Осадительный конус Аллена:

1 — приемник; 2 — лоток; 3 — перегородка; 4—7 — устройство для передачи информации; 8 — клапан; 9 — рычаг.

ток 2. Твердая фаза осаждается в зоне А, а перегородка 3 содействует равномерному распределению питания. С увеличением плотности осадка устройство 4 начинает подниматься и передавать информацию об этом при помощи связанных друг с другом деталей 5, 6 и 7 шаровому клапану 8. Клапан открывается и осадок выгружается. Регулирование действия аппарата осуществляется передвижением груза на рычаге 9.

Непрерывные сгустители. Наибольшее распространение получил сгуститель непрерывного действия со скребковой мешалкой. Резервуары таких сгустителей чаще всего бывают цилиндрическими или прямоугольными. Основным отличием непрерывного сгустителя является система удаления осадка, которая заключается в непрерывном передвижении сгустившегося осадка по дну резервуара к месту разгрузки. Питание в цилиндрический сгуститель поступает в центральную трубу, из которой и распределяется потоком по резервуару. Осветленная жидкость переливается по периферии аппарата через край в желоб. Сгустившийся осадок при помощи медленно движущегося механизма перемещается по направлению к расположенному в центре коллектору, обычно коническому, и разгружается через отверстие или откачивается насосом.

Одноярусные сгустители. Различают три основных типа одноярусных сгустителей: 1) с верхним креплением движущихся частей; 2) с центральным приводом и двигателем в центре; 3) с центральным приводом и

двигателем, помещенным на конце движущейся рамы у периферии аппарата. Третий тип называют также сгустителем с тяговым приводом.

Сгустители с верхним креплением движущихся частей обычно имеют диаметр до 18 м (в особых случаях — свыше 36 м). На рис. II-71 изображена типичная установка. Привод состоит из главной червячной или цилиндрической прямозубой шестерни, обычно

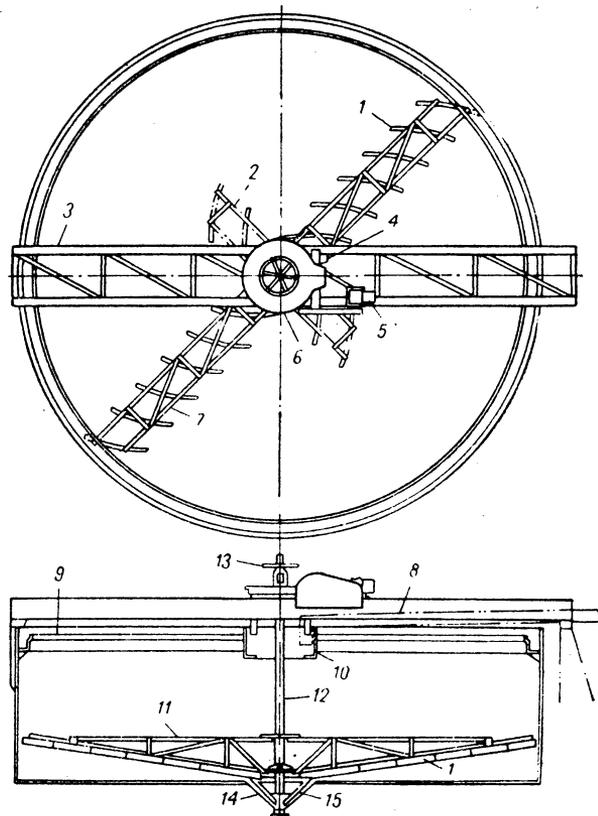


Рис. II-71. Сгуститель с центральным приводом и верхним креплением движущихся частей:

1 — скребки; 2 — короткая лопасть; 3 — рама для механизма; 4 — пружинный указатель, сигнализация перегрузки, выключатель электродвигателя; 5 — электродвигатель; 6 — привод; 7 — длинная лопасть; 8 — желоб для подачи питания; 9 — порог для верхнего лотка; 10 — приемник питания; 11 — лопасть; 12 — вертикальный вал; 13 — подъемное устройство; 14 — разгрузочный конус; 15 — конусный скребок.

монтируемой на шариковом подшипнике большего диаметра и приводимой в движение электродвигателем через редуктор. Вертикальный вал скреплен на шпонке с главной шестерней. Две сгребующих лопасти соединены с центральным валом с помощью стальных крестовин. Обе длинных лопасти снабжены скребками и описывают два круга по дну за один оборот вала, причем в случае необходимости устанавливаются две дополнительные короткие лопасти, которые могут описать, вместе с двумя длинными, в общей сложности 4 круга за один оборот по дну сгустителя, чтобы удалить грубые частицы, оседающие близко от центра аппарата. Конические скребки, скрепленные болтами с центральным валом, предохраняют нижний разгрузочный конус от забивки осадком. Поддерживающее устройство,

перекрывающее резервуар, может быть выполнено в виде рамы, как показано на рис. II-71, или — в случае больших диаметров — в виде сварной фермы. Рама поддерживает механизм сгустителя, площадку для обслуживающего персонала и желоб для питания.

Установка может быть снабжена устройством для облегчения подъема тяжелых деталей. Простейшее из таких устройств имеет ручной привод. Крепление главной шестерни имеет штурвал; вал соединен с подъем-

бетонной или стальной. Лопастей соединены с рамой привода, вращающейся вокруг центральной колонны. Эта рама скреплена болтами с главной шестерней привода, которая смонтирована на шариковом подшипнике большого диаметра. Могут быть использованы один или более комплектов зубчатых передач, с двумя главными шестернями, расположенными равномерно для больших механизмов, требующих крутящего усилия до $243 \cdot 10^3$ кгс·м. Подъемное устройство может быть

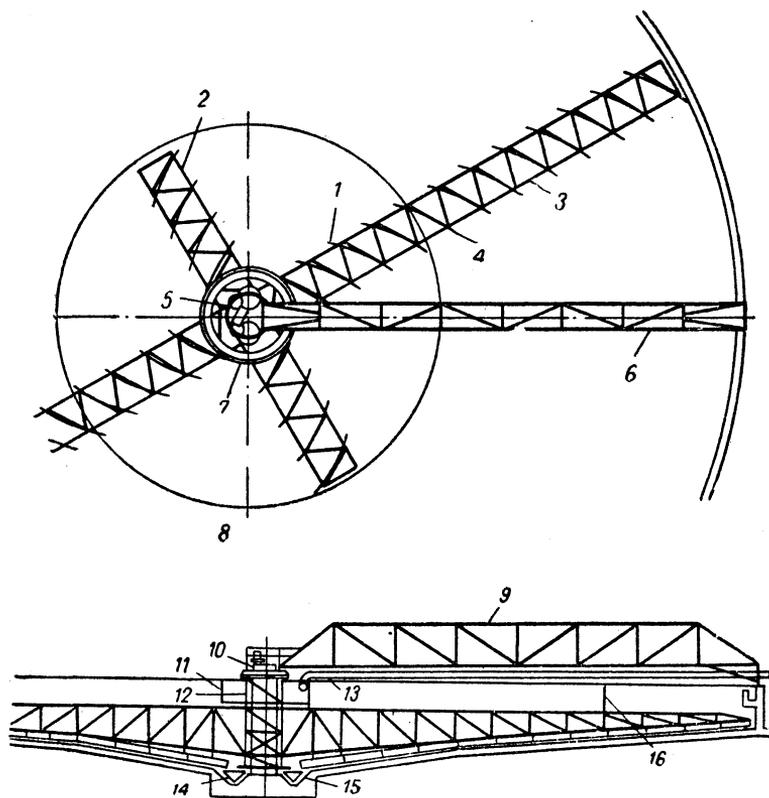


Рис. II-72. Сгуститель с центральным приводом и двигателем в центре:

1 — внутренние скребки; 2 — две коротких лопасти (подвешенные); 3 — две длинных лопасти; 4 — кривые скребки; 5 — привод; 6 — лотковая ферма; 7 — приемник питания; 8 — ось механизма; 9 — лотковая ферма; 10 — лоток; 11 — труба или лоток питания; 12 — клетка; 13 — труба или лоток питания; 14 — конусный скребок; 15 — разгрузочный конус; 16 — стойка-указатель.

ным винтом, скрепленным со штурвалом. При вращении штурвала механизм поднимается или опускается. Высота подъема обычно равна 30 см. Привод спроектирован таким образом, что червяк вала может двигаться горизонтально, толкая калиброванную пружину. Движение червяка передается стрелке указателя. Это движение может также привести в действие звонок, когда нагрузка подходит к предельной, может также выключить электродвигатель, либо произвести сразу оба эти действия.

На рис. II-72 изображен сгуститель также с центральным приводом, но с двигателем в центре. Эта конструкция применяется для сгустителей диаметром около 15 м, но она гораздо более экономична для диаметра сгустителя 18 м и выше. Механизм аппарата поддерживается центральной стационарной колонной,

установлено на сгустителе с центральным приводом для подъема лопастей на 0,3—0,9 м. Сгустители с центральной колонной строятся диаметром до 112,5 м.

Сгуститель с тяговым приводом изображен на рис. II-73. В то время как установки с центральным приводом и центральной колонной имеют расположенный в центре механизм, у сгустителя с тяговым приводом имеется моторизованная каретка, перемещающаяся по стенке резервуара. Перемещаемая ферма перекинута от неподвижной центральной колонны до каретки. Эта ферма служит большой лопастью мешалки и связана с одной или несколькими короткими лопастями с гребками для лучшего перемешивания осадка в центральной зоне. Прикрепленные к лопастям скребки передвигают твердое вещество к кольцеобразной разгрузочной канавке для осадка, расположенной вокруг цент-

ральной колонны. Энергия к электродвигателю каретки подается через кольцо, соединенное с центральной колонной, контактными щетками на ферме. Если происходит перегрузка, раздается сигнальный звонок. Этот тип сгустителя большой производительности особенно удобен при переработке суспензий с тяжелыми осадками.

зий, содержащих тонкие частицы, имеющие тенденцию к образованию студенистых осадков, но теперь сгуститель с приподнятой фермой широко применяется там, где сгущаемая суспензия имеет высокую концентрацию твердой фазы.

Другим приемом снижения вредного влияния перегрузок на механизм аппарата является конструкция с

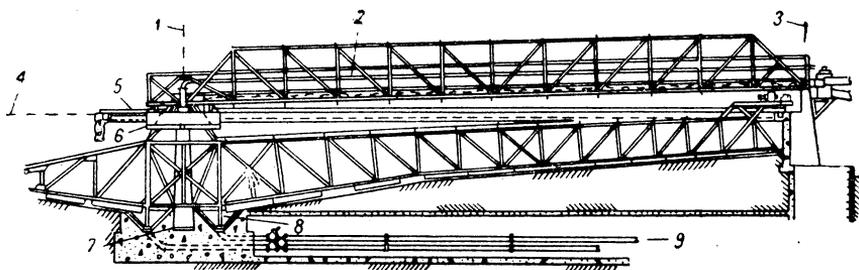


Рис. II-73. Сгуститель с тяговым приводом:

1 — ось механизма; 2 — трубопроводы; 3 — ось стойки лотковой фермы; 4 — уровень раствора; 5 — верх рельса; 6 — приемник питания; 7 — центральная колонна; 8 — центробежный скребок; 9 — трубы верхнего потока.

Некоторые особенности проектирования. Описанные типы одноярусных сгустителей позволяют предусмотреть ряд специфических особенностей. Они чаще всего касаются улучшения перемещения осадка, увеличения его плотности и уменьшения крутящего усилия меха-

автоматическим подъемом фермы с гребками (рис. II-75). Треугольная ферма прикреплена к центральной стойке на шарнире и может подниматься в случае перегрузки и возвращаться в нормальное положение, когда нагрузка снизится. Шарнирные фермы могут при-

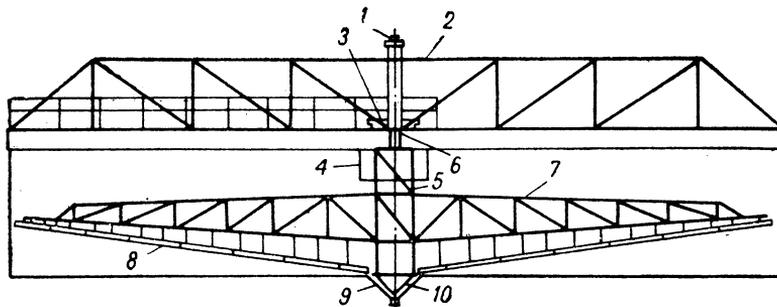


Рис. II-74. Сгуститель с приподнятой фермой:

1 — автоматический подъемник; 2 — несущая ферма; 3 — привод; 4 — питание; 5 — клетка; 6 — вал; 7 — лопасть; 8 — скребки; 9 — разгрузочный конус; 10 — конусный скребок.

низмов. Чаще всего встречающейся особенностью конструкции у всех типов сгустителей является более высокое расположение нижнего пояса фермы, несущей скребки с таким расчетом, чтобы он оказался выше уплотненной зоны осадка; тогда скребки прикрепляются к удлиненным вертикальным стойкам фермы. Избегая, таким образом, движения фермы в зоне с уплотненным осадком, уменьшают крутящее усилие. На рис. II-74 изображена такая конструкция. Здесь вертикальные стойки скреплены с приподнятой фермой и их нижние концы несут скребки, передвигающие по дну осадок. В зоне плотного осадка движется минимальное количество деталей конструкции. Налипание твердых комков на детали механизма сведено к минимуму, и осадок обычно получается более плотным. Эта конструкция первоначально служила для суспен-

меняться в сгустителях и с центральной приводом и с центральной колонной (обычно они применяются в последнем случае). Наиболее эффективной эта конструкция оказывается в установках с диаметром меньше 30 м, так как только при этих диаметрах можно обеспечить достаточный подъем в центре сгустителя без препятствий со стороны подвесной площадки для обслуживания желоба подачи. При диаметрах выше 30 м из обычных четырех ферм с гребками только короткие фермы делают шарнирными, а у длинных в центральной части сгустителя снимают гребки, снижая таким образом крутящее усилие в центральной зоне, где могут возникнуть перегрузки.

Другое автоматическое подъемное устройство применено в сгустителе с автоподъемником Гардинга, изображенным на рис. II-76. Автоматический механизм

состоит из двух ведущих концентрических труб, вращающих лопасти. Из них наружная находится выше уровня жидкости. В эту трубу входит другая труба, к которой прикреплены плечи гребков. Внутренняя труба соединена с наружной пальцами, закрепленными на первой трубе и входящими в две диаметрально расположенные наклонные щели во второй. Когда скребки



Рис. II-75. Сгуститель с автоматическим подъемом фермы.

Слева — положение лопасти при нормальной работе, справа — при перегрузке.

встречают сопротивление вращению, превышающее норму, пальцы начинают скользить в наклонных щелях и внутренняя труба приподнимается, телескопически выдвигаясь в наружную. Одновременно приподнимаются и гребки. Когда перегрузка уменьшится, скребки автоматически опускаются под действием собственного

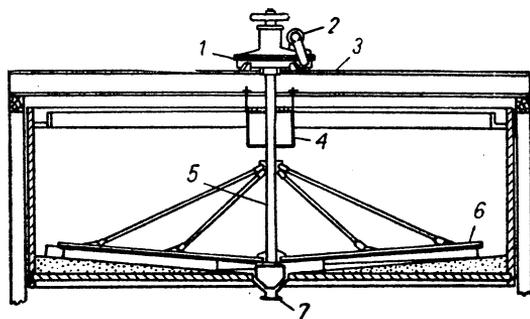


Рис. II-76. Сгуститель с автоматическим подъемом гребков:

1 — автоматический подъемник; 2 — электродвигатель; 3 — несущая балка; 4 — приемник питания; 5 — ведущий вал (труба); 6 — скребки; 7 — разгрузочный конус.

веса. Если же перегрузка продолжает увеличиваться, то скребки поднимутся на максимальную высоту и при этом замыкается контактный контакт, подающий звуковой сигнал и выключающий приводной электродвигатель.

Моторизованные подъемные устройства применяют для сгустителей с верхним креплением механизмов и с центральной колонной. Для сгустителей с верхним креплением механизмов пользуются в основном двумя устройствами. В одном случае вертикальный вал поднимается через зубчатое колесо привода с помощью подъемной червячной передачи, а в другом весь привод поднимается на платформе на высоту не более 0,9 м.

Многоярусные сгустители. Часто, в целях экономии производственной площади, устанавливают многоярусные сгустители, представляющие собой ряд одинаковых сгустителей, смонтированных один над другим. Существует три типа таких сгустителей: отстойный, промывной и комбинированный многоярусный.

Отстойный многоярусный сгуститель представляет собою цилиндрический резервуар, разделенный на ярусы стальными коническими перегородками, как показано на рис. II-77. Днище каждого яруса имеет наклон к центру резервуара, и сгущаемый осадок перемещается к центру под действием гребков мешалки.

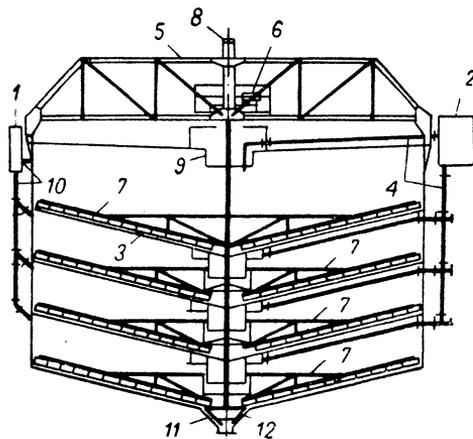
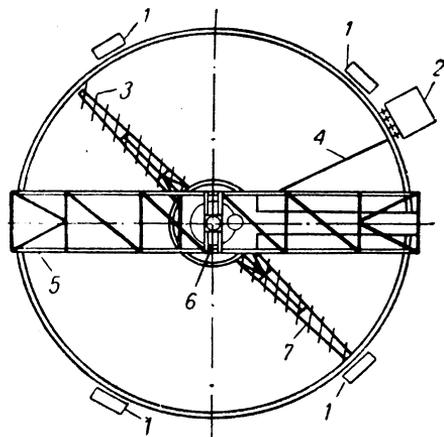


Рис. II-77. Многоярусный сгуститель:

1 — коллекторы осветленной жидкости; 2 — приемник питания; 3 — скребки; 4 — труба питания; 5 — несущая ферма; 6 — привод; 7 — лопасть; 8 — подъемное устройство; 9 — горловина питания; 10 — трубы верхнего потока; 11 — разгрузочный конус; 12 — конусный скребок.

Центральная спускная горловина направлена вниз в следующий ярус. Здесь она входит в стальной цилиндр, верхний край которого выше нижнего края горловины, чтобы обеспечить гидравлический затвор. Сгущаемая твердая фаза проходит вниз под действием силы тяжести через горловины и цилиндры до самого нижнего яруса, откуда удаляется. Каждый ярус поддерживается радиальными конструкциями, соединенными с днищем и стенкой резервуара. Питание сгустителя осуществляется через приемник, расположенный у верхнего края резервуара, откуда оно равномерно распределяется по всем ярусам. Ярусный приемник питания окружает горловину вышележащего яруса и приварен снизу к его днищу. Осветленная жидкость отводится

из верхнего яруса через перелив в стандартный приемник, а осветленная жидкость из каждого нижележащего яруса переливается через одно или несколько периферийных отверстий, расположенных под днищем вышележащего яруса. Трубы для осветленной жидкости подводятся к приемникам, расположенным у верхнего края резервуара. Каждая труба на вертикальном участке имеет резиновый рукав для регулирования от руки расхода потока и регулирования напора питания каждого яруса.

Промывной многоярусный сгуститель часто применяется для противоточной декантации. Он должен обеспечить сгущение и промывку с целью удаления из жидкости твердых частиц. Свежее питание поступает через обычный приемник. Верхним потоком (сливом) является концентрированный раствор. Во всех ярусах, за исключением нижнего, осевший осадок подребается к центральному затвору, где смешивается с промывной жидкостью. Разбавленный осадок стекает в следующий (нижележащий) ярус для сгущения. Свежая промывная жидкость подается в затвор нижнего яруса, а верхний поток с нижнего яруса течет в следующий вышележащий и т. д. Конструкция затвора должна быть надежной, так как затвор должен обеспечить тщательное смещение промывной жидкости с суспензией, а также и надежную изоляцию между ярусами, и тем не менее обеспечить равномерный поток суспензии по всей установке без закупоривания. При надлежащих условиях хороший затвор обеспечивает эффективность промывания до 95% от теоретической.

Комбинированный многоярусный сгуститель состоит из нескольких ярусов, работающих параллельно и последовательно, то есть как отстойные и как промывные. Возможно несколько комбинаций; самая распространенная — когда два верхних яруса работают как отстойные параллельно, а нижние ярусы — последовательно, как стадии промывки.

Вспомогательное оборудование. В непрерывных сгустителях осадок иногда разгружается под действием собственного веса через задвижку, но чаще он удаляется с помощью насоса, непосредственно присоединенного к разгрузочному конусу. При большой производительности обычно используются центробежными песковыми насосами. Однако в некоторых случаях рекомендуется пользоваться диафрагмовым насосом или струйным газовым эжектором с целью обеспечения высокой скорости удаления при максимальной густоте осадка. Диафрагмовые насосы пригодны для большинства сгустителей, так как их легко приспособить (путем регулирования хода) к изменяющимся скоростям потока; они относительно недороги и просты в работе. Диафрагмовые насосы имеют производительность до $2,25 \text{ м}^3/\text{мин}$.

Когда для подготовки суспензии перед сгущением требуется добавка флокулянтов, то они должны быть заранее заготовлены (в концентрированном виде). Органические полимеры заготавливаются с концентрацией 0,5—1,0% и хранятся в емкостях, достаточных для расхода в течение $1/2 \div 3$ смен. Перед употреблением их разбавляют до 0,025—0,1%. Разбавленный раствор флокулянта обычно подают в нескольких точках желоба или трубы перед приемником питания. Необходимо тщательное смешивание флокулянта с потоком суспензии, чтобы не допустить флокуляции только в отдельных местах. Однако слишком большая турбулентность при смешении после добавления химикатов может разрушить образовавшиеся хлопья. Установка должна быть спроектирована достаточно гибкой, чтобы

можно было добавлять оптимальное количество химикатов после пуска.

Выбор типа сгустителя. Выбор типа одноярусного сгустителя зависит прежде всего от стоимости установки и эксплуатационных расходов. Часто при выборе типа сгустителя мало обращают внимания на соответствие между размерами и типом сгустителя и его назначением, между тем как существуют пределы наиболее экономичных размеров для каждого типа. Например, если сгуститель должен быть снабжен крышкой для уменьшения потерь тепла, то сгуститель с верхней рамой будет наиболее экономичен при диаметре до 37,5 м (хотя диаметр 18 м является пределом для открытых установок). Сгустители с тяговым приводом часто наиболее экономичны при диаметре свыше 75 м, если плотность грунта допускает постройку стенок, несущих большую нагрузку.

Многоярусные сгустители предпочтительны в тех случаях, когда первостепенную важность представляют экономия места и сбережение тепла. Однако обычно пользуются одноярусными установками благодаря простоте их конструкции и легкости обслуживания. Лучший контроль за плотностью осадка, а также более прозрачную осветленную жидкость и более плотный осадок можно получить на одноярусной установке.

Конструкционные материалы. Для сооружения сгустителей пользуются самыми разнообразными материалами в зависимости от местных условий и цен. Стальные и деревянные резервуары наиболее общеприняты при малых размерах. Бетонные резервуары сооружаются обычно для сгустителей диаметром свыше 30 м. При больших диаметрах, когда осветленная жидкость не представляет ценности, часто используются бассейнами, вырытыми в грунте. Большая часть механизмов сгустителя делается из стали. Однако погруженные детали могут быть изготовлены из дерева, нержавеющей стали, стали с оксидированной поверхностью или покрытой резиной, а также из специальных сплавов, в зависимости от условий их работы.

Для определения размеров сгустителя лучше всего провести испытания на опытной установке, пользуясь ранее описанными методами. В табл. 11-7 приведены ориентировочные площади сгустителей для различных твердых осадков.

Экономика. При одном и том же диаметре стоимость сгустителей изменяется в широких пределах в зависимости от типа конструкции. Как правило, стоимость всей установки приблизительно в 3—4 раза больше стоимости механизма. В табл. 11-8 приводятся стоимости сгустителя диаметром до 30 м. Эти цифры даны лишь для ориентировки, они не включают стоимости специальных видоизменений конструкции.

Стоимость электроэнергии для непрерывных сгустителей незначительна. Например, для сгустителя диаметром 30 м с крутящим усилием $105 \cdot 10^3 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ ставят электродвигатель мощностью 11 квт. Небольшой расход электроэнергии объясняется очень малым числом оборотов мешалки. Обычно механизм проектируется на окружную скорость около $7,5 \text{ м/мин}$, что составляет только 0,04 об/мин для установки диаметром 60 м. Этой же небольшой скоростью объясняются и очень низкие ремонтные расходы. Расход рабочей силы также невелик, так как установка не требует постоянного наблюдения во время работы, когда уже отрегулированы питание и выгрузка осадка. Если требуются химикаты для флокуляции, то их стоимость оказывается значительно выше всех остальных эксплуатационных расходов.

ТАБЛИЦА II-7

Необходимая площадь сгустителя на тонну разных материалов

Материал	Содержание твердого вещества, %		Площадь установки, м ² /т·день
	питание	осадок	
Глинозем (процесс Байера):			
красный шлам, основное осажде- ние	3—4	10—25	1,8—2,7
красный шлам, про- мытый	6—8	15—20	0,9—1,4
красный шлам, ко- нечное сгущение тригидрат	6—8 2—8	20—35 30—50	0,9—1,4 1,1—2,7
Известковые шламы:			
из ацетиленового генератора	12—15	30—40	1,4—3,0
известково-содовый процесс	9—11	35—45	1,4—2,3
в бумажной про- мышленности	8—10	32—45	1,3—1,6
Гидроокись магнезия из рассола	8—10	25—50	5,4—9,0
Металлургические:			
медный концентрат	14—50	40—75	0,2—1,8
медные хвосты	10—30	45—65	0,4—0,9
свинцовый концен- трат	20—25	60—80	0,6—1,6
цинковый концен- трат	10—20	50—60	0,3—0,6
Никель:			
выщелоченный остаток	20	60	0,7
сульфидный кон- центрат	3—5	65	2,3
Поташ (шлам)	1—5	6—25	3,6—112,5
Уран:			
выщелоченная кислотой руда	10—30	20—65	0,2—0,9
выщелоченная щелочью руда	20	60	0,9
урановый осадок	1—2	10—25	4,5—112,5
Цемент (процесс Веста)	16—20	60—70	1,4—2,3
Цемент (печная пыль)	9—10	45—55	0,3—1,6
Цианидные шламы	16—33	40—55	0,5—1,2

ОСВЕТИТЕЛИ

Типы осветлителей. Непрерывные осветлители перерабатывают промышленные отходы, бытовые сточные воды и другие разбавленные суспензии. Они похожи на сгустители тем, что в них также происходит осаждение шлама в резервуарах или бассейнах с механическими мешалками. Однако количество твердого вещества и сгущенного шлама в осветлителях значительно меньше, чем в сгустителях, и механизмы у них не такие тяжелые. По этой причине стоимость осветлителя на 5—10% ниже, чем стоимость сгустителя с

теми же размерами резервуара, которые приведены в табл. II-8.

ТАБЛИЦА II-8

Приблизительная стоимость одноярусного сгустителя¹

Диаметр, м	Стоимость 1 м ² , долл.
3,0	555—666
9,0	166—222
15,0	133—155
22,5	100—122
30,0	89—111

¹ Стоимость полная, включая и установку: механизмы стальные, резервуар до 15 м стальной, от 15 до 30 м — бетонный.

Прямоугольные осветлители. Осветлители изготовляют прямоугольной и цилиндрической формы и различных размеров. Один из типов осветлителей прямоугольной формы изображен на рис. II-78. Скребокковое размешивающее устройство в прямоугольной установке может быть либо цепным, либо мостовым. В осветлителях с цепным механизмом шлам подгребается к одному концу резервуара с помощью скребков, укрепленных на бесконечных цепях. Цепи приводятся в движение электродвигателем, установленным снаружи резервуара. В мостовой системе скребки подвешены к мостовому крану, который передвигается по рельсам, уложенным по длине резервуара, меняя направление на обратное с помощью ограничительного переключателя. Оба типа прямоугольных осветлителей (и цепной и мостовой) могут быть снабжены приспособлением для снятия пены с поверхности. Прямоугольные осветлители строятся шириной от 1,8 до 21 м. Длина их обычно в 3—5 раз больше ширины.

Цилиндрические осветлители. Цилиндрические установки строятся диаметром от 2,4 до 97,5 м. Подобно одноярусным сгустителям они бывают трех типов: с верхним креплением движущихся частей, с центральной несущей колонной и бортовым тяговым приводом. Осветлитель с верхним креплением механизмов обычно имеет менее 13,5 м.

На рис. II-79 изображена одна из конструкций цилиндрического осветлителя. В установке этого типа с верхним креплением механизмов питание поступает через полый центральный вал. Эта установка называется системой с сифонным питанием. Суспензия, пройдя полый вал, поступает в центральный приемник питания через щели на верхнем участке полого вала. При сифонном питании скорость потока значительно снижается при входе в самый бассейн, сводя до минимума возмущения в зоне осаждения. Изображенная на рисунке установка снабжена устройством для снятия пены, которое состоит из пеноотделителя, стальной перегородки для пены и ящика для сбора пены. Пеноотделитель соединен с центральным валом (или вращающейся рамой в аппаратах с центральной колонной) и имеет регулируемый скребок с резиной. Этот скребок может быть установлен на различную глубину снятия пены. Хотя большинство цилиндрических осветлителей оборудовано кольцевым порогом, могут быть установлены также и радиальные пороги для уменьшения скорости на выходе.

В квадратном резервуаре также может быть установлен круговой механизм, как показано на рис. II-80. Этот механизм отличается от обычного тем, что

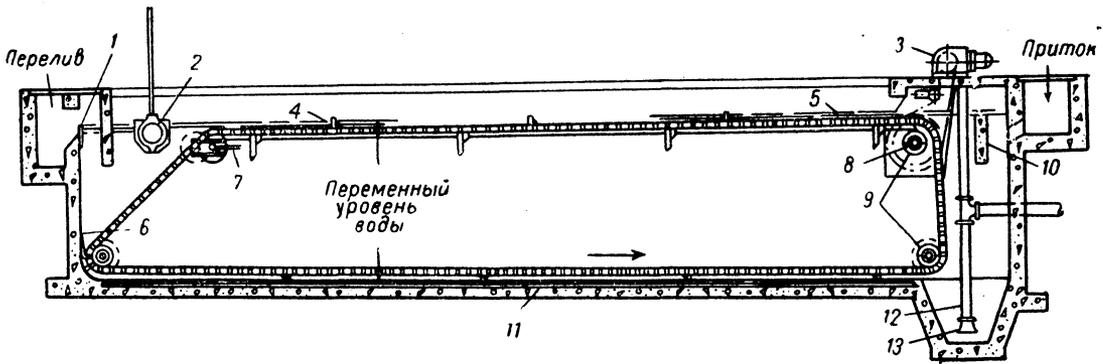


Рис. II-78. Прямоугольный осветлитель:

1 — подъемный порог; 2 — вращающийся сниматель пены; 3 — привод; 4 — жесткие скребки; 5 — уровень воды; 6 — поворачивающийся скребок; 7 — подвижная шестерня; 8 — ведущий вал; 9 — саморегулирующиеся подшипники; 10 — отбойная перегородка; 11 — тавровый рельс; 12 — труба для пилулы; 13 — воронка для пилулы.

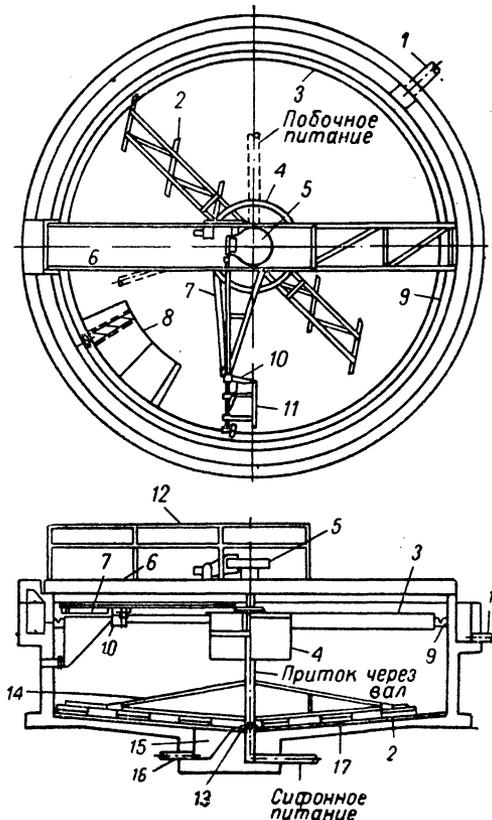


Рис. II-79. Цилиндрический осветлитель:

1 — сливная труба; 2 — скребки с резиной; 3 — отбойная перегородка; 4 — приемник питания; 5 — привод; 6 — проход; 7 — пеноотделитель; 8 — приемник пены; 9 — порог; 10 — подвешенный пеноотделитель; 11 — удаление пены; 12 — перила; 13 — подшипник; 14 — лопасть; 15 — сборник пилулы; 16 — труба для пилулы; 17 — слой цемента толщиной 5 см.

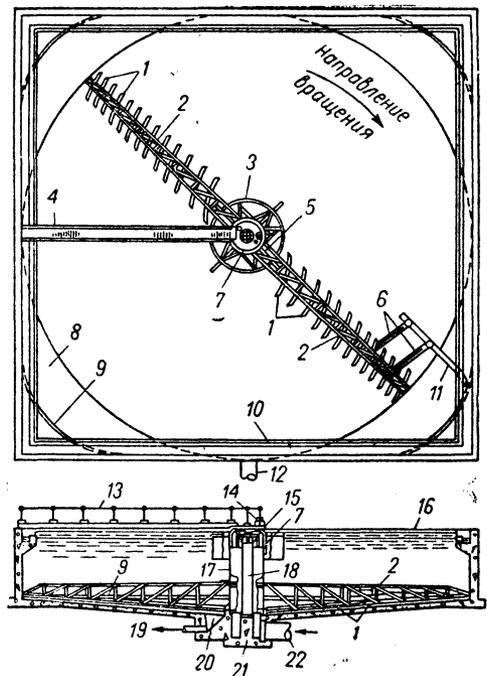


Рис. II-80. Круговой механизм в квадратном резервуаре:

1 — скребки; 2 — лопасть; 3 — приемник притока; 4 — проход; 5 — радиальные скребки; 6 — лопасти для угловых скребков; 7 — внутренняя шестерня; 8 — реальное наполнение; 9 — направляющая пластинка; 10 — порог для верхнего потока; 11 — угловой скребок; 12 — сливная труба; 13 — перила; 14 — привод; 15 — поворотное основание; 16 — верх резервуара; 17 — центральный барабан; 18 — центральная колонна; 19 — труба для пилулы; 20 — сборник пилулы; 21 — центральный усть; 22 — труба для притока.

оборудован подвешенными на шарнирах угловыми скребками, чтобы очищать углы резервуара, куда не достигаюг лопасти основного механизма. Питание такой установки может быть центральным с радиальным потоком или поперечным, когда питание поступает вдоль одной стенки, а слив выходит через противоположную.

поше перемешивание и полную флокуляцию. Другие флокуляционные камеры оборудованы турбинными мешалками.

Осветлители-реакторы особенно удобны для осветления мутных вод, где требуется и флокуляция и хлопьеобразование для удаления бактерий, взвешенной твер-

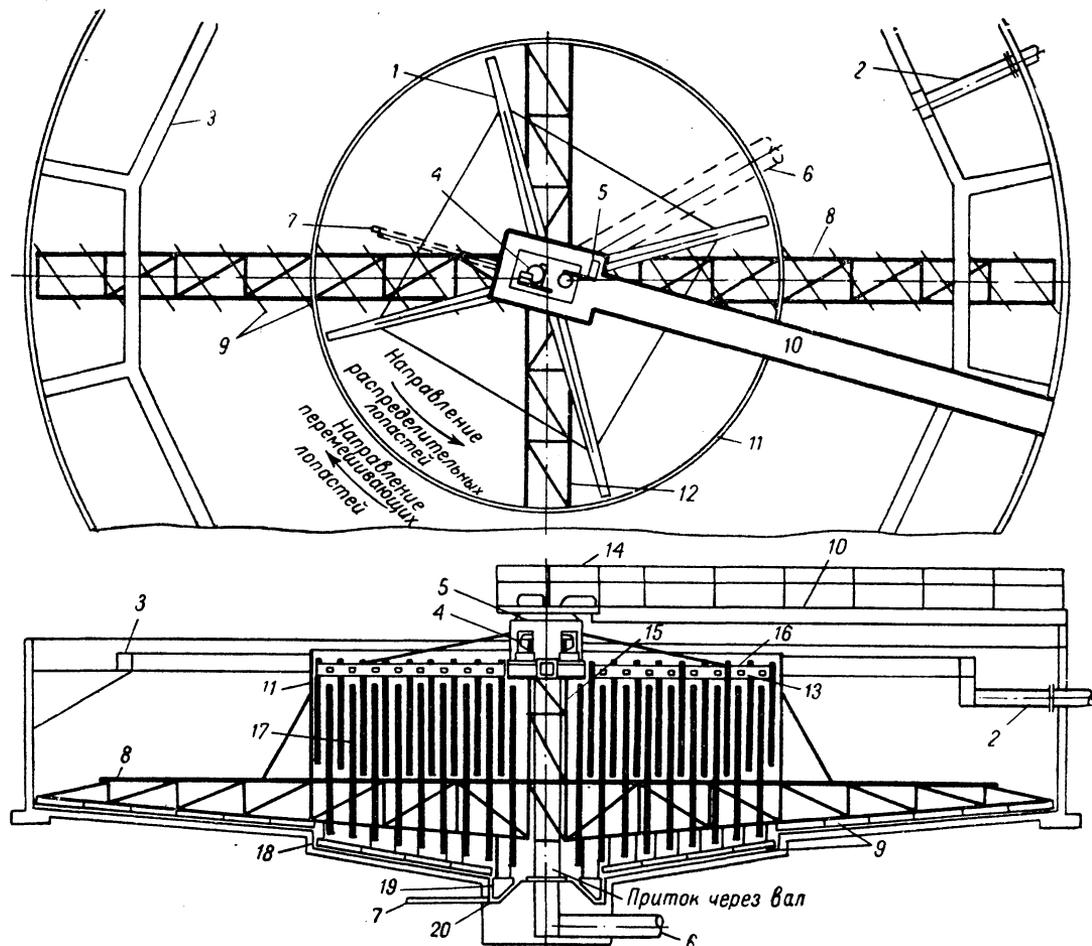


Рис. II-81. Осветлитель-реактор:

1 — распределяющая лопасть с хлопьеобразующими гребками; 2 — сливная труба; 3 — кольцевой и радиальный желоб; 4 — привод лопастей; 5 — привод хлопьеобразователя; 6 — труба питания; 7 — труба для пудры; 8 — лопасть; 9 — скребки; 10 — проход; 11 — реактор; 12 — несущая лопасть реактора; 13 — лопасть распределения питания; 14 — перила; 15 — клетка; 16 — отверстия для питания; 17 — хлопьеобразующие гребки; 18 — приемник сгущенной пудры; 19 — скребок желоба; 20 — круговой желоб пудры.

Осветлители-реакторы. Иногда необходимо провести в одном цилиндрическом резервуаре перемешивание, коагуляцию и осаждение. Как показано на рис. II-81, такие установки имеют большое центральное отделение, которое предусмотрено для флокуляции питания в течение необходимого промежутка времени, прежде чем суспензия перейдет в бассейн для осаждения. На рис. II-81 изображена установка с двумя рядами лопастей. Один ряд лопастей соединен с перемешивающим механизмом, который вращается очень медленно. Второй ряд расположен у желобов, распределяющих питание. Эти лопасти вращаются быстрее (с помощью отдельного привода). Такая система обеспечивает хо-

дой фазы или пигмента. Подобными установками пользуются для умягчения воды путем добавления извести. Центральное отделение предусматривается с целью обеспечения времени, необходимого для доведения реакции осаждения до конца. Подобными установками часто пользуются для осветления производственных, сточных и мутных вод, которые должны подвергнуться флокуляции, прежде чем будут направлены на осаждение, чтобы добиться желаемой степени удаления твердых веществ.

Определение размеров осветлителей. В то время как размеры сгустителей рассчитываются по осадку (M^2 площади на тонну за 24 ч), размеры осветлителей оп-

ределяются по скорости слива и продолжительности осаждения. В табл. II-9 приводятся расчетные данные для определения размеров осветлителей. Размеры установок для очистки промышленных сточных вод должны определяться только на основе лабораторных испытаний. При расчете осветлителей-реакторов площадь резервуара, занятая реакционной камерой, конечно, должна вычитаться из общей площади при определении диаметра аппарата. Размеры же самой реакционной камеры определяются по продолжительности осаждения — от $1/2$ до 1 ч, в зависимости от характера осадка.

ТАБЛИЦА II-9

Скорость слива и продолжительность осаждения в осветлителях

Операции	Скорость слива, л/мин·м ²	Продолжительность осаждения, ч
Первоначальная обработка сточных вод (удаление осаждающихся веществ)	16,8	2
Вторичная обработка сточных вод (окончательное осветление)	23,1—29,4	1,5—2
Осветление воды (после 30 мин осаждения хлопьев)	16,8—23,1	3
Известковое и известково-содовое умягчение воды (высокая скорость — поток вверх)	63	2
Промышленные сточные воды	Должны быть проведены лабораторные испытания	

НЕПРЕРЫВНАЯ ПРОТИВОТОЧНАЯ ДЕКАНТАЦИЯ

Определение. Часто пользуются сгустителями для регенерации растворимых веществ, удерживаемых жидкостью шлама, путем непрерывной противоточной декантации (НПД). Потоки жидкости и сгущенной твердой фазы идут противотоком через батарею сгустителей. Поток твердой фазы истощается, а поток жидкости обогащается растворимыми компонентами. В каждой стадии концентрированный шлам смешивается с раствором, содержащим меньше растворимых компонентов, чем жидкость в шламе, и эта смесь служит питанием для сгустителя. Твердая фаза осажается, удаляется и направляется на следующую стадию, а раствор, обогатившийся растворимыми компонентами, направляется на предыдущую стадию. Твердая фаза поступает в первый сгуститель, из которого выходит концентрированный раствор. Промывная вода (или очень бедный раствор) поступает в последний сгуститель, а окончательно промытое твердое вещество здесь выводится из установки. На рис. II-82 изображен цикл простой трехстадийной системы НПД. Питание F поступает в 1-й сгуститель, где смешивается с верхним потоком O_2 из 2-го сгустителя. Верхний поток концентрированного раствора O_1 выходит из 1-го сгустителя. Осадок из 1-го сгустителя U_1 смешивается с верхним потоком из 3-го сгустителя O_3 и служит питанием для 2-го сгустителя. Подобным образом осадок из 2-го сгустителя

U_2 смешивается с промывной водой и служит питанием для 3-го сгустителя. Промытый твердый осадок удаляется из 3-го сгустителя в виде конечного осадка U_3 .

Применение и преимущества НПД. Как уже было указано, НПД пользуются для отделения растворимых веществ от инертных или нерастворимых твердых веществ. Этой же цели служат и следующие методы:

- 1) непрерывное фильтрование с промывкой осадка;
- 2) периодическое фильтрование с промывкой под давлением;
- 3) ионообменные или адсорбционные методы, в которых адсорбент взвешен в суспензии и отделяется от нее механически;
- 4) периодическое смешивание, отстаивание и декантация.

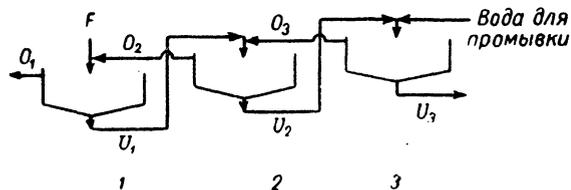


Рис. II-82. Схема непрерывной противоточной декантации:

1, 2, 3 — сгустители.

Последний метод применяется редко, только при малых масштабах, из-за высокой стоимости рабочей силы и ненадежности результатов.

Непрерывная противоточная декантация имеет следующие преимущества перед другими методами:

- 1) самая низкая потребность в рабочей силе;
- 2) самый низкий расход электроэнергии;
- 3) наименьшие нарушения режима при изменении свойств твердой фазы;
- 4) наименьшие эксплуатационные расходы, если твердое вещество не обладает абразивными свойствами и не склонно к комкованию и образованию корок.

Агрессивные смеси и растворы, имеющие тенденцию к образованию комков, создают затруднения при эксплуатации сгустителей.

Недостатки, ограничивающие применение НПД по сравнению с другими методами:

- 1) большой расход промывной воды;
- 2) сравнительно большой расход химикатов;
- 3) необходимая площадь обычно больше;
- 4) образование комков и осаждение твердой фазы на стенках создают затруднения в работе и увеличивают расходы.

При выборе промывной системы следует принять во внимание следующие соображения. Одно из них касается относительной характеристики процессов фильтрования и осаждения. Часто материал осажается хорошо, а фильтруется и промывается с неэкономичными, малыми скоростями. Обратное положение случается редко, за исключением тех случаев, когда разница плотностей раствора и твердого вещества весьма мала. Когда и осаждение и фильтрование затруднены, ионообменный или адсорбционный методы разделения оказываются более экономичными.

Другим фактором, влияющим на выбор метода разделения системы, является количество материалов, участвующих в процессе. С увеличением производительности стоимость установки на тонну переработанного материала уменьшается. Это возможно потому,

что в отдельных батареях больших сгустителей, вероятно, можно обработать весь тоннаж. С другой стороны, потребовалось бы большое число работающих параллельно фильтров для выполнения той же работы из-за их относительно низкой производительности. Отсюда — капиталовложения на фильтровальное оборудование будут пропорциональны обрабатываемому тоннажу с небольшим уменьшением стоимости единицы для больших предприятий.

Переменные, влияющие на возврат. Две основные переменные контролируют растворимый возврат в процессе непрерывной противоточной декантации (НПД): отношение объема слива к объему жидкости в нижнем потоке и число ступеней. На практике на отношение объема слива к объему жидкости в нижнем потоке влияют условия осаждения (свойства твердого вещества, температура, образование хлопьев и действительная скорость осаждения), которые могут изменить концентрацию твердого в нижнем потоке и, таким образом, изменить степень промывки.

На число ступеней, когда оно определено, может оказать влияние понижение эффективности смешения между ступенями. Намеченный возврат в системе НПД обычно основывают на полном смешении слива и нижнего потока. В большинстве случаев это допущение справедливо. Однако снижение производительности является результатом недостаточного времени или недостаточной турбулентности в смесителе и большой аморфности осадка, хлопья которого не разрушаются и не освобождают захваченную жидкость.

Проектирование. При проектировании цикла непрерывной противоточной декантации следует учитывать ряд приведенных ниже факторов.

1. Достаточно полное смешение слива и нижнего потока. Смешение будет удовлетворительным, если комбинированный поток течет турбулентно на расстоянии, равном радиусу сгустителя. Если используется желоб, то должна быть предусмотрена отбойная перегородка. Когда образуются большие устойчивые хлопья или когда вязкость и плотность нижнего потока замедляют смешение потоков, может потребоваться механическое перемешивание. Если невозможно получить достаточно полное смешение, то при проектировании следует исходить из более низкой производительности, определяемой по данным подобных систем, а также следует включить большее число ступеней, если это необходимо.

2. Размеры сгустителя могут быть предельными, необходимы достаточная площадь и высота, обеспечивающие максимальную плотность нижнего потока при различных рабочих условиях.

3. Питание системы должно быть однообразным по скорости потока, размеру частиц, степени разбавления и концентрации растворенного вещества.

4. Иногда следует включать устройства для рециркуляции нижнего и верхнего потоков или для обхода сгустителя. Для этого потребуются соответствующие насосы с трубопроводами для слива и нижнего потока.

Самым простым расположением аппаратов в цикле непрерывной противоточной декантации является постепенное повышение сгустителей от первого к последнему. При этом необходимо перекачивать только нижний поток, слив же передвигается под действием силы тяжести. Поскольку перекачивание нижнего потока весьма затруднительно, предпочтительно, особенно для больших сгустителей, пользоваться спускным переливанием от первого до последнего аппарата, чтобы уменьшить напор каждого насоса нижнего потока.

В таком случае совершенно необходимы насосы для верхнего потока.

5. Если требуется флокуляция, то реагент обычно добавляется во все аппараты, чтобы создать одинаковые условия осаждения. От половины до трех четвертей всего флокулянта задается в первый сгуститель, остаток распределяется равномерно между остальными.

Стоимость системы непрерывной противоточной декантации складывается из стоимости сгустителей с установкой плюс добавка 10—25% на трубопроводы.

Варианты технологической схемы. В дополнение к технологической схеме, изображенной на рис. II-82, применяется целый ряд других схем движения верхнего потока. На рис. II-83 дан пример цикла, в котором слив

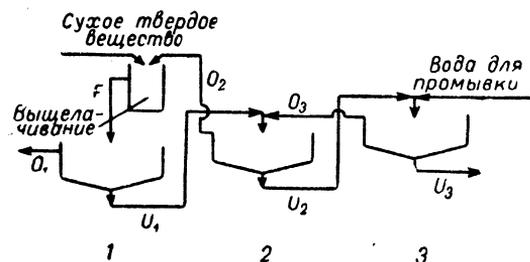


Рис. II-83. Цикл непрерывной противоточной декантации и выщелачивания с добавлением промывной воды в последний сгуститель:

1, 2, 3 — сгустители.

из сгустителя II ступени смешивается с сухим питанием в качестве выщелачивающего растворителя. Этот метод пригоден, если объем конечного раствора верхнего потока является предельным. Возврат растворимых веществ здесь больше, чем в стандартном цикле, при одинаковых объемах концентрированных потоков. Применение верхнего потока II ступени в качестве выщелачивающей жидкости может быть ограничено, если потребуются специальные конструкционные материалы для последующих ступеней или когда степень насыщения верхнего потока оказывает влияние на процесс выщелачивания.

В некоторых случаях применяют выщелачивание между отдельными или всеми ступенями сгустителей. Обычно в этом возникает необходимость, когда количество растворенного в потоке вещества контролируется химическим равновесием. Этим пользуются также в случаях, когда надо избежать избытка выщелачивающего реагента в конечном верхнем потоке. В этом случае производится только частичное выщелачивание до сгустителя I ступени путем поддержания постоянного недостатка реагента. Остальной же реагент (до условий равновесия) добавляется для промежуточного выщелачивания между I и II ступенями.

Третий вариант, изображенный на рис. II-84, представляет собою ряд сгустителей с фильтром непрерывного действия в качестве последней ступени. Эта система оправдывается в тех случаях, когда желательно получить более высокое содержание твердого вещества в конечном продукте, чем допускается в сгущенном шламе. Такое положение может иметь место, когда дальнейшая обработка продукта (например, сушка) требует низкого содержания влаги или когда необходимо более полный возврат растворимого вещества.

К существующим циклам НПД часто добавляется фильтр с промывкой, чтобы улучшить систему возврата путем понижения отношения Ж:Т в конечном продукте.

Оборудование. Для непрерывной противоточной декантации пользуются либо одиночными сгустителями, либо промывными многоярусными сгустителями. Одиночный сгуститель легче в эксплуатации и дает более высокую степень промывки при том же числе ступеней и том же объеме промывной воды, что и многоярусный. Многоярусные сгустители устанавливают в тех случаях, когда нужно уменьшить потери тепла или занимаемую производственную площадь.

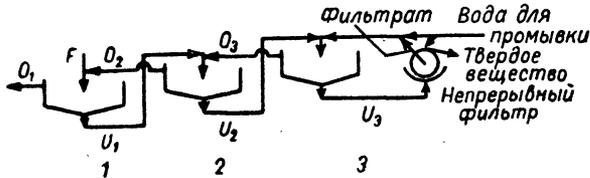


Рис. II-84. Цикл непрерывной противоточной декантации с фильтрованием конечного нижнего потока: 1, 2, 3 — сгустители.

Для перекачивания нижнего потока чаще всего пользуются диафрагмовыми насосами, потому что благодаря их мягкому действию не нарушается строение хлопьев, а также возможно точное регулирование скорости перекачивания. Недостатки диафрагмового насоса — низкий разгрузочный напор и пульсирующее действие, ухудшающее работу всасывающей линии. На больших установках часто предпочитают для транспортирования шлама центробежные насосы. Рекомендуют ставить при больших сгустителях запасный насос для нижнего потока, чтобы охранить от потерь стадию промывки и на случай порчи или остановки основного насоса.

Методы расчета непрерывной противоточной декантации. Расчет НПД основан на составлении уравнений материального баланса и довольно прост. Чаще всего

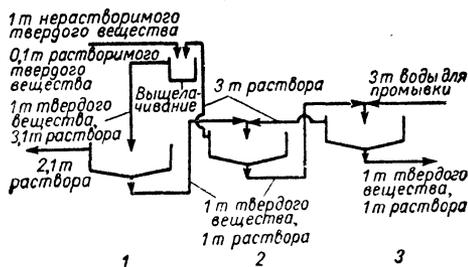


Рис. II-85. Схема к расчету режима системы непрерывной противоточной декантации: 1, 2, 3 — сгустители.

пользуются системой уравнений, составленных на основе баланса растворенного вещества, поступающего и уходящего из сгустителя. На рис. II-85 приведена схема упрощенного примера для стандартной системы. Условия:

1. Питание, поступающее в систему, содержит всего 1,1 т твердого вещества, из них 0,1 т (100 кг) — растворимого,

2. Нижний поток содержит 50% нерастворимого твердого вещества во всех ступенях.

3. Для промывки добавляется 3 кг воды на 1 кг нерастворимого твердого вещества.

Пусть x , y и z равны числу килограммов растворенного вещества на 1 т раствора в 1, 2 и 3-м сгустителях соответственно. Система уравнений, составленных на основе баланса количеств поступающего в сгустители и выходящего из них твердого вещества:

	Вход	Выход
Сгуститель № 1	$3y + 100 = 2,1x + 1x$	
Сгуститель № 2	$1x + 3z = 3y + 1y$	
Сгуститель № 3	$1y = 3z + 1z$	

Отсюда количество растворенного вещества: $x = 45,942$ кг/т; $y = 14,136$ кг/т; $z = 3,534$ кг/т.

$$\text{Возврат} = \frac{2,1 \cdot 45,942}{100} \cdot 100 = 96,5\%$$

Другой, более легкий метод предложен Каунсельманом¹. Этот метод использует неизвестную потерю растворенного вещества в конечном нижнем потоке (на единицу массы нерастворимого твердого вещества или другое подходящее основание). Материальный баланс составляется для каждого сгустителя на основе этой потери, начиная с последнего сгустителя и кончая первым. В примере, представленном на рис. II-85, количество растворенного вещества в нижнем потоке 3-го сгустителя составляет X кг на 1 т нерастворимого твердого вещества. Поскольку общее количество раствора в 3-м сгустителе составляет 4 т, то содержание в нем растворимых веществ будет $4X$. Это количество растворимых веществ перешло сюда из нижнего потока 2-го сгустителя. Так как отношение питания к раствору нижнего потока во II ступени будет такое же, как и в III, то количество растворимых веществ, поступающих во II ступень, будет равно $16X$. Из этого количества $3X$ поступает с верхним потоком из III ступени, следовательно, с раствором нижнего потока из I ступени поступает $16X - 3X = 13X$. Конечного верхнего потока из I ступени выходит 2,1 т с содержанием растворимого $2,1 \cdot 13X = 27,3X$. В I ступень поступает с верхним потоком из II ступени 12X растворимого, а уходит с нижним потоком $13X$ и с верхним $27,3X$. Таким образом, добавляемое с питанием растворимое вещество в количестве 0,1 т (или 100 кг) составит $27,3X + 13X - 12X = 28,3X$. Возврат, следовательно, составляет $27,3 \cdot 100 / 28,3 = 96,5\%$. Концентрация в конечном растворе составляет $(27,3X / 28,3X) (100 / 2,1)$ или 45,95 кг/т.

Достоинствами этого метода являются его быстрота, уменьшение возможностей математических ошибок и легкость применения его к сложным циклам с изменяющейся концентрацией нижних потоков, плотностью растворов или с поступлением в систему или выходом из нее других потоков.

Если применен цикл, изображенный на рис. II-85 и если промывная вода поступает только в последнюю ступень, то возврат можно предварительно определить по формуле:

$$R = 1 - \left(\frac{D}{F - D} \right)^n \quad (\text{II-21})$$

где R — доля возвращаемого растворимого вещества; D — степень разбавления нижнего потока, кг раствора/кг

¹ Counselman, Trans, Am. Inst. Mining Engrs, 187, 223 (1950).

нерастворимого твердого вещества; F — степень разбавления питания во всех ступенях, за исключением I, кг раствора/кг нерастворимого твердого вещества; n — число ступеней.

В приведенном примере:

$$R = 1 - \left(\frac{1}{4-1} \right)^3 \quad \text{или} \quad 0,963$$

Отклонение этой величины от истинного значения (96,5%) объясняется растворимостью веществ и поступлением их в I ступень, что создает такой же эффект, какой дало бы добавление промывной воды в I

ступень. Очевидно, с увеличением пропорции растворимых веществ в питании этот метод будет становиться все менее точным.

Графические методы расчета непрерывной противоточной декантации проще. Они представляют ценность при сравнении технологических схем НПД для проектирования ступеней. Для практических целей графические методы мало точны и применяются только для приближенных расчетов из-за изменений концентрации твердого вещества в нижнем потоке, колебаний плотности растворов и разбавления питания в каждом сгустителе.

ФИЛЬТРОВАНИЕ

Фильтрованием обычно называется процесс отделения нерастворимых взвешенных твердых частиц от жидкости пропусканьем большей части жидкости через пористую фильтровальную перегородку, которая задерживает твердые частицы на своей поверхности или в порах. Разделяемую смесь называют исходной суспензией, а прошедшую через перегородку жидкость — фильтратом. Выделяемые твердые частицы, накапливающиеся на фильтровальной перегородке, образуют осадок. Фильтрование суспензий осуществляется при помощи специальных аппаратов, называемых фильтрами.

Фильтрование может использоваться также для разделения аэрозолей на чистый газ и сухой осадок или на чистый газ и жидкость. Однако на практике разделение аэрозолей рассматривается как отдельный процесс.

Фильтрование необходимо отличать от других сходных с ним процессов разделения, например, прессования, сгущения, мокрого грохочения.

Процессы фильтрования и фильтры могут быть классифицированы по нескольким признакам.

1. По движущей силе процесса. Жидкая фаза суспензии проходит через фильтровальную перегородку под действием разности давлений, создаваемой различными способами (фильтрование под действием центробежной силы обычно сопровождается центробежным осаждением и рассматривается на стр. 209).

2. По механизму фильтрования. Теория приводит к двум моделям процесса фильтрования: а) твердые частицы задерживаются на поверхности фильтровальной перегородки, постепенно образуя осадок возрастающей толщины (фильтрование с образованием осадка); б) твердые частицы задерживаются в порах фильтровальной перегородки, не образуя заметного осадка на ней (фильтрование с закупориванием пор).

3. По назначению процесса. Разделение суспензий можно проводить для получения сухого твердого вещества (ценным продуктом является осадок, т. е. твердая фаза) или осветленной жидкости (ценным продуктом является фильтрат, т. е. жидкая фаза), а также для одновременного получения твердой и жидкой фаз. В первом случае фильтрование всегда сопровождается образованием осадка, осветление же жидкости может быть достигнуто как фильтрованием с закупориванием пор, так и фильтрованием с образованием осадка.

4. По свойствам осадка. Накапливающийся на фильтре осадок может быть как сжимаемым, так и почти несжимаемым. В порах перегородки задерживаются деформируемые твердые частицы. Размер твердых частиц или их агломератов может быть того же порядка, что и минимальная величина пор большин-

ства фильтровальных перегородок (1—10 мкм и более), или меньше (от 1 мкм до размеров бактерий). В большинстве процессов фильтрования происходит отделение твердых частиц размером более 1—10 мкм; твердые частицы размером менее 1 мкм можно отделить только фильтрованием с закупориванием пор или ультрафильтрованием.

5. По способу осуществления процесса. Фильтры бывают периодического и непрерывного действия. Первые могут работать как при постоянных, так и при переменных разности давлений и скорости процесса в течение одного цикла.

В первую очередь фильтры обычно делят на две группы — для фильтрования с образованием осадка и с закупориванием пор, затем — на группы аппаратов, использующих различную движущую силу процесса, и, наконец, на аппараты периодического и непрерывного действия. Эта классификация используется при описании фильтров в данном разделе.

ТЕОРИЯ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Теория фильтрования пока еще редко используется для практических расчетов фильтровального оборудования, но она необходима при объяснении результатов лабораторных опытов, нахождении оптимальных условий фильтрования и определении влияния изменений действующих факторов на процесс.

Область применения теории фильтрования ограничена ввиду зависимости процесса от характера и свойств суспензии. Поэтому результаты, полученные для какой-либо одной суспензии, не всегда могут быть использованы для другой.

Фильтрование обычно приводит к образованию осадка на поверхности фильтровальной перегородки. В результате жидкая фаза проходит через постепенно увеличивающийся слой осадка, состоящего из твердых беспорядочно лежащих частиц неправильной формы, а затем через поры перегородки. Это движение всегда носит ламинарный характер и может быть описано уравнением¹:

$$\frac{dV}{F d\tau} = \frac{P}{\mu [\alpha (W/F) + r]} \quad (II-22)$$

В приведенном уравнении мгновенная скорость фильтрования определяется как отношение движущей силы процесса P к произведению вязкости фильтрата μ и суммы сопротивлений осадка и фильтровальной перегородки.

¹ Carman, Trans. Inst. Chem. Engrs (London), 16, 174 (1938). — McCabe, Smith, Unit Operations of Chemical Engineering, New York, 1956.

Скорость фильтрования обычно может быть выражена объемом фильтрата V , приходящимся на единицу поверхности фильтрования F в единицу времени t . Величина P представляет собой общее падение давления в фильтровальной перегородке и находящемся на ней слое осадка. Массу сухого осадка W можно выразить через ее эквиваленты:

$$W = \omega V = \frac{\rho c}{1 - mc} V$$

где ω — масса сухого осадка в единице объема фильтрата; ρ — плотность фильтрата; c — массовая доля частиц в суспензии, не содержащей растворенной твердой фазы; m — отношение масс влажного и сухого осадка.

Величина α — среднее удельное сопротивление осадка, отнесенное к единице массы сухого осадка. В рабочих условиях проведения процесса

$$\alpha = \alpha' P^s \quad (\text{II-23})$$

Здесь α' — постоянная, зависящая в значительной степени от размера частиц, образующих осадок; s — коэффициент сжимаемости осадка, изменяющийся от 0 для совершенно несжимаемых осадков до 1,0 для сильно сжимаемых. Для большинства промышленных осадков значение s колеблется в пределах 0,1—0,8.

Величина r в уравнении (II-22) обозначает сопротивление единицы поверхности фильтровальной перегородки.

Проинтегрировав уравнение (II-22), получим для фильтрования при постоянном давлении:

$$\frac{\tau}{V/F} = \frac{\mu\alpha}{2P} \cdot \frac{W}{F} + \frac{\mu r}{P} \quad (\text{II-24})$$

или

$$\frac{\tau}{V/F} = \frac{\mu\alpha\omega}{2P} \cdot \frac{V}{F} + \frac{\mu r}{P} \quad (\text{II-25})$$

Для конкретного случая фильтрования при постоянном давлении эти уравнения могут быть упрощены:

$$\frac{\tau}{V/F} = K_p \frac{W}{F} + C = K'_p \frac{V}{F} + C \quad (\text{II-26})$$

где K_p , K'_p , C — постоянные для данных условий проведения процесса.

Для фильтрования при постоянной скорости получим после интегрирования уравнения (II-22)¹:

$$\frac{\tau}{V/F} = \frac{1}{\text{расход на единицу поверхности}} = \frac{\mu\alpha}{P - P_1} \cdot \frac{W}{F} \quad (\text{II-27})$$

где P_1 — падение давления при прохождении жидкой фазы через фильтровальную перегородку, равно $P_1 = \mu r (V/F\tau)$.

Уравнение (II-27) может быть записано также следующим образом:

$$\frac{\tau}{V/F} = \frac{1}{\text{расход на единицу поверхности}} = \frac{\mu\alpha\omega}{P - P_1} \cdot \frac{V}{F} \quad (\text{II-28})$$

Для конкретного случая фильтрования при постоянной скорости уравнения (II-27) и (II-28) можно представить в виде:

$$\frac{V}{F\tau} = \text{расход на единицу поверхности} = \frac{P}{K_r} + C' \quad (\text{II-29})$$

где K_r , C' — постоянные для данных условий проведения процесса.

Для суспензий, содержащих тонкодисперсные твердые частицы в небольших концентрациях и разделяемых с помощью рыхлых сред (гигроскопическая вата, войлок и т. п.), приведенные выше уравнения, включающие сопротивления осадка, неприменимы, так как осадок в данном случае не образуется.

Для таких случаев Германс и Бредс¹ получили уравнения, применив их, в частности, к фильтрованию вискозы и сахарных растворов при постоянном давлении. Соответствующие уравнения для фильтрования при постоянной скорости даны Грейсом².

Практическое значение уравнений фильтрования

Если осадок состоит из твердых гранулированных частиц, то увеличение давления в процессе фильтрования не вызывает деформации частиц или промежутков между ними, поэтому $s=0$. Следовательно, пренебрегая сопротивлением фильтровальной перегородки, уравнение (II-22) можно записать следующим образом:

$$\frac{dV}{F d\tau} = \frac{FP}{\mu\alpha'W} \quad \text{или} \quad \frac{dV}{d\tau} = \frac{FP}{\mu\alpha'(W/F)} \quad (\text{II-30})$$

Отсюда видно, что для несжимаемых осадков мгновенная скорость фильтрования прямо пропорциональна поверхности фильтрования и общему падению давления в фильтровальной перегородке и слое осадка и обратно пропорциональна вязкости фильтрата, общему количеству осадка (или фильтрата) и величине α' .

Если же осадок состоит из очень мягких, легко деформируемых частиц (например, гидроокиси железа), то s приближается к 1,0. В этом случае, пренебрегая сопротивлением фильтровальной перегородки, уравнение (II-22) можно записать в виде:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{F}{\mu\alpha'(W/F)} \quad (\text{II-31})$$

т. е. для сильно сжимаемых осадков мгновенная скорость фильтрования не зависит от давления.

Влияние давления на процесс фильтрования проявляется в различной степени. Для большинства промышленных осадков $s=0,1 \div 0,8$. Установлено, что при отделении гранулированных или кристаллических частиц от жидкой фазы суспензии повышение давления вызывает почти пропорциональное возрастание скорости фильтрования. При отделении хлопьевидных или листовых осадков скорость фильтрования в результате увеличения давления возрастает незначительно. Для некоторых осадков существует критическое давление, превышение которого вызывает понижение скорости фильтрования.

¹ Hermans, Bredes, J. Soc. Chem. Ind., 55Т, 1—4 (1936).

² Grace, Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 323 (1956).

Для некоторых суспензий (например, слизистых материалов, к которым добавлено вспомогательное фильтровальное вещество) фильтрование при постоянной скорости выгоднее, чем при постоянном давлении, так как в последнем случае в начале процесса получается недостаточно чистый фильтрат и сопротивление слоя осадка быстро возрастает.

Фильтрование любых суспензий, за исключением образующих несжимаемые осадки, протекает гораздо лучше, если в начале процесса применяют небольшие давления. Это особенно важно при небольшом содержании твердой фазы.

На большинство фильтров, работающих под давлением, суспензия подается центробежным насосом, вследствие чего фильтры редко работают только при постоянном давлении или при постоянной скорости процесса. В соответствии с рабочей характеристикой насоса процесс фильтрования обычно протекает при постоянной скорости в начальной стадии, а в дальнейшем — при постоянном давлении. Насосы с крутой характеристикой напор — производительности в течение любой части цикла не поддерживают постоянную скорость или постоянное давление. Фильтрование в этом случае протекает при возрастающем давлении и уменьшающейся скорости. Метод анализа такого цикла можно найти в литературе¹.

Важным фактором, определяющим производительность и конструкцию фильтра, является толщина слоя осадка. Когда сопротивлением фильтровальной перегородки можно пренебречь, средняя скорость фильтрования обратно пропорциональна количеству отложившегося осадка.

Максимальная производительность фильтра (или максимальная скорость фильтрования) достигается при толщине слоя осадка, приближающейся к нулю. Однако учитывая трудность съема тонкого слоя осадка и затраты времени на чистку фильтра, процесс необходимо вести так, чтобы получить слой осадка оптимальной толщины. Производительность фильтра часто выражается количеством сухого твердого вещества, получаемого с единицы поверхности фильтрования.

Если сопротивление осадка невелико по сравнению с сопротивлением фильтровальной перегородки, то оптимальная толщина слоя осадка при фильтровании возрастает.

При промывке на фильтре необходима определенная толщина осадка, чтобы получить максимальное выщелачивание осадка данным количеством промывной воды (или другой жидкости). Наоборот, при данной толщине осадка и максимальном выщелачивании отношении количества промывной воды к количеству твердого вещества в осадке будет минимальным. Необходимо отметить, что во многих случаях влияние толщины слоя осадка не отражается на качестве промывки. Желателен минимальный объем промывной воды, так как чрезмерные ее количества могут привести к нарушению производственного процесса.

Влияние вязкости фильтрата на процесс фильтрования, как это следует из приведенных выше уравнений, выражается в том, что скорость фильтрования в любой момент времени обратно пропорциональна μ . Вязкость некоторых фильтратов (например, масел, или концентрированных растворов) можно уменьшить, разбавляя исходную суспензию растворителями с небольшой вязкостью; это, несмотря на возрастание объема фильтрата, приводит иногда к повышению производи-

тельности фильтра за счет увеличения скорости фильтрования¹.

Влияние температуры на процесс фильтрования с образованием несжимаемых осадков проявляется преимущественно посредством ее влияния на вязкость фильтрата. Вязкость большинства жидкостей заметно понижается с увеличением температуры. Поэтому повышение температуры дает возможность вести процесс при более высоких скоростях. Например, если фильтратом является вода, то повышение температуры от 20 до 60°С увеличивает скорость фильтрования вдвое. Более сложно влияние температуры на процесс фильтрования с образованием сжимаемых осадков, но в большинстве случаев скорость фильтрования повышается с увеличением температуры.

Даже небольшие изменения размеров частиц влияют на величину α' в уравнении (II-23), а более значительные — на коэффициент сжимаемости z . Уменьшение размера частиц приводит к понижению скорости фильтрования и увеличению содержания влаги в осадке, но иногда способствует улучшению качества промывки. Поэтому важно обеспечить строгий контроль за размером частиц в исходной суспензии. С одной стороны, следует избегать уменьшения размера частиц в результате перемешивания и транспортирования их насосом, с другой, надлежит предварительно обрабатывать суспензию (термически или химически) с целью флокуляции тонкодисперсных частиц и образования более крупных агломератов, дающих осадок с меньшим сопротивлением. Иногда таким образом можно перевести неразделяемую суспензию в разделяемую (например, шлам сточных вод коагулируется квасцами или хлористым железом)².

Переплетение нитей фильтровальной ткани должно быть настолько редким, насколько это возможно для уменьшения быстрого закупоривания, и настолько плотным, насколько это необходимо для предотвращения прохождения через ткань тонкодисперсных твердых частиц (после образования на ткани осадка такие частицы обычно удерживаются в нем).

Наибольшей способностью задерживать тонкодисперсные твердые частицы обладают номерные технические ткани³, затем эта способность понижается в ряду: сложные саржи (сатинового переплетения) — саржи — рукавные ткани. Способность к закупориванию повышается в обратном порядке. Толстые жесткие ткани склонны к закупориванию в большей степени, чем тонкие гибкие. Влияние закупоривания на скорость фильтрования настолько значительно, что в конечном счете приходится заменять ткань. Закупоривание пор определяет срок службы ткани до промывки и вынуждает вводить при определении производительности фильтра коэффициент запаса, учитывающий время, нужное на промывку.

Влияние концентрации твердых частиц на скорость фильтрования выражено уравнениями (II-25) и (II-28), где через w обозначена масса образующих осадок твердых частиц, отнесенная к единице объема фильтрата. Из этих уравнений следует, что, если пренебречь сопротивлением фильтровальной перегородки, скорость фильтрования обратно пропорциональна отношению количества твердых частиц к количеству фильтрата, а скорость накопления осадка прямо пропорциональна этому отношению. Если суспензия перед фильтрова-

¹ Reeves, Ind. Eng. Chem., 39, 203 (1947); Petroleum Processing, 4, 885 (1949). — Göttinger, Erdöl u. Kohle, 7, 287 (1954).

² Furrhmeister, Chem. Eng. Progr., 47, 550 (1951).

³ Ткани со стандартным номером артикула. — Прим. ред.

¹ Tiller, Am. Inst. Chem. Engrs J., 4, 170 (1958).

нием сгущается, то время, необходимое для ее разделения на данной поверхности фильтрации, будет уменьшаться прямо пропорционально уменьшению отношения количества фильтрата к количеству твердой фазы.

Применение теории фильтрации к обработке опытных данных

Уравнения фильтрации позволяют установить влияние изменения любой переменной в том случае, если константы уравнения определены опытным путем для рассматриваемой суспензии. Например, результаты опытов, проведенных под вакуумом, могут быть использованы для определения приближенных скоростей фильтрации под давлением. Представляет интерес также определение влияния толщины осадка или продолжительности цикла фильтрации на производительность фильтра.

Если фильтрация проводится при постоянных давлении, температуре и концентрации твердой фазы в

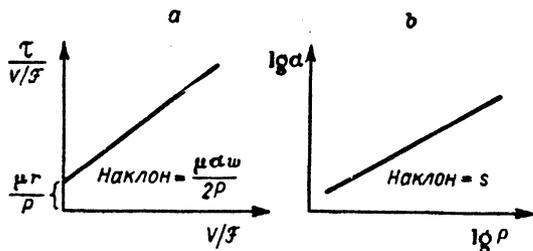


Рис. 11-86. Типичные диаграммы фильтрации.

суспензии, то количество фильтрата и время фильтрации определяется непосредственными замерами. Так как опыт проводится при известном значении поверхности фильтрации, можно вычислить величины $\tau/(V/F)$ при различных V/F . Откладывая по оси абсцисс значения $1/V\sqrt{s}$, а по оси ординат $\tau/(V/F)$, получим прямую, имеющую наклон $\mu\alpha\omega/2P$ и отсекающую на оси ординат отрезок $\mu r/P$ (рис. 11-86, а). Поскольку μ , ω и P известны, можно вычислить α и r из соотношений:

$$\alpha = \frac{2P}{\mu\omega} \times \text{наклон прямой}$$

$$r = \frac{P}{\mu} \times \text{вертикальный отрезок на оси ординат}$$

Теперь может быть определено влияние любой переменной, за исключением величины P , влияющей на α .

Для определения эффекта изменения давления необходимо провести опыты при различных давлениях и вычислить описанным способом соответствующие значения α и r . При нанесении полученных данных в логарифмических координатах $\alpha - P$ и $r - P$ (или в обычных координатах $\lg \alpha - \lg P$ и $\lg r - \lg P$) получаются прямые линии (рис. 11-86, б), на основании которых можно найти α и r в исследованных пределах. Для многих случаев r не изменяется сколько-нибудь заметно при изменении давления, поэтому можно принять среднее значение r для всего диапазона давлений.

Если низкое давление наблюдается в течение значительного времени от начала фильтрации, то измерение следует начинать, когда давление повысится и станет постоянным. В этом случае величина r будет представлять сумму сопротивлений фильтровальной перегородки и слоя осадка, отложившегося к моменту достижения постоянного давления. При определении массы сухого осадка в зависимости от времени фильтрации (как это обычно делается при опытах на листовом вакуум-фильтре) обычно достаточно двух-трех опытов, чтобы можно было нанести на диаграмму зависимость между τ/V и W . Возможность интерполяции или экстраполяции полученных данных делает излишним большое количество опытов.

Для процесса фильтрации при постоянной скорости рекомендуется использовать метод Бониллы¹, с определением P_1 и α_0 посредством уравнения

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha' (P - P_1)^s$$

и нанесением на диаграмму величин $(\alpha - \alpha_0)$ в зависимости от $(P - P_1)$ для нахождения α' и s .

ФИЛЬТРОВАЛЬНЫЕ ПЕРЕГОРОДКИ

Для эффективного действия фильтра важное значение имеет выбор фильтровальной перегородки, хотя она по существу только поддерживает осадок, который на ней откладывается. Фильтровальная перегородка должна иметь максимальные размеры пор и одновременно обеспечивать получение достаточно чистого фильтрата. В общем случае фильтровальная перегородка должна обладать следующими свойствами:

- 1) способностью хорошо задерживать твердые частицы суспензии;
- 2) небольшим гидравлическим сопротивлением потоку фильтрата;
- 3) возможностью легко отделять осадок;
- 4) стойкостью к химическому воздействию разделяемых веществ;
- 5) способностью не набухать при соприкосновении с жидкой фазой суспензии и промывной жидкостью;
- 6) достаточной механической прочностью;
- 7) теплостойкостью при температуре фильтрации;
- 8) невысокой стоимостью.

Фильтровальные перегородки изготавливаются из хлопчатобумажных, шерстяных, льняных, джутовых, шелковых и стеклянных волокон, нитрованной хлопчатобумажной ткани, пористого угля, металлов и синтетических материалов.

Хлопчатобумажные ткани благодаря низкой стоимости и разнообразию типов ткацкого переплетения используются наиболее часто. Они разрушаются всеми минеральными и многими органическими кислотами, способными кристаллизоваться при температуре процесса, крепкими щелочами, кислотами и аммонийными солями. Летучие органические кислоты на них не действуют. Температура процесса фильтрации не должна превышать 90° С. Хлопчатобумажные ткани характеризуются способом переплетения нитей, номером артикула, весом единицы поверхности фильтрации, числом нитей основы и утка на единице длины, числом сложений, номером пряжи. Номер пряжи определяет вес исходных скрученных элементарных нитей. Число сложений, определяется как число тонких нитей, скрученных вместе в процессе прядения окончательной нити. Число нитей показывает их

¹ Bonilla, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 34, 243 (1938).

количество на 1 см в каждом направлении. Тяжелые ткани с низким числом нитей, характеризующиеся несколькими сложениями, отличаются наибольшей прочностью, но быстро закупориваются и задерживают крупные твердые частицы.

Хлопчатобумажные технические ткани в большинстве случаев имеют полотняное переплетение, дешевы, достаточно прочны и легко отделяются от осадка. Однако при высокой плотности переплетения они оказывают повышенное гидравлическое сопротивление потоку фильтрата и быстро закупориваются твердыми частицами. Номерные технические ткани часто используются в фильтрпрессах. Представляют интерес также другие ткани полотняного переплетения: так называемые «унциевые технические ткани» (например, десятиунциевая техническая ткань с редким переплетением, способная задерживать грубодисперсные твердые частицы); довольно тяжелые и с очень редким переплетением «рукавные технические ткани»; ткани с простометом между нитями ~ 3 мм, применяемые в качестве подкладочного материала в прессах; бязи (70—270 г/м²) — ткани с редким переплетением, используемые в мягких условиях фильтрования; специально обработанные ткани для процеживания густых жидкостей (например, батисты, вуали и т. п.).

Хлопчатобумажные саржи характеризуются диагональным переплетением. По сравнению с техническими тканями они имеют меньше гидравлическое сопротивление и менее склонны к закупориванию, но пропускают несколько большее количество тонкодисперсных частиц в начале фильтрования. При выборе саржи следует иметь в виду, что на прочность и сопротивляемость изнашиванию влияет ее вес, а увеличение числа нитей способствует задерживанию тонкодисперсных твердых частиц. Тяжелые ткани используются для больших фильтрпрессов.

Тики являются разновидностью саржевой ткани. Кантонская фланель имеет на одной из сторон начес, позволяющий применять ее в процессах осветления, не требующих легкого отделения осадка.

По толщине, склонности к закупориванию и некоторым другим свойствам сложные саржи занимают среднее положение между номерными техническими тканями и простыми саржами. При умеренных и низких давлениях они во многих отношениях превосходят номерные технические ткани.

Шерстяные ткани иногда применяются для фильтрования разбавленных кислых растворов и разделения густых суспензий. Они склонны к закупориванию и быстро разрушаются щелочами. Джутовые ткани широко используются в процессах отжатия материалов, имеющих крупные твердые частицы. Ткани из стекловолокна обычно применяются для фильтрования сильных кислот при повышенных температурах. Шелк часто используется в фильтрах со шнуровым съемом осадка.

В качестве фильтровальных перегородок используются также разнообразие синтетические материалы (например, найлон, орлон, полипропилен и т. д.), устойчивые к воздействию агрессивных жидкостей и бактерий.

Металлические сетки различных типов переплетения изготавливаются чаще всего из стали, никеля, меди, латуни, бронзы, алюминия. Применение металлических сеток ограничивается разделением суспензий, содержащих крупные кристаллические частицы. При так называемых «голландских переплетениях», в которых используются прямые проволоки для основы и извитые для утка, могут быть получены более плотные

сетки, применяемые обычно для разделения суспензий, содержащих тонкодисперсные кристаллические частицы. Мягкие аморфные частицы быстро закупоривают такие сетки (в этом случае приходится использовать вспомогательные фильтровальные вещества).

Пластины и трубы из спекшихся частиц нержавеющей стали или других металлов (жесткие пористые перегородки) используются в осветлительных фильтрах (в особенности в двигателях самолетов), а также в качестве основы в фильтрах с предварительно нанесенным слоем вспомогательного фильтровального вещества.

Угольные и графитовые плитки, трубы и изделия специальных форм стойки к воздействию кислот и щелочей в условиях, исключающих окисление. Подобным же образом используются алоксит, алунд, кремнезем и фарфор, которые стойки к воздействию всех кислот, за исключением фтористоводородной, но разрушаются сильными щелочами. Характеристики некоторых промышленных сортов пористых пластических материалов, используемых для фильтрования суспензий, приведены в гл. I.

Хлопчатобумажная вата применяется для фильтрования красок, прядильных растворов и других жидкостей с большой вязкостью, а также для извлечения загрязнений из молока и в ряде других процессов.

В качестве фильтровальных перегородок могут применяться войлоки, а также хлопчатобумажно-шерстяные смеси в виде прессованных и тканых изделий (такие смеси могут использоваться повторно после их очистки или промывки).

Фильтровальная бумага и целлюлоза часто применяются для отделения очень мелких твердых частиц и для очистки жидкостей с небольшим содержанием твердого. Эти материалы имеют различную проницаемость, толщину и прочность, в некоторой степени стойки к воздействию сильных кислот и щелочей. Их необходимо хорошо закреплять в фильтре; если осадок должен быть извлечен без разрушения фильтровальной перегородки, ее покрывают легкой тканью.

Слои зернистых материалов широко применяются для фильтрования воды и химических растворов. Для очистки и разрыхления слоя таких материалов используется обратная промывка.

Характеристики различных фильтровальных перегородок и методы измерения их пористости можно найти в литературе¹.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОПЫТЫ НА ЭЛЕМЕНТАХ ФИЛЬТРА

Обычно бывает невозможно предсказать ход разделения неопытанной суспензии, и даже данные, полученные при фильтровании хорошо известного вещества, могут изменяться в зависимости от условий проведения процесса. Поэтому во всех случаях, когда отсутствуют точные данные, необходимо поставить предварительные опыты для изучения процесса при заданных производственных условиях. Их можно легко выполнить на очень простой и небольшой установке. Чаще всего заранее известно, будет ли проводиться процесс фильтрования под вакуумом или под давлением. Иногда целью опытов является сравнение различных условий фильтрования.

¹J. G а с е, Am. Inst. Chem. Engrs J., 2, 307, 316 (1956);

Опыты под вакуумом. Элемент фильтра (рис. II-87) соединен со сборником фильтрата, который снабжен вакуумметром. Сборник присоединен к источнику вакуума. При сравнительных опытах обычно изучаются различные фильтровальные материалы. Полный цикл фильтрования разделяется на три операции: 1) образование осадка (определяющая операция); 2) сушка осадка на фильтре и 3) удаление осадка. Иногда после первого периода, т. е. после образования осадка, следует промывка; во время сушки осадок может уплотняться. Поэтому при проведении предварительных лабораторных

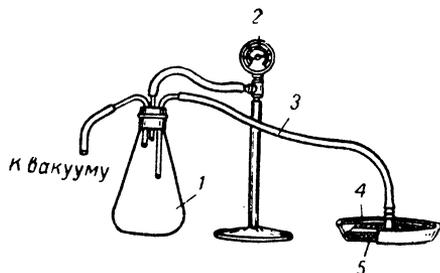


Рис. II-87. Лабораторная установка для проведения опытов по фильтрованию под вакуумом:

1 — сборник фильтрата; 2 — вакуумметр; 3 — шланг; 4 — фильтровальная секция; 5 — ткань.

опытов нужно учесть все перечисленные части полного цикла и составить план испытаний.

Если целью фильтрования является только извлечение твердых частиц, то весь цикл можно разделить на следующие периоды: треть времени — образование осадка, треть времени — сушка осадка и последняя треть — удаление осадка и подготовка к новому циклу.

Во время фильтрования под вакуумом элемент фильтра погружается в испытуемую суспензию на весь период образования осадка. Затем он извлекается из суспензии и при опущенной вниз дренажной трубке находится в таком положении в течение всего периода сушки осадка. В опытах замеряются величина вакуума во время образования и сушки осадка, время появления трещин в осадке, температура суспензии, концентрация твердых частиц, pH жидкой фазы.

Обычно несколько предварительных опытов определяют примерные пределы продолжительности цикла. После этого выполняются более тщательные опыты, в которых изучается влияние температуры, степени разбавления, различных добавок и т. д., и определяются производительность фильтра и чистота фильтрата.

Опыты под давлением. Применительно к плиточным фильтрпрессам предварительные опыты по фильтрованию также удобно проводить на лабораторной модели (при этом соблюдаются подобные условия отложения осадка в рамах). Установка, изображенная на рис. II-88, используется при исследовании процессов фильтрования на элементах фильтров, работающих под давлением.

При проведении опытов необходимо иметь в виду производственные условия и соответствующим образом организовать цикл фильтрования. После определения продолжительности накопления осадка или заполнения фильтра должны быть изучены операции про-

мывки и сушки осадка. При мокрой выгрузке осадка целесообразно открыть фильтр и провести ряд опытов по смыванию осадка струей воды. При выгрузке осадка в сухом (обезвоженном) виде надо изучить действие умеренной продувки воздуха через раму с осадком.

В опытах по вакуум-фильтрованию и фильтрованию под давлением суточная производительность фильтра определяется как масса сухого осадка с единицы поверхности опытного элемента фильтра, умноженная на число циклов за 24 ч и на поверхность фильтрования промышленного фильтра. Производительность по сухому веществу обычно выражается в $кг/(м^2 \cdot сутки)$, а по фильтрату — в $м^3/(м^2 \cdot мин)$ или $м^3/(м^2 \cdot сутки)$.

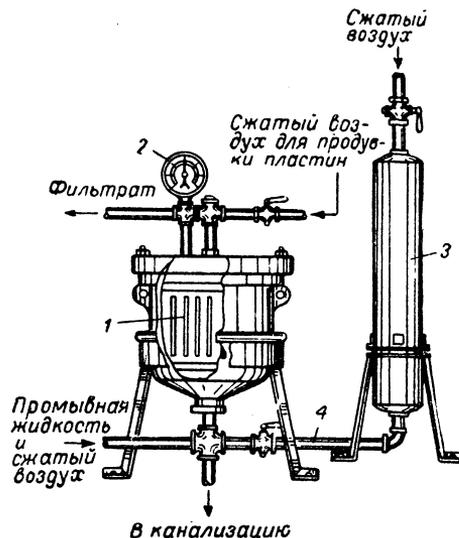


Рис. II-88. Опытная установка для проведения опытов по фильтрованию под давлением:

1 — фильтровальные элементы (пластины); 2 — манометр; 3 — монтажу; 4 — трубопровод для исходной суспензии.

Свойства изучаемой суспензии должны быть типичными для данного промышленного процесса фильтрования. Испытания необходимо проводить немедленно после отбора проб, так как иногда по истечении нескольких дней образцы дают совершенно другие результаты, что объясняется изменением свойств суспензии при хранении. Все опыты должны выполняться в условиях, по возможности воспроизводящих особенности работы промышленного фильтра. При фильтровании легко разделяемых суспензий (например, смеси кристаллов с маточной жидкостью) могут быть получены значительно отличающиеся одна от другой величины производительности фильтра. В таких случаях целесообразнее использовать небольшую установку, моделирующую промышленный фильтр. Перед проведением опытов необходимо собрать как можно больше имеющихся данных об используемых фильтровальной перегородке и разделяемой суспензии.

Вместо испытаний на модельном элементе фильтра можно выполнить исследование по методу «сжатие — проницаемость», что позволяет получить в единичном

опыте данные, равноценные результату ряда опытов при постоянном давлении, и избежать сложности обработки экспериментальных данных, получаемых при постоянной скорости фильтрования. Методы проведения таких опытов и обработки результатов можно найти в литературе¹.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ФИЛЬТРОВАНИИ

Иногда скорость фильтрования можно увеличить, добавив в исходную суспензию фильтровальное вспомогательное вещество, состоящее из относительно крупных несжимаемых частиц. Такие вещества используются, в частности, при разделении суспензий, содержащих тонкодисперсные твердые частицы или легко деформируемые флокулы. Вспомогательное вещество должно обладать небольшой насыпной плотностью, быть пористым и химически инертным по отношению к фильтрату.

Наиболее часто используется диатомит (называемый также диатомовой землей, инфузальной землей, кизельгуром), представляющий собой остатки панцирей микроскопических третичных водорослей диатомей. Он химически стоек, отличается небольшой плотностью и широко применяется при фильтровании растительных масел, нефтепродуктов, фруктовых соков, напитков, сахарных сиропов и т. д. При очистке сахарных сиропов, вин и пива может быть использована также бумажная масса (целлюлоза).

Количество добавляемого вспомогательного вещества сравнительно невелико, и связанные с этим расходы с избытком окупаются повышением производительности фильтра. Бумажная масса и диатомит могут быть промыты и регенерированы, т. е. их можно использовать несколько раз.

В качестве вспомогательных веществ могут применяться также фуллерова земля, древесный уголь, перлит, асбест, опилки, окись магнезия, поваренная соль, гипс и некоторые другие материалы. В специальных случаях используются обесцвечивающие угли и земли, а также активированные глины, действующие как осветлители и как вспомогательные вещества при обработке масел, жиров и т. д. Часто на фильтровальную перегородку наносится слой вспомогательных веществ, которые действуют осветляюще и предохраняют перегородку от закупоривания.

КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРОВ

Аппараты для фильтрования с образованием осадка

На поверхности фильтровальной перегородки накапливается осадок твердых частиц (содержание их в исходной суспензии обычно составляет от 1 до >40%). По истечении начального периода фильтрования осадок становится фильтровальной средой. Техническую ценность могут представлять осадок или фильтрат (или оба они одновременно). Если основным продуктом является фильтрат, то степень его извлечения из осадка промывкой и продувкой определяется экономическим расчетом. Когда ценным продуктом является осадок, может оказаться необходимым практически полное извлечение фильтрата. Степень сушки

осадка при этом также определяется экономическим расчетом.

Так как осадок выполняет роль эффективной фильтровальной среды, нет необходимости в том, чтобы используемая перегородка обладала значительной задерживающей способностью; для уменьшения сопротивления и повышения производительности фильтра перегородка обычно имеет настолько широкие поры, что твердые частицы свободно проходят через нее в начале фильтрования. Поэтому при фильтровании с образованием осадка редко получается совершенно чистый фильтрат. Когда это необходимо, чистота фильтрата может быть повышена путем отделения мутных порций (часто составляющих очень небольшую долю от общего объема), их рециркуляцией или повторным фильтрованием.

Наиболее трудоемкая операция в процессах фильтрования с образованием осадка — удаление осадка из фильтра. Обычно осадок представляет собой влажную твердую массу. При выборе оборудования необходимо учитывать, что осадок должен легко отделяться от фильтровальной перегородки и быстро удаляться из фильтра.

Процессы фильтрования с образованием осадка могут протекать под действием: 1) гидростатического напора; 2) давления, создаваемого насосом или компрессором; 3) вакуума.

Напорные (гравитационные) фильтры. Движение фильтрата в таких аппаратах вызывается гидростатическим давлением столба исходной суспензии, находящейся над поверхностью фильтровальной перегородки или слоя осадка. Это давление относительно невелико (от нескольких сантиметров столба жидкости в лабораторной установке до нескольких метров в промышленном фильтре). Поэтому напорные фильтры применяются только для легко фильтрующихся материалов и в тех случаях, когда не требуется высокой скорости фильтрования.

Преимущества напорных фильтров в основном следующие: простота конструкции самих аппаратов и вспомогательного оборудования; низкая стоимость; возможность использования для их изготовления почти любых конструкционных материалов.

Недостатки таких фильтров: небольшая скорость фильтрования; трудоемкость обслуживания; значительная величина занимаемой площади, приходящаяся на единицу поверхности фильтрования.

Напорные фильтры не используются в промышленности в широком масштабе. В основном их применяют в химических лабораториях, ползаводских или очень небольших заводских установках.

Напорные (гравитационные) нутч-фильтры. Такие фильтры имеют ложное перфорированное или пористое дно, покрытое фильтровальной тканью. Фильтрование происходит под действием гидростатического напора суспензии. Фильтрат собирается в нижней части нутч-фильтра или направляется в канализацию.

На нутч-филтре осадок можно промывать, вытесняя фильтрат из пор промывной жидкостью. Если промывка затруднительна, нутч-фильтр снабжают мешалкой, которая взмучивает осадок и поддерживает его во взвешенном состоянии до тех пор, пока не закончатся процессы диффузии и растворения различных примесей.

Если осадок влажный, его легко выгрузить из нутч-фильтра разгрузочным трубопроводом, находящимся на одном уровне с поверхностью фильтрования. Осадок в сухом состоянии может быть удален из нутч-фильтра только вручную; эта операция требует боль-

¹ Grace, Chem. Eng. Progr., 49, 303, 427 (1953).

шой затраты труда и вызывает преждевременное изнашивание фильтровальной ткани. Осадок можно выгружать через люк в нижней части корпуса; если нутч-фильтр невелик, доступ к осадку может быть обеспечен отводом верхней или нижней части фильтра.

Диаметр нутч-фильтров редко превышает 2,5 м (емкость 7,5 м³, поверхность фильтрования ~5,0 м²). Керамические нутч-фильтры имеют диаметр, не превышающий 0,9 м (емкость 0,4 м³, поверхность фильтрования ~0,6 м²).

Нутч-фильтры могут быть закрытыми и открытыми и при соответствующем конструктивном выполнении работать под давлением или вакуумом.

Промышленные фильтры Дельпарка. Этот фильтр (рис. II-89) — самоочищающийся, напорный, полунепрерывного действия — используется для фильтрования легко разделяемых суспензий, содержащих относительно

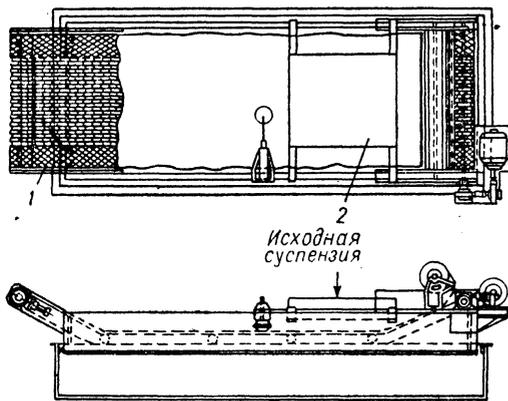


Рис. II-89. Фильтр Дельпарка:

1 — лента; 2 — входной диффузор.

крупные твердые частицы. Рабочая зона плоской бесконечной конвейерной ленты, изготовленной из сетки простого переплетения, находится над приводными и несущими роликами между наклонными сторонами и покатыми концами рамы, расположенной над сборным резервуаром. Конвейерная лента несет на верхней своей поверхности фильтровальный материал. Таким образом, горизонтальная и наклонные части ленты, полностью покрытые фильтровальным материалом, и наклонные стенки рамы образуют неглубокий лоток (глубина до 150 мм), на один конец которого поступает исходная суспензия из распределительного устройства. Фильтрат проходит сквозь фильтровальный материал, а твердые частицы задерживаются на нем. Поскольку толщина осадка и его сопротивление увеличиваются, уровень суспензии в лотке повышается. Когда этот уровень достигает заданного положения, переключатель, получающий импульс от поплавкового устройства, приводит в движение конвейерную ленту, в результате чего в рабочую зону поступает следующая часть фильтровального материала, а осадок удаляется на противоположном конце фильтра в приемник. Как только новый фильтровальный материал поступит на фильтр в достаточном количестве и уровень суспензии понизится до требуемого предела, поплавковое устройство остановит приводной механизм. Частота рабочих циклов зависит от скорости поступления исходной суспензии и концентрации в ней твердых частиц.

Фильтры Дельпарка имеют поверхность фильтрования 0,3—12 м² при ширине ленты 40—120 см, производительность их колеблется от 8 до >1000 л/мин. Они широко применяются для регенерации охлаждающих жидкостей и жидких смазочных веществ, используемых в металлорежущих станках, а также для фильтрования воды, масел, гальванических растворов и отходов консервных производств. Например, установка, на которой извлекаются загрязнения из закалочного масла, используемого в обжиговых печах, имеет производительность по маслу 190 л/мин при скорости ленты ~0,9 м/ч.

Мешочные фильтры. Эти напорные фильтры представляют собой изготовленные из фильтровальной ткани, войлока или замши мешки (сумки), натянутые на подвесные каркасы. Они почти полностью вытеснены более эффективными фильтрами, но все же используются иногда для простых операций процеживания (извлечение комочков из краски или загрязнений из смазочного масла). Напорные мешочные фильтры для фильтрования масел имеют производительность 25—7500 л/ч при вязкости масла ~400 сгз.

Песочные фильтры. Наиболее совершенны напорные фильтры со слоем песка или угля. Такой фильтр представляет собой чан, в котором размещены слои гравия или измельченного угля, причем размер частиц в слое уменьшается в направлении от основания слоя вверх. Слои зернистого материала являются фильтровальной средой, на верхнюю часть которой подается исходная суспензия. Фильтрат проходит через ложное дно или перфорированные дренажные трубы, расположенные у основания фильтровальной среды. Фильтр может быть выполнен в закрытом виде и работать под избыточным давлением.

Строго говоря, песочный фильтр является осветлительным устройством, хотя на поверхности фильтровальной среды и может накапливаться в заметном количестве осадок в конце цикла фильтрования. В США такие фильтры применяются почти исключительно для фильтрования воды.

Конструкция песочного фильтра достаточно проста и подробно описана в руководствах и справочниках по технике очистки воды.

Фильтры, работающие под давлением (общие сведения)

Фильтрами, работающими под давлением, называют такие фильтры, которые действуют под давлением выше атмосферного у поверхности фильтрования и при атмосферном или повышенном давлении в зоне, куда поступает фильтрат. В соответствии с этим определением, напорные (гравитационные) фильтры также работают под давлением; однако по характеру эксплуатации к фильтрам, работающим под давлением, относят обычно только такие, в которых давление, необходимое для фильтрования, создается с помощью жидкостного насоса или сжатым газом. На фильтры, работающие под давлением, суспензия может подаваться плунжерным, диафрагменным, винтовым или центробежным насосом, а также с помощью монтажу или в виде потока, выходящего из автоклава под давлением. За исключением начальных стадий фильтрования, процесс разделения суспензий с образованием осадка редко проводится при избыточном давлении <1,75 ат. Часто применяются избыточные давления 3,5—5 ат. Специальные фильтры могут работать при избыточном давлении ≥ 35 ат.

В течение многих лет фильтры, работающие под давлением, были в основном аппаратами периодического действия. В настоящее время существуют подобные фильтры непрерывного действия, но трудности удаления осадка из зоны, находящейся под давлением, и трудности обслуживания все еще ограничивают их применение. Поэтому среди фильтров, работающих под давлением, преобладают аппараты периодического действия.

Достоинства фильтров, работающих под давлением, в основном следующие: возможность в условиях повышенного давления относительно быстро проводить процесс фильтрования и сепарировать трудно разделяемые суспензии; компактность оборудования при большой поверхности фильтрования на единице занимаемой площади; лучшая приспособляемость фильтров периодического действия (при относительно низкой их стоимости) к изменяющимся условиям производства по сравнению с фильтрами других конструкций.

В качестве недостатков этих фильтров нужно отметить: трудность использования фильтров периодического действия в непрерывных процессах и во многих случаях высокую стоимость их эксплуатации; худшую приспособляемость фильтров непрерывного действия (при относительно высокой их стоимости) к изменяющимся условиям производства.

Фильтры периодического действия, работающие под давлением

Фильтрпрессы. Фильтрпресс, наиболее простой из фильтров, работающих под давлением, все еще широко применяется на практике. Существуют фильтрпрессы двух основных типов: плиточно-рамный (имеется несколько усовершенствованных модификаций) и камерный. Плиты для фильтрпрессов обоих типов могут

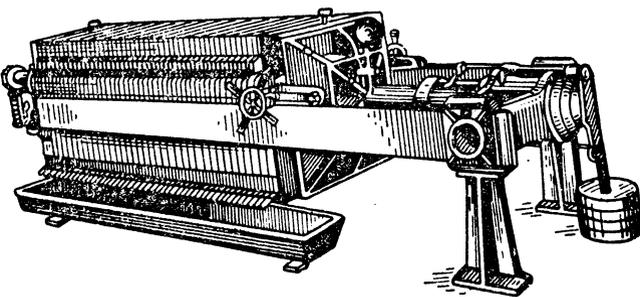


Рис. II-90. Плиточно-рамный фильтрпресс.

быть изготовлены из разнообразных конструкционных материалов: металлов (чугун, сталь, алюминий, свинец, бронза, медь, никель и т. д.), металлов с гальваническим, пластмассовым или резиновым покрытием, дерева, дерева с покрытием из эпоксидной смолы, твердых полимеров (эбонит, полиэфирные стеклопластики и т. д.).

Плиточно-рамный фильтрпресс состоит из набора чередующихся жестких плит, поверхности которых имеют углубления, желобки или ячейки для дренажа, и полых рам, в которых собирается осадок во время фильтрования (рис. II-90). Фильтровальный материал (обычно ткань) покрывает обе стороны каж-

дой плиты. Плиты и рамы, как правило, имеют прямоугольную форму, но иногда бывают треугольными или круглыми (рис. II-91). Они устанавливаются в вертикальном положении на двух параллельных штангах и для герметичности зажимаются во время фильтрования между двумя крайними полуплитами, одна из которых неподвижна, а другая способна перемещаться посредством винтового, храпового, зубчатого или гидравлического механизма.

Суспензия поступает в фильтрпресс, и фильтрат отводится из него через каналы в углах или выступах плит и рам. Благодаря такой конструкции нет нужды

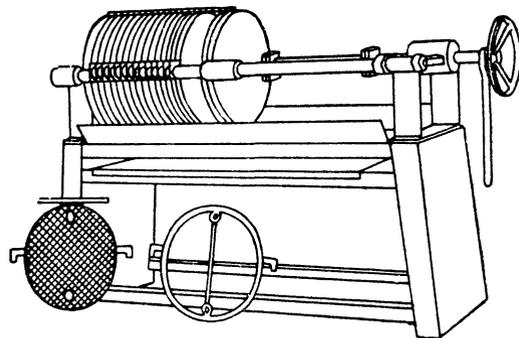


Рис. II-91. Фильтрпресс с круглыми металлическими плитами и рамами.

в отверстиях, соответствующих каналам, в фильтровальной ткани. Эти отверстия иногда трудно уплотняются и вызывают утечку фильтрата. Канал для фильтрата образуется рядом совмещающихся отверстий во всех плитах и рамах. Он может проходить по всей длине фильтрпресса и одним концом соединяться с отводной трубой (закрытый отвод фильтрата). Фильтрат может также отводиться в открытый желоб через индивидуальные краны, имеющиеся на каждой плите (открытый отвод фильтрата).

При открытом отводе фильтрата можно проверять работу каждой плиты. Если фильтрат из какой-либо плиты становится мутным, кран может быть закрыт и плита тем самым выключается из фильтра. Однако закрытый отвод фильтрата более предпочтителен. Он становится необходимым, когда фильтрованию подвергаются токсичные или легколетучие жидкости. Возможны различные способы подачи суспензии и отвода фильтрата: подача суспензии снизу и отвод фильтрата сверху позволяют быстро вытеснить воздух и получить осадок максимальной однородности с нормальной плотностью; подача суспензии сверху и отвод фильтрата снизу обеспечивают максимальное извлечение фильтрата и минимальную влажность осадка. Последний способ наиболее приемлем для отделения тяжелых частиц, имеющих склонность закупоривать входные отверстия в нижней части фильтра. Комбинированные (двойные) подача и отвод целесообразны для фильтрующихся с большими скоростями веществ высокой вязкости. Этот способ, в частности, может быть использован для работы со слоем вспомогательного вещества, а также в том случае, когда осадок дренируется из фильтра в конце цикла. В некоторых фильтрпрессах возможно переключение подачи сверху на подачу снизу между циклами фильтрования или в течение этих циклов.

Для промывки осадка применяются два способа (рис. II-92). При простой промывке промывная вода проходит тот же путь, что и исходная суспензия и фильтрат. Этот способ используется при частичном заполнении рам осадком. Более эффективен второй способ — полная промывка. В этом случае промывная вода подается к поверхности тех плит, отводные ка-

налы которых перекрыты. Проходя сквозь толщу осадка, вода направляется к поверхностям других плит и затем через открытые каналы этих плит отводится из фильтрпресса. Очевидно, что в фильтрпрессе с таким способом промывки осадка входные отверстия и отводные каналы должны быть расположены строго определенным образом, а плиты собраны правильно. Для быстрой и правильной сборки плиты и рамы отмечаются соответствующим числом знаков на их сторонах: один знак обозначает непромывную плиту, два знака — раму и три знака — промывную плиту. Сборка производится в последовательности 1—2—3—2—1. Полная промывка применяется, когда рамы целиком заполнены осадком; в противном случае осадок деформируется или сползает во время промывки, а промывная вода проходит по трещинам или каналам, образовавшимся в осадке.

фильтрация, объемы осадков и допустимые максимальные давления для различных фильтрпрессов приведены в табл. II-10. Оптимальную толщину осадка и поверхность фильтрации, обеспечивающую разделение данной суспензии при заданной производительности, можно найти только из опытов, проводимых на небольших фильтр-

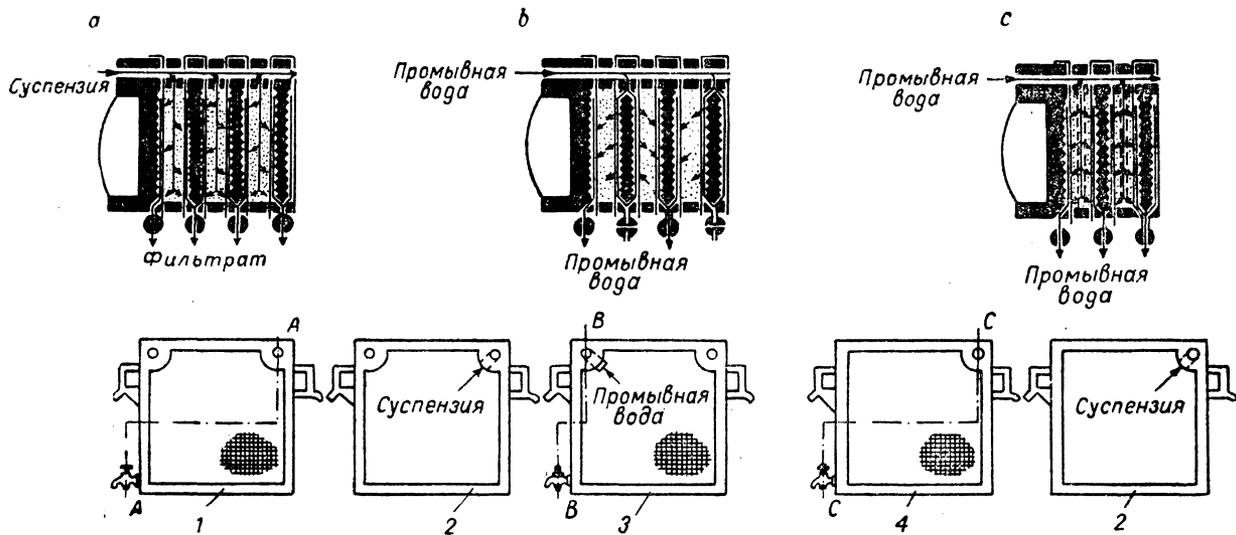


Рис. II-92. Схемы фильтрации и промывки на фильтрпрессе:

поперечные разрезы фильтрпресса: а — по AA во время образования осадка; б — по BB во время полной промывки; в — по CC во время простой промывки; 1 — непромывная плита; 2 — рама; 3 — промывная плита; 4 — плита.

налы которых перекрыты. Проходя сквозь толщу осадка, вода направляется к поверхностям других плит и затем через открытые каналы этих плит отводится из фильтрпресса. Очевидно, что в фильтрпрессе с таким способом промывки осадка входные отверстия и отводные каналы должны быть расположены строго определенным образом, а плиты собраны правильно. Для быстрой и правильной сборки плиты и рамы отмечаются соответствующим числом знаков на их сторонах: один знак обозначает непромывную плиту, два знака — раму и три знака — промывную плиту. Сборка производится в последовательности 1—2—3—2—1. Полная промывка применяется, когда рамы целиком заполнены осадком; в противном случае осадок деформируется или сползает во время промывки, а промывная вода проходит по трещинам или каналам, образовавшимся в осадке.

прессах. Сведения об удельном сопротивлении ряда материалов применительно к фильтрпрессам имеются в

ТАБЛИЦА II-10

Данные для выбора фильтрпресса

Размер плиты 1, см	Эффективная поверхность фильтрации, приходящаяся на одну фильтровальную камеру, м ²		Вместимость по осадку на 1 см толщины камеры, дм ³		Максимальное давление, ат	
	металлические	деревянные или резиновые	металлические	деревянные или резиновые	металлические	деревянные
10 (4)	0,013	...	0,067	...	...	...
17,5 (7)	0,046	...	0,26	...	17,5	...
30 (12)	0,16	0,084	0,78	0,44	10,5	7,0
45 (18)	0,36	0,21	1,8	1,1	10,5	7,0
60 (24)	0,65	0,45	3,2	2,2	7,0	7,0
65 (26)	0,74	...	3,7	...	7,0	...
75 (30)	0,98	0,68	4,9	3,3	7,0	5,0
80 (32)	1,1	0,77	5,5	3,8	7,0	5,0
90 (36)	1,4	0,98	7,2	4,8	7,0	4,5
108 (43 1/4)	2,1	1,4	10	7,0	7,0	4,6
120 (48)	2,7	1,8	13	9,0	5,0	3,9
140 (56)	...	2,7	...	13	...	3,5

¹ Размер плиты в см дан приближенно; в скобках указан размер плиты в дюймах (1 дюйм = 25,4 мм).

литературе¹. Эти сведения можно использовать для предварительной оценки пригодности того или другого фильтра. После определения поверхности фильтрования проектировщик обычно должен решить, какое сочетание размера и числа плит следует принять. Диаграмма II-93 позволяет сделать такой выбор.

Предложенный метод применим к плиточно-рамным и камерным фильтрпрессам. Линия постоянной поверх-

можно путем подачи промывной воды в плиты фильтрпресса снизу и отвода сверху. Изнашивание фильтровального материала в периоды разгрузки и очистки фильтрпресса можно свести к минимуму, применяя тяжелые плотные ткани, устраняя острые ребра на плитах и используя гладкие деревянные лопатки для удаления осадка. Значительные затраты труда на сборку и разборку фильтрпресса могут быть уменьшены за

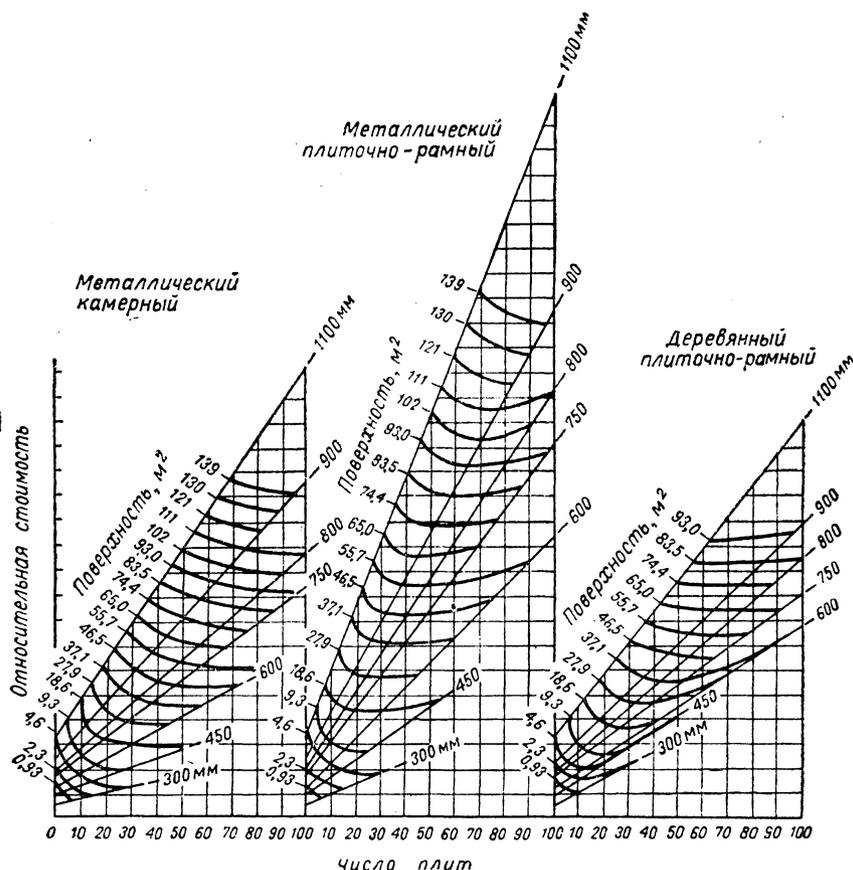


Рис. II-93. Оптимальное сочетание размера и числа плит для фильтрпрессов.

ности фильтрования или параллельная ей интерполяционная линия продолжается до точки пересечения с одной из наклонных линий постоянного размера плит. Абсцисса точки пересечения дает рекомендуемое число плит, размер которых указан на пересекаемой наклонной линии.

Фильтрпрессы конструктивно просты и дешевы. Они могут работать при высоких давлениях как в процессах фильтрования с образованием осадка, так и при осветлении жидкости. Необходимые площадь и высота помещения на единицу производительности фильтрпресса малы. При определенных условиях в фильтрпрессе получается осадок, более сухой и плотный, чем снимаемый почти с любого другого фильтра.

Промывка осадка на фильтрпрессе часто оказывается несовершенной. Увеличить эффективность промывки

счет применения механических устройств для перемещения плит и подъема рам. Наиболее сухой осадок получается в результате продувки фильтрпресса воздухом с целью вытеснения фильтрата или промывной жидкости из пор осадка и каналов фильтра. В некоторых случаях через фильтрпресс пропускают водяной пар или теплый воздух; вследствие этого находящаяся в осадке жидкость испаряется, и он частично высушивается. Однако если температура продуваемого газа слишком высока, изнашивание ткани ускоряется. При продувке воздухом фильтрпресса, содержащего воспламеняющуюся жидкость, необходимо соблюдать осторожность.

Фильтрпресс с углублениями в плитах (камерный фильтрпресс) по внешнему виду похож на плиточно-рамный фильтрпресс, но состоит только из плит. Обе стороны каждой плиты имеют углубления и образуют камеры для сбора осадка между

¹ Sperry, Ind. Eng. Chem., 36, 323 (1944).

каждыми двумя плитами. Плиты имеют центральные отверстия, образующие соединительный канал для всех камер пресса. В этот канал поступает суспензия, а фильтрат удаляется через каналы в нижней части каждой плиты. Фильтровальная ткань с центральным отверстием, покрывающая плиту, связывается через канал для поступления исходной суспензии с тканью на противоположной стороне плиты посредством зажимных устройств или при помощи матерчатого рукава.

Камерный фильтрпресс на ~15% дешевле эквивалентного плиточно-рамного, но повышенное изнашивание и повреждение фильтровальной ткани значительно увеличивают стоимость его эксплуатации. Канал для поступления исходной суспензии в камеру менее склонен к закупориванию при работе с густыми суспензиями, а меньшее число соединений обуславливает более надежную герметичность камерного фильтрпресса по сравнению с плиточно-рамным. Однако получаемый

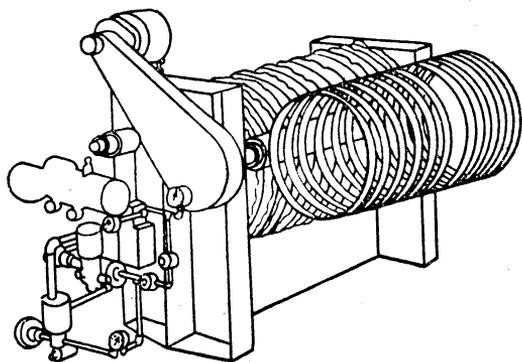


Рис. 11-94. Фильтрпресс «Эймко — Баруэлл».

осадок неоднороден по толщине, и часть его, примыкающая к центральному каналу, обычно остается рыхлой. Поэтому полная промывка оказывается невозможной. В других отношениях камерный и плиточно-рамный фильтрпрессы в общем аналогичны.

В гидравлический фильтрпресс Карвера исходная суспензия подается насосом по трубопроводу и разделяется фильтрованием при давлении в несколько десятков атмосфер. После образования осадка он сжимается под действием гидравлического давления 420 ат. В результате получается очень сухой осадок. В конце цикла осадок автоматически выталкивается на приемный конвейер. Диаметр камер не превышает 80 см. Производительность фильтрпресса с 12 камерами диаметром 80 см равна ~1 т осадка за цикл. Цикл работы может быть полностью автоматизирован.

Фильтрпресс «Эймко — Баруэлл» является видоизменением плиточно-рамного фильтрпресса. Он состоит из ряда круглых рам, укрепленных на горизонтальном стержне, который при вращении вводит рамы в фильтрпресс или выводит их из него (рис. 11-94 и 11-95). Поверхность плиты такого фильтрпресса представляет собой дренажное сито, на котором фильтровальная ткань укрепляется при помощи обруча. Фильтрпресс герметизируется посредством подачи сжатого воздуха в пространство между поршневой и цилиндрической плитами, которые при этом отходят одна от другой и плотно прижимаются к соответствующим рамам. В конце цикла аппарат открывается путем снятия давления между поршневой и цилиндрической плита-

ми и использования небольшого вакуума (создаваемого в воздушной линии вытяжным вентилятором), в результате чего плиты сближаются. Затем рамы могут быть выведены из фильтрпресса для освобождения их от осадка. Цикл работы можно регулировать, сокращая время простоев до нескольких минут.

Фильтрпрессы «Эймко — Баруэлл» изготавливаются с рамами диаметром 65 и 80 см. Толщина рам колеблется в пределах 2,5—7,5 см. Стандартные фильтрпрессы имеют 7, 10, 14, 20 или 30 рам. Поверхность фильтрования и вместимость по осадку для фильтрпресса, имеющего 30 рам диаметром 65 см и толщиной 5 см,

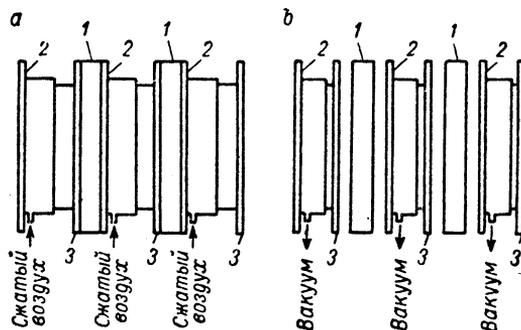


Рис. 11-95. Плиты и рамы фильтрпресса «Эймко — Баруэлл»:

а — положение рам и плит после подачи сжатого воздуха, воздействующего на систему цилиндрической и поршневой плит с целью герметизации фильтрпресса (сжатый воздух поддерживает плиты в тесном соприкосновении с рамами, создавая достаточное уплотнение); б — положение рам и плит после прекращения действия сжатого воздуха в конце цикла фильтрования (в воздушной линии создается разрежение, обуславливающее вхождение поршня в цилиндр, в результате чего заполненные осадком рамы могут быть выведены из фильтрпресса вращением стержня); 1 — рама; 2 — цилиндрическая плита; 3 — поршневая плита.

равны соответственно 20 м² и 0,5 м³; аналогично для фильтрпресса с рамами диаметром 80 см эти величины составляют 30 м² и 0,8 м³. Фильтрпрессы «Эймко — Баруэлл» применимы для любых процессов фильтрования, которые могут быть проведены на обычном плиточно-рамном фильтрпрессе при уменьшенном давлении. Особенно рекомендуется использовать их для быстро фильтрующихся материалов.

Преимущества фильтрпрессов «Эймко — Баруэлл»; высокая производительность, низкие затраты труда, возможность полного автоматического регулирования, хорошие условия промывки осадка и предохранения фильтровальной ткани от изнашивания. Недостатками их являются высокая стоимость, сложность и фиксированные размеры поверхности фильтрования (плиты и рамы не могут быть выключены или добавлены как в обычный фильтрпресс).

Реверсивный фильтр Гранжера, предназначенный для реверсивного фильтрования, состоит из ряда параллельных рам, разделенных фильтровальными перегородками (обычно из очень плотной ткани) и поддерживаемых металлическими стержневыми креплениями при помощи скоб из нержавеющей стали. Рамы изготавливаются из прозрачной пластмассы и рассчитываются на максимальное давление 10 ат при 23°С (при более высокой температуре их прочность уменьшается). Конструкция реверсивного фильтра

пояснена рис. II-96. Схема установки для реверсивного фильтрования дана на рис. II-97.

Исходная суспензия, поступающая в чередующиеся рамы фильтра Гранжера, разделяется при помощи

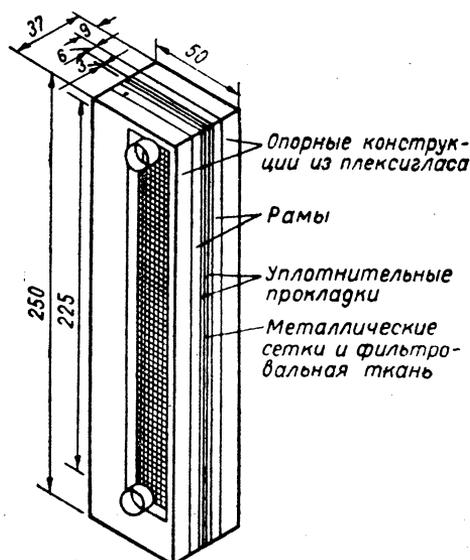


Рис. II-96. Экспериментальный фильтр Гранжера.

фильтровального материала, находящегося с обеих сторон рамы. Фильтрат заполняет смежные рамы и отводится из них через верхние каналы. Когда образуется осадок заданной толщины, направление фильтрования меняют на обратное: теперь исходная суспензия направляется

в те рамы, в которых собирался фильтрат, осадок же откладывается на противоположной стороне фильтровальной перегородки. Обратный поток фильтрата смывает осадок, образовавшийся в предыдущем цикле, и полученная сгущенная суспензия уходит через нижние каналы. После удаления всей сгущенной суспензии чистый фильтрат начинают отводить через верхние каналы до тех пор, пока снова не образуется осадок. Такое реверсивное фильтрование позволяет работать с очень

тонким слоем осадка (рекомендуемый максимум 3 мм, возможны также слои толщиной 1,5 мм) и, следовательно, с высокими скоростями фильтрования. На рис. II-98 приведены данные, полученные при обычном и реверсивном фильтровании 0,8%-ной суспензии асбестина при давлении 2,1 ат.

Преимущества фильтра Гранжера: простота; невысокая стоимость; низкие эксплуатационные расходы; возможность автоматического регулирования и визуального наблюдения за происходящими внутри аппарата явлениями; малая занимаемая площадь. К недостаткам можно отнести: ограниченность применения (он используется только в тех случаях, когда осадок можно смывать или когда допустима разгрузка осадка в

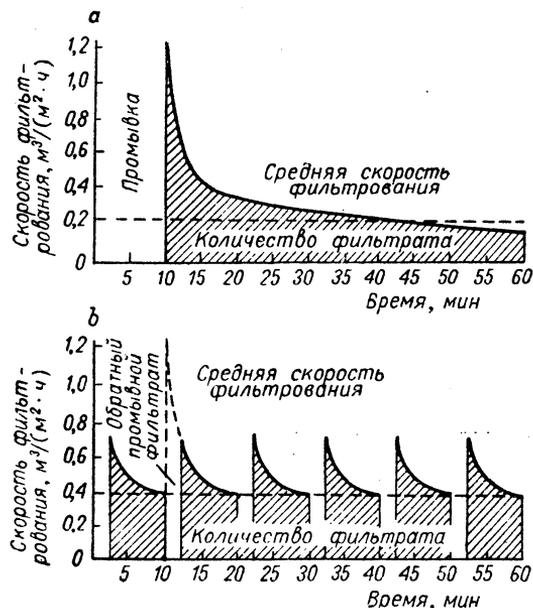


Рис. II-98. Скорости фильтрования в обычном и реверсивном фильтрах:

а — обычное фильтрование на стандартном листовом фильтре (продолжительность одного цикла 60 мин); б — реверсивное фильтрование (продолжительность каждого из 6 полуциклов 10 мин).

виде сгущенной суспензии); возможность загрязнения фильтрата (фильтрат движется в тех зонах, где прежде находилась исходная суспензия); сложность определения оптимального момента прекращения обратной промывки.

Фильтры Гранжера собираются из отдельных рам ($600 \times 160 \times 20$ мм, поверхность фильтрования $0,062$ м² на одной стороне рамы) и могут иметь до 60 камер. Скорость фильтрования может достигать $0,24$ м³/(м²·мин).

В фильтре «Ридко» с коротким циклом работы процесс фильтрования также протекает при небольшой толщине и низком сопротивлении осадка. Основой фильтра является единичная плиточно-рамная секция. Отделяющаяся от плиты рама снабжена перемещающим механизмом. Рама прижимается к бесконечной ленте фильтровальной ткани, которая покрывает плиту, и поддерживается в этом положении поршнем под действием сжатого воздуха. Резиновая прокладка в местах соприкосновения поверхностей позволяет работать при давлениях до 10 ат без утечки жидкости.

Цикл фильтрования схематично показан на рис. II-99. После фильтрования рама отводится в сторону и секция открывается. Фильтровальная ткань с образовавшимся осадком перемещается по замкнутому пути,

вынося осадок вниз к небольшому ролику, при помощи которого осадок отделяется от ткани. При этом очищенная часть ткани снова переходит на плиту и

или сползание осадка. Листы поддерживаются в фильтре сверху, снизу или по центру специальными устройствами, но в любом случае могут быть извлечены из

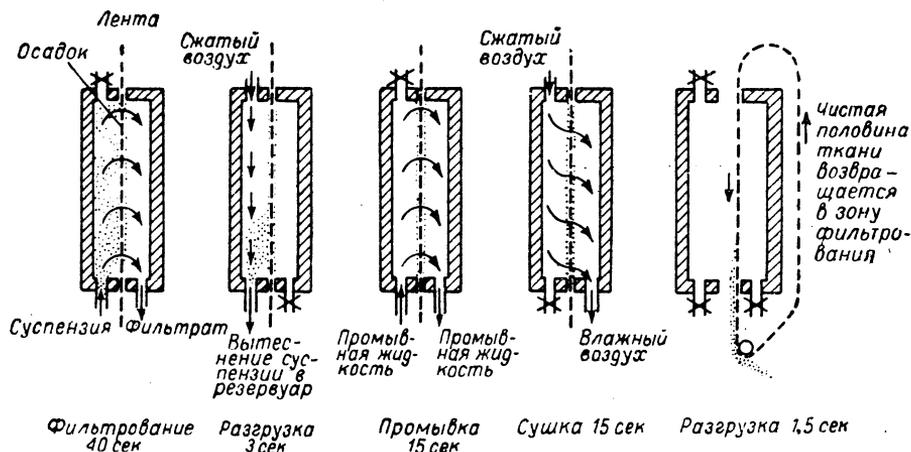


Рис. II-99. Цикл фильтрования на фильтре «Ридко».

рама опять прижимается к плите. Полный цикл работы может продолжаться менее 2 мин. Таким образом, ряд коротких циклов на фильтре «Ридко» дает высокую среднюю скорость фильтрования.

Преимущества фильтра «Ридко» с коротким циклом работы: высокая производительность, возможность автоматизации процесса, небольшая затрата труда, малая занимаемая площадь, а также возможность фильтрования и промывки твердых веществ, которые образуют осадки с большим удельным сопротивлением. Недостатки таких фильтров: высокая стоимость, небольшая поверхность фильтрования и сложность конструкции.

Фильтр «Ридко» с сухой выгрузкой осадка имеет две плиты и две рамы с общей поверхностью фильтрования 0,15 м². Производительность его равна производительности обычного фильтрпресса, имеющего в 30 раз большую поверхность фильтрования.

Листовые фильтры, работающие под давлением. Такой фильтр представляет собой комплект плоских фильтровальных элементов (листов), установленных вертикально в корпусе, рассчитанном для работы под давлением. Листы могут быть круглыми, прямоугольными или со сторонами в виде дуг. Корпус имеет форму цилиндра с горизонтальной или вертикальной осью (в соответствии с этим фильтр называется горизонтальным или вертикальным). В вертикальных фильтрах листы иногда заменяют цилиндрическими трубчатыми элементами.

Фильтровальный лист состоит из прочной сетчатой перегородки или желобчатой плиты, на которых укрепляют ткань (мешки) или тонкую проволочную сетку. Мешки зашивают или закрывают на «молнию», а края соединяют скобами или зажимами. Тонкие проволочные сетки часто применяют при фильтровании суспензий с использованием вспомогательных веществ (например, диатомита). Сетки могут быть укреплены с помощью сварки, заклепок, болтов или чеканки. Листы можно полностью изготовить из пластмассы. Фильтровальная перегородка, независимо от материала, из которого она сделана, должна быть туго натянута, так как значительный ее прогиб может вызвать растрескивание

корпуса. На рис. II-100 показан лист из проволочной сетки, укрепленный внизу и покрытый слоем предварительно нанесенного вспомогательного вещества.

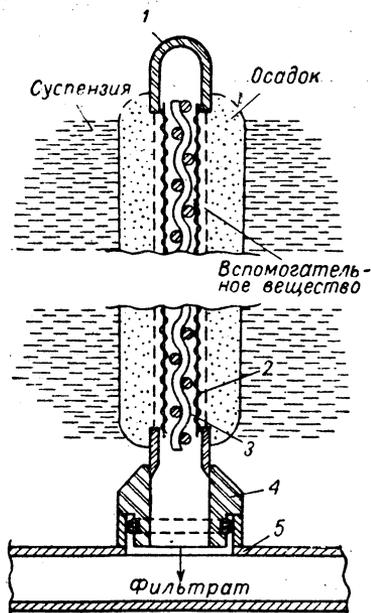


Рис. II-100. Фильтровальный лист из проволочной сетки, покрытый слоем предварительно нанесенного вспомогательного вещества: 1 — зажим; 2 — фильтровальная ткань; 3 — проволочная сетка; 4 — опорное устройство; 5 — трубопровод.

Листовые фильтры, работающие под давлением, действуют периодически. Корпус, в котором находятся

листы, закрывают и подают в него под давлением исходную суспензию. Фильтрация происходит на поверхности листов. Фильтрат удаляется через индивидуальные коллекторный трубопровод. Фильтрация продолжают до тех пор, пока осадок не достигнет допустимой толщины (переполнение фильтра вызывает затруднения в последующих стадиях процесса — промывке и разгрузке). Решение об окончании фильтрации принимается на основании имеющегося опыта: при фильтрации под постоянным давлением момент окончания устанавливается приблизительно по скорости фильтрации, а при фильтрации с постоянной скоростью — по величине падения давления. Может быть использован также указатель толщины осадка (рис. II-101). Та-

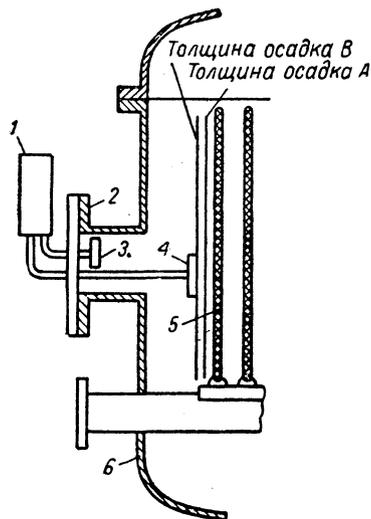


Рис. II-101. Указатель толщины осадка:

- 1 — переключатель, действующий при возникновении разности давлений; 2 — штуцер диаметром 100 мм; 3 — воспринимающий элемент А; 4 — воспринимающий элемент В; 5 — фильтровальный лист; 6 — корпус фильтра.

кой прибор как бы «ощущает» толщину осадка на контрольном листе. Когда осадок начинает окружать воспринимающий элемент В, давление на этот элемент уменьшается и становится ниже давления в процессе фильтрации. Разность давлений на воспринимающие элементы А и В является причиной возникновения импульса, который вызывает сигнал или приводит в действие автоматический переключатель.

Для промывки осадка остаток суспензии удаляют из фильтра сжатым воздухом и корпус наполняют промывной водой. Если осадок склонен к растрескиванию во время продувки воздухом, остаток суспензии необходимо постепенно вытеснить промывной водой; в этом случае исключается обезвоживание осадка продувкой сжатым воздухом. После завершения стадий фильтрации и промывки осадок выгружается одним из указанных ниже способов.

В горизонтальных листовых фильтрах, работающих под давлением, продольные прямоугольные листы размещают параллельно оси корпуса по его вертикальным хордам, а поперечные листы — параллельно крышке. В первом случае листы уменьшаются по высоте по мере удаления от оси корпуса, во втором они одинаковы. В различных случаях листы поддерживаются крышкой фильтра, самостоятельным каркасом, а каждый лист в отдельности — корпусом или коллекторным трубопроводом для фильтрата. Горизонтальные фильтры особенно удобны при сухом способе удаления осадка.

Примером фильтра с продольными листами является фильтр Келли (рис. II-102). Комплект листов из-

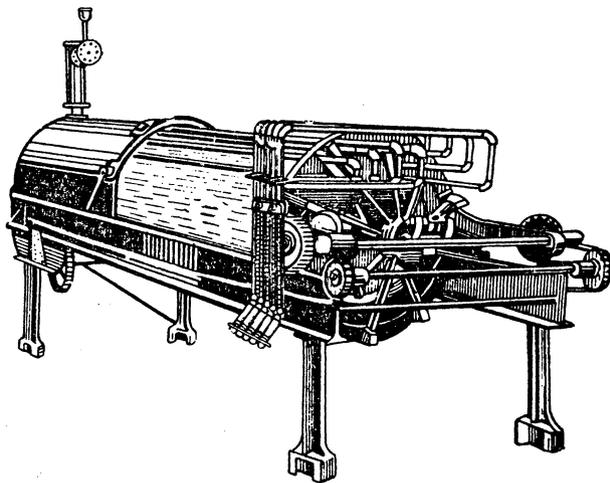


Рис. II-102. Фильтр Келли.

влекается из него при отодвигании крышки по рельсам. Такой фильтр может работать при давлениях до 18 ат, в то время как большинство листовых фильтров рассчитаны на работу при давлении, не превышающем 4 ат. Фильтр Келли может быть теплоизолирован или снабжен рубашкой для нагревания или охлаждения в процессе фильтрации.

Имеется несколько разновидностей листовых фильтров с поперечными листами. В фильтре Свитленда круглые листы размещены в чугунном корпусе с разъемным соединением, дающим возможность открывать фильтр, откидывая вниз уравновешенную грузом нижнюю половину корпуса (рис. II-103). Корпус фильтра может быть покрыт нержавеющей сталью или другим материалом, стойким к воздействию агрессивных сред. Листы скреплены с верхней частью корпуса и присоединены в отдельности к внешнему коллекторному трубопроводу посредством смотровых стекол, обеспечивающих наблюдение за действием каждого листа, и кранов, позволяющих выключать из работы любой неисправный лист. При сухом способе удаления осадка, осуществляемом обратным током воздуха, фильтр открывается. Удаление осадка мокрым способом может быть достигнуто при закрытом фильтре. Промывное сопло, поворачивающееся на 120° и одновременно перемещающееся в продольном направлении, расположено над каждым листом и обеспечивает удаление осадка потоком поступающей с большой скоростью воды.

Некоторые горизонтальные листовые фильтры, работающие под давлением, имеют круглые листы, укреп-

ленные на осевом трубопроводе для удаления фильтрата и вращающиеся во время фильтрования.

В фильтре Валле (рис. II-104) листы совершают ~ 1 об/мин, что способствует образованию осад-

присоединяемых к верхнему или нижнему коллекторному трубопроводу для удаления фильтрата. Один из таких фильтров представлен на рис. II-105. Ниже основного комплекта листов показан дополнительный

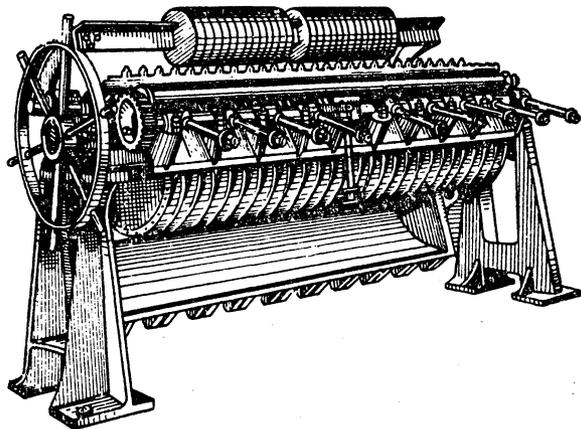


Рис. II-103. Фильтр Свитленда.

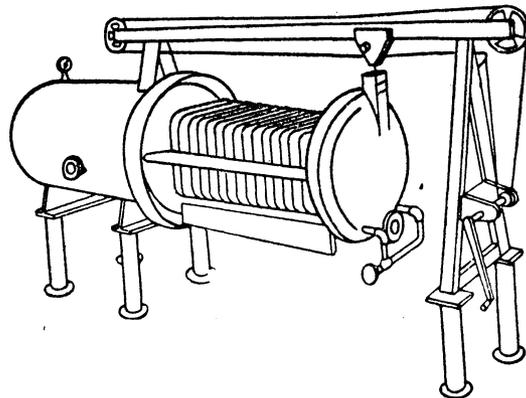


Рис. II-105. Листовой фильтр типа «Ниагара Н».

ка равномерной толщины и плотности. Корпус, имеющий продольное разъемное соединение, можно не открывать даже при разгрузке осадка сухим способом.

лист для разделения остатка суспензии. Этот фильтр, как и фильтр Келли, особенно удобен при удалении осадка сухим способом. После выдвигания комплекта фильтровальных листов осадок выгружается в бункер,

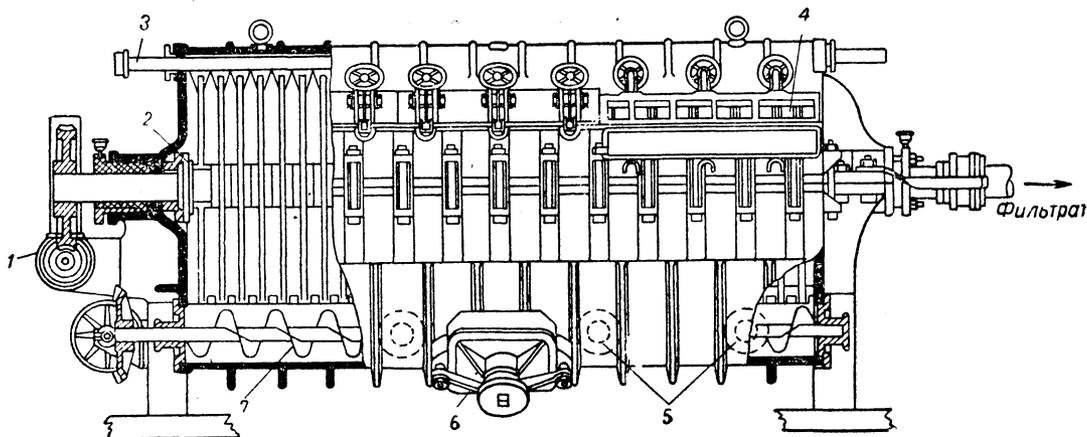


Рис. II-104. Фильтр Валле:

1 — червячная передача; 2 — муфта; 3 — труба для жидкости, смывающей осадок; 4 — смотровой люк; 5 — входные штуцеры; 6 — разгрузочный люк; 7 — шнек.

Осадок или густая вторичная суспензия могут удаляться из фильтра шнековым транспортером, расположенным в нижней части корпуса по всей его длине. Удаление осадка мокрым способом производится под действием стационарных струй промывной воды, направленных навстречу вращающимся листам. В других конструкциях (например, фильтры «Рото-джет» и «Авто-джет») листы неподвижны во время фильтрования, но могут вращаться (~ 3 об/мин) при смывании осадка.

Для проведения процессов фильтрования с использованием вспомогательных веществ, например, диатоми-та, широко применяются простые горизонтальные конструкции с выдвигаемым комплектом листов (круглых, прямоугольных или с дугообразными краями),

желоб или вагонетку. Плита, замыкающая комплект, захватывает при своем движении осадок, который выпал до выдвигания листов.

Вертикальные фильтры, работающие под давлением (рис. II-106), имеют вертикально расположенные в цилиндрическом корпусе параллельные прямоугольные листы различной ширины. Опорой для листов часто служит коллекторный трубопровод для фильтрата. Листы, присоединяемые к этому трубопроводу при помощи кольцевого уплотнительного устройства, могут быть подняты из фильтра для осмотра и очистки. В нижней части корпуса обычно устанавливают дополнительный фильтровальный лист, что позволяет практически полностью разделить остаток суспензии в конце цикла. Для удаления осадка сухим способом дно

делают подвижным. При отводе дна осадок падает в ящик или бункер. Однако такие фильтры более приспособлены для удаления осадка мокрым способом. В промышленности их очень широко применяют для фильтрования с использованием вспомогательных веществ.

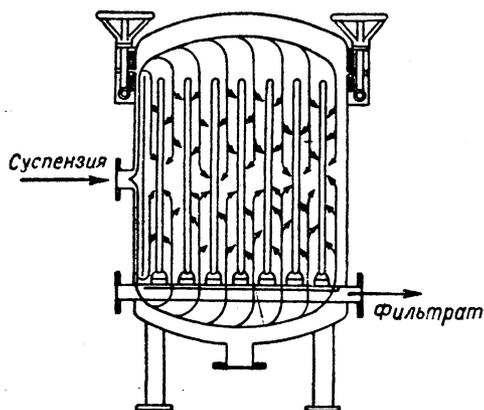


Рис. II-106. Вертикальный листовой фильтр, работающий под давлением.

Вместо плоских листов могут быть использованы цилиндрические трубы, укрепленные на коллекторном трубопроводе для фильтрата (рис. II-107). Трубы изготовляют из проволоочной сетки, пористых материалов (керамика, уголь, пластмасса, металл) или плотно навитой проволоки клинообразного сечения; такие трубы могут действовать самостоятельно как фильтровальные перегородки, но могут быть также покрыты тканью. Вертикальные фильтры с цилиндрическими трубами применяют почти исключительно для фильтрования с диатомитом. Осадок из них почти всегда удаляют мокрым способом с помощью обратного потока жидкости, иногда в сочетании с механическим воздействием на фильтровальные элементы или отложившийся осадок.

Рис. II-107. Вертикальный трубчатый фильтр, работающий под давлением, с фильтрующей перегородкой из пористой керамики.

Преимущества листовых фильтров, работающих под давлением: хорошая приспособляемость к изменяющимся условиям производства; небольшие затраты труда; простота конструкции; возможность хорошей промывки на фильтре. Недостатки таких фильтров: необходимость постоянного наблюдения за осадком; невозможность получить такой же сухой осадок, как в фильтрпрессе; расслаивание суспензии при фильтровании и образование неоднородного по

плотности осадка при неподвижных листах; невысокое предельное давление (4 ат) для большинства фильтров. В листовых фильтрах, работающих под давлением, и в фильтрпрессах разделяются примерно одинаковые суспензии. Более широко по сравнению с фильтрпрессами листовые фильтры используются для фильтрования с применением диатомита. Листовые фильтры мо-

гут быть предпочтительнее фильтрпрессов также в тех случаях, когда однородность суспензии позволяет осуществлять фильтрование при постоянных условиях, или когда желательна полная промывка с минимальным

ТАБЛИЦА II-11

Характеристики вертикальных листовых фильтров, работающих под давлением

Диаметр корпуса (резервуара), мм	Поверхность фильтрования, м ²	Число листов	Расстояние между листами, мм	Вместимость по осадку, м ³	Объем резервуара, м ³	Общая высота, м
450	1,9	5	75	0,042	0,151	1,83
	2,3	5	75	0,056	0,170	1,98
	3,3	7	50	0,056	0,170	1,98
600	4,2	7	75	0,099	0,303	2,13
	5,6	8	50	0,099	0,303	2,13
	6,5	8	50	0,11	0,360	2,13
750	7,0	9	75	0,17	0,492	2,13
	8,8	9	75	0,23	0,492	2,29
	9,8	12	50	0,18	0,492	2,13
900	12,0	12	50	0,23	0,492	2,29
	10,7	11	75	0,27	0,719	2,29
	13,0	11	75	0,31	0,795	2,44
1050	14,4	14	50	0,27	0,719	2,29
	17,7	14	50	0,34	0,795	2,44
	21,4	13	75	0,54	1,25	2,74
1200	25,1	17	50	0,48	1,14	2,60
	29,3	17	50	0,57	1,25	2,74
	34,4	16	75	0,88	1,89	2,90
	42,0	21	50	0,79	1,67	2,74
	47,5	21	50	0,91	1,89	2,90

ТАБЛИЦА II-12

Характеристики горизонтальных листовых фильтров, работающих под давлением

Диаметр корпуса (резервуара), мм	Поверхность фильтрования, м ²	Число листов	Расстояние между листами, мм	Вместимость по осадку, м ³	Объем резервуара, м ³	Общая длина, м
900	4,8	6	100	0,18	0,795	2,74
	5,6	7	75	0,14	0,795	2,74
	8,0	10	100	0,31	1,060	3,66
	9,6	12	75	0,24	1,060	3,66
	12,0	15	100	0,46	1,041	4,57
	15,2	19	75	0,38	1,041	4,57
1200	14,4	18	100	0,55	1,647	5,33
	20,0	25	75	0,51	1,647	5,33
	23,4	15	100	0,89	2,593	4,57
	29,7	19	75	0,75	2,593	4,57
	32,7	21	100	1,25	3,293	5,79
	42,2	27	75	1,07	3,293	5,79
1500	46,8	30	100	1,78	4,372	7,62
	61,0	39	75	1,54	4,372	7,62
	67,0	27	100	2,55	6,284	7,01
	77,0	31	100	2,93	7,155	7,92
	87,0	35	75	2,20	6,284	7,01
	99,0	40	75	2,52	7,155	7,92
	109,0	44	100	4,16	9,500	10,51
	142,0	57	75	3,61	9,500	10,51

ТАБЛИЦА II-13

Характеристики трубчатых фильтров, работающих под давлением

Производительность, м ³ /ч	Поверхность фильтрации, м ²	Объем вспомогательного вещества, приходящийся на 1 мм его слоя, м ³ · 10 ³	Вместимость по осадку, м ³	Габариты, м
3,78	3,5	2,4	0,13	0,61 × 0,58 × 1,93
5,30	4,6	3,6	0,21	0,74 × 0,71 × 1,93
7,57	6,5	4,8	0,30	0,94 × 0,91 × 1,93
11,4	9,8	7,2	0,39	0,94 × 0,91 × 2,28
18,9	15,3	11,9	0,60	1,12 × 1,09 × 2,38
26,5	22,3	16,7	0,89	1,27 × 1,24 × 2,56
37,8	31,6	24,0	1,25	1,47 × 1,45 × 2,60

расходом промывной жидкости, или когда выделяющиеся пары обуславливают необходимость герметизации фильтра.

Поверхность фильтрования листовых фильтров, работающих под давлением, колеблется от 0,09 м² (лабораторный фильтр) до 56 м² (вертикальный фильтр) и 148 м² (горизонтальный фильтр). Расстояние между листами составляет 50—150 мм, но меньше 75 мм бывает редко, так как между поверхностями осадков должно быть 12—25 мм. Когда вместо листов используются трубы, максимальная поверхность уменьшается (~30 м²). В табл. II-11—II-13 приведены типовые данные для листовых и трубчатых фильтров, работающих под давлением.

Фильтр с горизонтальными плитами. Этот фильтр, предназначенный для работы под давлением, состоит из герметичного цилиндрического корпуса и расположенных в нем одна над другой горизонтальных круглых дренажных плит с перфорированными опорными перегородками (рис. II-108). Такой фильтр напоминает как бы вертикально установленный фильтрпресс, имеющий одну дренажную поверхность на каждой плите. В некоторых специальных конструкциях фильтрующими являются обе поверхности, но обычно используется только верхняя сторона. Комплект плит можно извлекать из корпуса как одно целое для очистки и стерилизации. Некоторые фильтры такого типа рассчитаны на давление до 20 ат. Фильтровальную среду (бумагу или ткань с предварительно нанесенным слоем диатомита или без него) размещают на каждой плите, как в лабораторной воронке Бюхнера. Суспензия под давлением подводится к плитам через центральный или кольцевой распределительный канал, и фильтрование продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная толщина осадка или скорость процесса вследствие увеличения сопротивления осадка не достигнет допустимого предела. В некоторых конструкциях на дне фильтра предусмотрена плита для разделения остатка суспензии (рис. II-108). В любом случае после прекращения фильтрования в фильтре задерживается небольшое количество суспензии, которое может быть направлено на фильтровальную перегородку промывной водой или сжатым воздухом. Промывка и продувка осуществляются так же, как в листовых фильтрах, работающих под давлением; раз-

ница заключается только в том, что в данном случае нет необходимости поддерживать давление воздуха в корпусе. Осадок выгружается при извлечении комплекта плит из корпуса.

Такие фильтры обеспечивают получение осадка удовлетворительной структуры и возможность его эффективной промывки. Наиболее часто их используют для получения небольших количеств осадка или при неравномерном поступлении суспензии (например, в качестве дополнительного фильтра), а также в тех случаях, когда существенное значение имеют стерильные условия работы (например, в пищевой и фармацевтической промышленности).

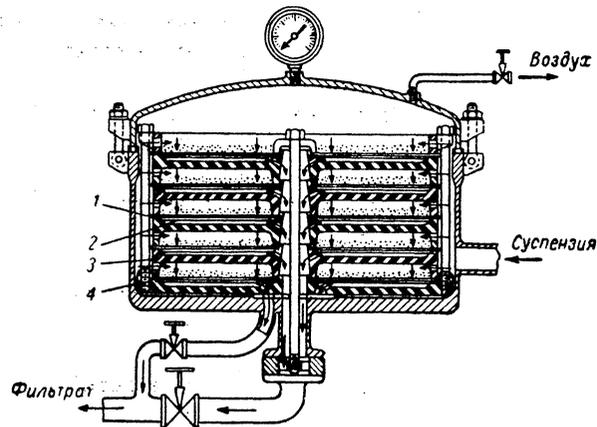


Рис. II-108. Фильтр Спарклера с горизонтальными плитами:

1 — фильтровальная бумага, ткань или сетка; 2 — перфорированная опорная перегородка; 3 — фильтровальная плита; 4 — плита для разделения остатка суспензии.

Диаметр плит в фильтрах рассматриваемого типа равен 200—850 мм. В одном фильтре может быть до 24 плит, что соответствует поверхности фильтрования ~14 м². В качестве конструкционного материала может быть использован любой металл, поддающийся механической обработке. Когда нет острой необходимости в герметичности, можно использовать более дешевые фильтры с поверхностью фильтрования до 37 м². Такой фильтр состоит из комплекта плит, уплотненных прокладками на соприкасающихся поверхностях (как это делается в фильтрпрессе) и соединенных внутренними каналами для суспензии и фильтрата.

В фильтре Спарклера модели HR горизонтальные плиты после завершения фильтрования могут поворачиваться на 90°, что позволяет разгружать осадок, не открывая фильтра. Удаление осадка осуществляется с помощью внутреннего встряхивающего устройства или механических вибраций. Осадок выводится из фильтра продольным шнековым конвейером, расположенным на дне корпуса.

Промышленный трубчатый фильтр. Этот фильтр имеет одну или несколько (до 36) горизонтальных труб, поддерживаемых поперечной трубчатой решеткой в цилиндрическом корпусе, ось которого параллельна осям труб. Концы труб, более удаленные от крышки корпуса и распределительной камеры, закрыты куполообразным выступом. Лист фильтровальной бумаги свертывают и вводят в каждую трубу, образуя таким образом фильтровальную прокладку, которая удерживается на стенках трубы куполообразным выступом у

глухого конца и коническим уплотнительным кольцом в открытом конце.

Суспензия поступает под давлением в распределительную камеру между крышкой корпуса и трубчатой решеткой, откуда она попадает в трубы и заполняет их (рис. II-109). Фильтрат движется в радиальном направлении через фильтровальную бумагу и перфорированную стенку каждой трубы в межтрубное пространство и удаляется оттуда через штуцер. Осадок откладывается на фильтровальной бумаге. Фильтрация заканчивается, когда трубы заполняются осадком или поры фильтрующей среды закупориваются в такой степени, что скорость фильтрации становится очень

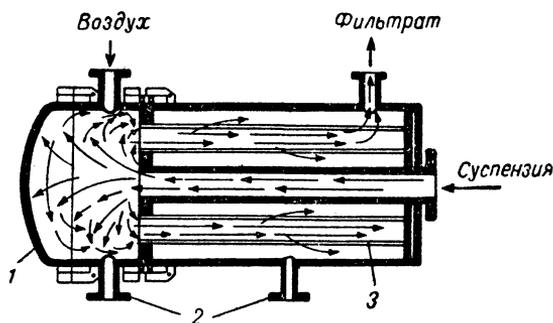


Рис. II-109. Промышленный трубчатый фильтр:
1 — крышка корпуса; 2 — дренажные штуцеры; 3 — перфорированная труба с фильтровальным материалом.

низкой (при постоянном давлении) или давление возрастает до установленного предела (при постоянной скорости). Если осадок не заполняет трубы полностью, он может быть промыт и продут воздухом. Крышка фильтра имеет шарнирное соединение, что обеспечивает легкий доступ к трубчатой решетке и устьям труб. «Стержни» осадка выгружают, снимая уплотнительные кольца и извлекая фильтровальную бумагу из каждой трубы. Так как трубы уплотнены в решетке кольцевыми прокладками, их можно легко вынимать из фильтра для осмотра и ремонта.

Преимущества трубчатого фильтра: компактность, возможность использования недорогой и легко заменяемой фильтрующей среды, возможность прекращения цикла фильтрации и удаления исходной суспензии из корпуса в любой момент времени без потерь осадка, быстрое удаление осадка сухим способом, доступность внутренних частей фильтра, приспособляемость к изменяющимся условиям проведения процесса. Недостатки: ручная разгрузка и замена фильтрующей среды, относительно небольшой объем для образования осадка, осаждение тяжелых твердых частиц в распределительной камере и в устьях труб. Обычно такой фильтр используется в промышленности для извлечения тонкодисперсных твердых частиц, которые не могут быть задержаны в предшествующем процессе фильтрации на другом оборудовании; применяют его также в ползаводских и опытных установках. Поверхность фильтрации составляет 0,22—8 м².

Фильтр Роднея Ханта, работающий под давлением. Этот фильтр состоит из сосуда, рассчитанного на работу под давлением, и комплекта круглых фильтровальных элементов (плит), укрепленных на осевой дренажной трубе и разделенных дистанционными шайбами (рис. II-110). Фильтровальный материал обычно

служит ткань или проволочная сетка. Фильтр может работать со слоем предварительно нанесенного вспомогательного вещества или без него.

Во время фильтрации сосуд наполняется исходной суспензией, и фильтрат, проходя через плиты, удаляется по осевой трубе. Осадок образуется на верхней стороне плит. После фильтрации сосуд освобождается от оставшейся исходной суспензии, и при необходимости осадок может быть промыт, продут и просушен. Во влажном или сухом состоянии осадок удаляется с плит под действием центробежной силы. Иногда разгрузку осуществляют обратным потоком воды или растворителя, поступающим через дренажную трубу и плиты.

Преимущества рассматриваемого фильтра такие же, как и фильтра с горизонтальными плитами. Дополнительно следует отметить возможность разгрузки осадка без открывания фильтра, что уменьшает затраты труда, а также возможность автоматического регулирования фильтра. Недостатки фильтра Роднея Ханта: сложность, высокая стоимость. Размеры этих фильтров соответствуют поверхностям фильтрации 0,18—23,2 м².

Фильтр Берта. Такой фильтр (рис. II-111) представляет собой вращающийся барабан периодического действия, работающий под давлением и по внешнему

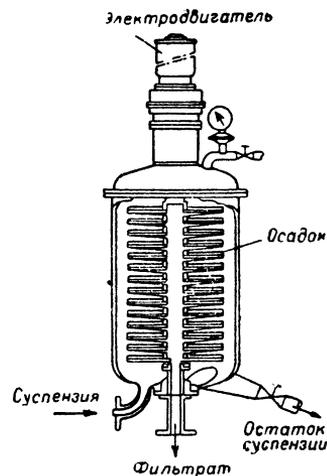


Рис. II-110. Фильтр Роднея Ханта, работающий под давлением (фильтр Фунда).

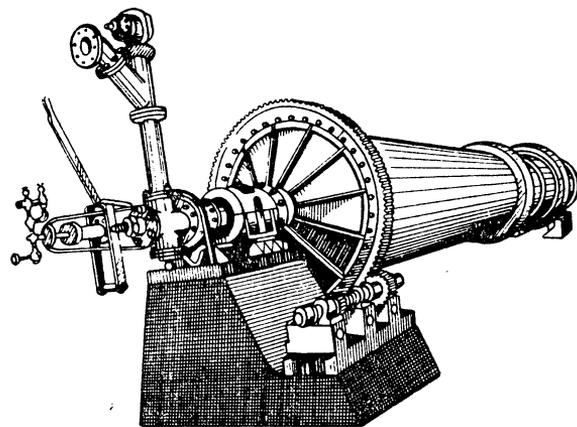


Рис. II-111. Фильтр Берта.

виду напоминающий печь для обжига цемента. Барабан имеет полую цапфу и шестерню с приводом со стороны поступления исходной суспензии и роликовую опору на противоположном конце. Он приводится во вращение посредством зубчатой передачи, причем скорость вращения изменяется в зависимости от свойств

разделяемой суспензии. Внутренняя поверхность барабана снабжена сточными каналами, покрытыми фильтровальной тканью. Каждый канал имеет один или несколько отводов, проходящих через стенку барабана; фильтрат, выделяющийся по каплям из каждой полости отверстий (по всей окружности барабана) собирается в неподвижные желоба. Задняя сторона барабана закрыта чугунной крышкой с приспособлением для быстрого раскрытия при разгрузке.

Разделяемая суспензия поступает через полю ципфу в головную часть барабана. Когда загружено требуемое количество жидкости, доступ ее прекращается и в барабан подают сжатый воздух. Давление воздуха (поддерживаемое постоянным) необходимо для продавливания жидкости через фильтр, а также для образования и сохранения осадка на поверхности фильтрования. Благодаря вращению барабана получается совершенно однородный осадок. Если на поверхности осадка образуются трещины, они закрываются, как только осадок во время вращения будет вновь покрыт исходной суспензией. Во время разгрузки поступление сжатого воздуха прекращают, подают воду и открывают разгрузочное устройство, продолжая вращать барабан.

Фильтр Берта используют в основном в металлургической промышленности для очистки растворов сернокислого электролита, применяющегося в процессе электролитического рафинирования цинка.

Фильтры непрерывного действия, работающие под давлением

Барабанные и дисковые фильтры. Основными фильтрами непрерывного действия, работающими под давлением, являются барабанные и дисковые фильтры. По своему устройству они аналогичны барабанным и дисковым вакуум-фильтрам, с той лишь разницей, что барабан и диски заключены в герметический кожух, рассчитанный на работу под давлением. Последующее описание основных типов вакуум-фильтров непрерывного действия (стр. 197) применимо и к рассматриваемым фильтрам.

Основное отличие фильтров, работающих под давлением, от вакуум-фильтров состоит в способе удаления осадка. В вакуум-фильтрах осадок находится под атмосферным давлением и снимается с фильтровальной поверхности в резервуар, бункер или лоток. В фильтрах, работающих под давлением, осадок снимается и транспортируется сначала в зоне полного давления фильтрования, а затем для выгрузки из кожуха фильтра он должен быть выведен в зону атмосферного давления. Некоторые осадки можно непрерывно удалять из системы, находящейся под давлением, при помощи самоуплотняющегося шнекового транспортера, однако большинство осадков сначала разгружается в сборник, находящийся под давлением, а затем — в сборник под атмосферным давлением. Использование двух таких попеременно работающих сборников и шлюзового затвора дает возможность удалить осадок без прекращения работы, но значительно нарушает непрерывность процесса.

Максимальное давление в фильтрах непрерывного действия несколько ниже, чем в фильтрах периодического действия. В наиболее крупных барабанных и дисковых фильтрах непрерывного действия давление не должно превышать 3 ат. Даже при таких относительно низких давлениях в случае малосжимаемых

осадков рассматриваемые фильтры имеют более высокую производительность по сравнению с вакуум-фильтрами.

Преимуществами барабанных и дисковых фильтров непрерывного действия, работающих под давлением, являются экономия труда, равномерность поступления материала, большая, чем в вакуум-фильтрах разность давлений, а также возможность разделения суспензий с летучей жидкой фазой, не допускающей фильтрования под вакуумом. Из недостатков этих фильтров необходимо отметить сложность их конструкции, затруднения с выгрузкой осадка, высокую стоимость (несколько превышающую стоимость вакуум-фильтров, не закрытых кожухом), повышенные эксплуатационные расходы и ограничение их действия относительно низкими давлениями. Используются такие фильтры в процессах с устойчивыми, достаточно большими расходами суспензий, для разделения которых экономически целесообразно иметь давление более 1 ат.

Поверхность фильтрования барабанных и дисковых фильтров равна 28—37 м², размеры барабанов и дисков такие же, как у вакуум-фильтров непрерывного действия.

Фильтры с предварительно нанесенным слоем вспомогательного вещества. Фильтры со слоем вспомогательного вещества могут работать под давлением или под вакуумом в условиях длительного повторяющегося цикла (поэтому фильтрами непрерывного действия их можно называть лишь условно). Ввиду того, что оба типа таких фильтров лишь незначительно различаются (величиной давления и наличием кожуха у фильтров, работающих под давлением), описание последних здесь не приводится. Описание же фильтров, работающих под вакуумом, дано ниже.

Поверхность фильтрования аппаратов, действующих под давлением не превышает 15 м².

Сгуститель шламов «Картер — Эдко». Это устройство (рис. II-112) используется для сгущения первичных шламов сточных вод (концентрация твердых веществ 2%) до мягкого осадка, содержащего 70% воды. Оно может быть отнесено к числу разновидностей фильтров непрерывного действия, работающих под давлением, хотя по принципу действия его следует рассматривать как сочетание гравитационного сгустителя и давяльного пресса. Исходная суспензия поступает непрерывно на сгуститель «Рото-Плаг», представляющий собой вращающийся барабан с перфорированными стенками, покрытыми фильтровальным материалом. В сгустителе происходит частичное обезвоживание суспензии. Жидкость, проходит через фильтровальный материал, а слегка сгущенная суспензия сворачивается в валик, который по мере поступления в сгуститель новых порций суспензии увеличивается в размере и непрерывно сгущается под действием силы тяжести. Когда вращающийся на внутренней поверхности барабана валик достигнет некоторого критического размера, он начинает вытягиваться в направлении своей оси и, разрываясь, падает через край барабана сгустителя в расположенный ниже пресс-фильтр «Эдко». Последний состоит из ряда роликов, имеющих навстречу друг другу и сдавливают поступающий сверху шлам, вытесняя дополнительное количество воды; влажный отфильтрованный осадок продавливается вниз в виде ленты. В сгустителе концентрация шлама по сухому остатку увеличивается от 2 до 15%, а пресс-фильтр повышает ее затем до 27—32%. Описанное устройство имеет производительность от 1 до 8 т сухого вещества в сутки.

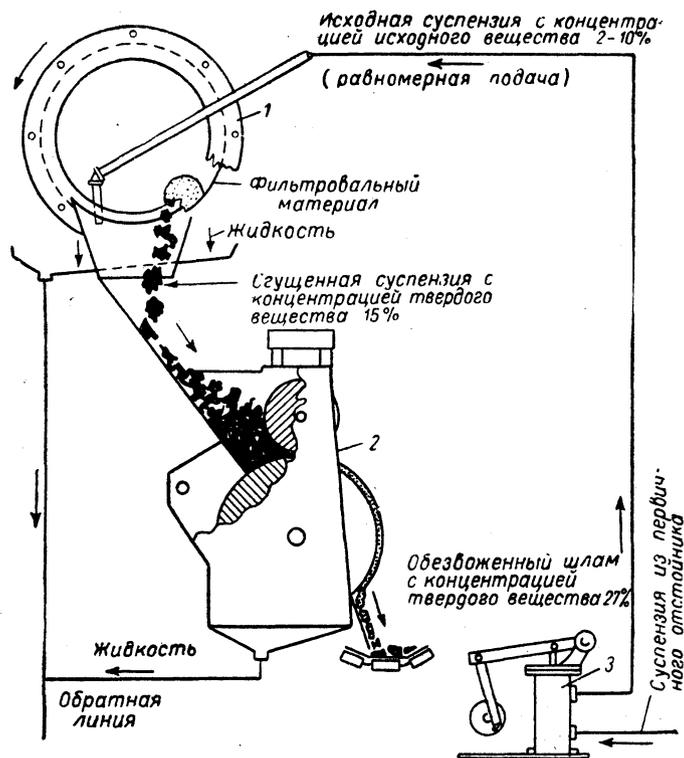


Рис. II-112. Схема сгустителя „Картер — Эдко“:

1 — сгуститель „Эдко Рото-Плаг“; 2 — пресс-фильтр „Эдко“; 3 — дозирующий шламный насос „Эдко.“

Вакуум-фильтры (общие сведения)

Вакуум-фильтрами называют такие фильтры, в которых отфильтрованная жидкость поступает в зону, находящуюся под давлением ниже атмосферного. В зоне, где находится исходная суспензия, давление обычно соответствует атмосферному. Поэтому работа вакуум-фильтров ограничена максимальной разностью давлений в 1 ат. Поскольку исходная суспензия находится в фильтре под атмосферным давлением, она может подаваться в него насосом с небольшим напором или под действием силы тяжести. Фильтрат же должен быть передан из зоны, где он находится под вакуумом, в приемник, находящийся под атмосферным давлением; для этой операции используется насос (обычно самозаливающийся центробежный или турбинный) или барометрическая труба. Вакуум-насос является неотъемлемой частью вакуум-фильтров; он служит источником движущей силы при фильтровании и во многих фильтровальных установках обуславливает наибольшие эксплуатационные расходы. Чаще применяются поршневые, ротационные и струйные вакуум-насосы. При выборе исходят из экономических соображений и условий работы фильтровальной установки. В некоторых случаях насос заменяют барометрической трубой, направляющей фильтрат в гидравлический затвор.

На практике используются фильтры как периодического, так и непрерывного действия; последние нашли наибольшее применение, так как основное достоинство фильтрования под вакуумом — возможность осуществления непрерывных процессов.

Преимуществами вакуум-фильтров являются: возможность эффективного ведения непрерывного процесса; небольшие затраты труда; доступность для обслуживания и ремонта поверхности фильтрования, находящейся в атмосферных условиях; сравнительно невысокие эксплуатационные расходы. К недостаткам таких фильтров можно отнести: необходимость обслуживания вакуумной системы; ограниченные возможности их применения в случае летучести фильтрата; невозможность использования большинства вакуум-фильтров для обработки трудно отделяемых сжимаемых осадков; недостаточную гибкость вакуум-фильтров непрерывного действия в изменяющихся условиях работы (в отношении скорости поступления и концентрации суспензии, а также свойств твердых частиц). Другие преимущества и недостатки, присущие конкретным типам вакуум-фильтров, будут рассмотрены ниже.

В вакуум-фильтрах непрерывного действия обрабатывают самые разнообразные материалы. В противоположность этому вакуум-фильтры периодического действия имеют в химической технологии ограниченное местное применение.

Вакуум-фильтры периодического действия

Вакуум-нутчи. Если обычный напорный (гравитационный) нутч-фильтр выдерживает повышенную разность давлений, то нижнюю его часть, в которой собирается фильтрат, можно соединить с источником вакуума, превратив тем самым нутч-фильтр в вакуум-нутчи. Вакуум-нутчи отличается от обычного нутч-фильтра только повышенной скоростью фильтрации, обусловленной действием вакуума, остальные же свойства и недостатки напорного нутч-фильтра свойственны и ему. Вакуум-нутчи наиболее пригодны для использования в полужавоцских условиях и на небольших установках тонкой химической технологии.

Опрокидывающийся фильтр Галигера. Этот вакуум-фильтр имеет вид противня небольшой глубины с дренажной решеткой, опирающейся на дно. В установку входят также вакуум-насос и приемник фильтрата. Конструкция противня позволяет переворачивать его с помощью маховичка на 180° с целью удаления осадка.

Рассматриваемый фильтр по существу является вакуум-нутчем с невысокими стенками. Используют его в основном в процессах обогащения руд, например, для отделения флотационных концентратов. Фильтры Галигера стандартных размеров имеют поверхность $0,65-1,8 \text{ м}^2$

Листовые вакуум-фильтры. Фильтр Мора (рис. II-113) представляет собой комплект листов, соединенных вакуумным трубопроводом в передвижной

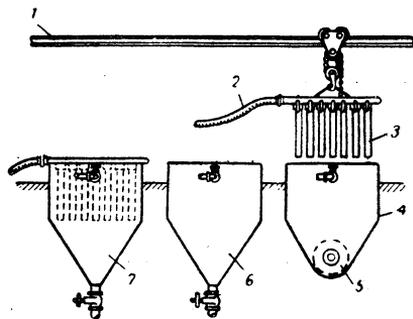


Рис. II-113. Фильтр Мора:

1 — монорельс для крана; 2 — шланг, присоединенный к ресиверу для вакуума и сжатого воздуха; 3 — фильтровальные листы; 4 — разгрузочный резервуар; 5 — шнек; 6 — промывной резервуар; 7 — фильтровальный резервуар.

пакет. Фильтровальный лист состоит из прямоугольной рамы, изготовленной из перфорированных труб, соединенных с вакуум-линией. На раму натянут мешок из фильтровального материала. Возможность сближения (слипания) стенок мешка предупреждается деревянными планками, расположенными вертикально в мешке. Комплект рам последовательно переносится краем в резервуар с суспензией, резервуар с промывной жидкостью и разгрузочный бункер. Фильтрация и промывка производятся под действием вакуума, а разгрузка осадка — под действием обратного потока воздуха.

Преимущества фильтра Мора: простота обслуживания, возможность легкой проверки состояния листов после разгрузки осадка и удобство замены неисправной рамы новой. Кроме того, этот фильтр обеспечивает получение осадка в течение длительного цикла работы и хорошую его промывку. Недостатками этого

фильтра являются обусловленная им сырость и необходимость большого объема производственного помещения, а также возможность падения части осадка с листов во время их транспортировки из резервуара в резервуар. Фильтры Мора применяются в металлургической промышленности и в производстве некоторых пигментов.

Всасывающий листовый фильтр «Ваку-Флоу» представляет собой простой листовый вакуум-фильтр, установленный в резервуаре (рис. II-114). По

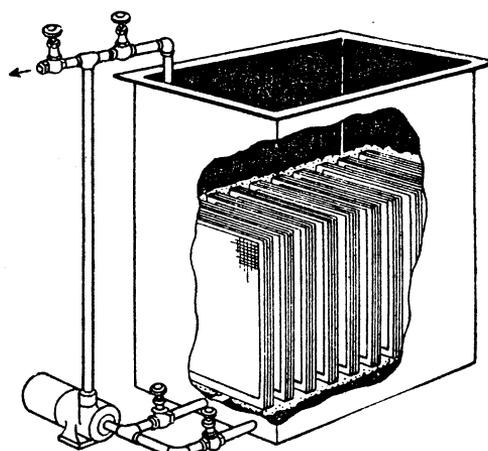


Рис. II-114. Листовой вакуум-фильтр, установленный в резервуаре.

конструкции он аналогичен фильтру с вертикальными листами, работающему под давлением. Фильтр состоит из открытого сверху прямоугольного резервуара, в котором вертикально размещены параллельные прямоугольные листы. Листы укреплены на проходящем по дну резервуара трубопроводе для отвода фильтрата. Трубопровод непосредственно соединен с всасывающей линией центробежного насоса, который в данном фильтре заменяет вакуум-насос.

Резервуар заполняют суспензией и фильтрация проводят до тех пор, пока толщина осадка не достигнет максимальной (заданной) величины. Затем останавливают насос, освобождают резервуар и смывают осадок водой в дренажную трубу. Удалять осадок сухим способом не рекомендуется.

Достоинства такого фильтра — простота конструкции и небольшая стоимость, недостаток — возможность использования только для быстрых процессов фильтрации (включая удаление осадка), в частности, для процессов с применением фильтровальных вспомогательных веществ (однако даже в этих случаях затрата труда значительна). Поверхность выпускаемых фильтров — от $0,9 \text{ м}^2$ (для 5-листового) до 110 м^2 (для 30-листового).

Вакуум-фильтры непрерывного действия

Вакуум-фильтры непрерывного действия широко применяют во многих отраслях промышленности. Подразделяют их обычно на барабанные, дисковые и горизонтальные. Горизонтальные фильтры могут быть тарельчатыми (планфильтрами), карусельными и ленточными.

В настоящее время в промышленности существует много типов вакуум-фильтров непрерывного действия, различающихся принципом работы и конструктивными особенностями. Несмотря на это, все вакуум-фильтры непрерывного действия имеют следующие характерные особенности: 1) фильтровальная перегородка во время работы выходит из зоны нахождения суспензии и образования осадка и входит в зону разгрузки (разгрузка осуществляется механическим или пневматическим способом); 2) наличие распределительного устройства, регулирующего давление под фильтровальной перегородкой в различных участках фильтра; 3) кажущийся непрерывный цикл работы, который в действительности является бесконечным рядом ограниченных в пространстве периодических процессов (поэтому весь процесс приближенно может рассматриваться как протекающий непрерывно).

Ячейковые барабанные фильтры. Обычный вращающийся барабанный фильтр. Этот фильтр — старейший и наиболее известный из числа вакуум-фильтров непрерывного действия. Фильтр Оливера, рассмотренный ниже в качестве примера, был первым аппаратом подобного типа. Обычные вращающиеся барабанные фильтры изготавливаются многими фирмами, но отличаются один от другого только в деталях. Барабанные фильтры имеют поверхность фильтрования от 0,1 до 75 м². Типовые стандартные размеры этих фильтров даны в табл. II-14.

Фильтр Оливера (рис. II-115) имеет цилиндрический барабан, который может вращаться вокруг горизонтальной оси. Нижняя часть барабана погружена в жидкость, находящуюся в корыте. С обоих концов барабана имеются открытые шестерни (или закрытый привод), насаженные на цапфы, которые поддерживают также корпус барабана. Корпус состоит из ряда полых секций, поверх которых расположена фильтровальная ткань. Ткань поддерживается рифленой поверхностью барабана, обеспечивающей свободный сток жидкости, и неподвижно закрепляется при помощи спирально навитой проволоки с равномерным шагом.

Для фильтрования обычных минеральных масел и химических продуктов при умеренном количестве удерживаемого фильтрата глубина каналов принимается равной 22 мм. В конструкциях, предназначенных для легко фильтрующихся материалов, каналы для стока фильтрата делаются более глубокими (от 38 до 45 мм). Для медленно фильтрующихся суспензий, когда требуется четкое отделение первых мутных порций фильтрата, используются решетки глубиной 3 мм и менее. Решетки могут быть изготовлены из деревянных или перфорированных металлических листов. Иногда применяются литые решетки из металлов или пластмасс.

Внутренняя полость каждой ячейки соединяется через отдельную трубку 14 с распределительным устройством 17, которое во время работы фильтра при вращении барабана автоматически присоединяет различные

ТАБЛИЦА II-14

Стандартные размеры фильтров Дорр-Оливера
Вращающиеся вакуум-фильтры

Диаметр, м	Поверхность фильтрования (в м ²) при следующей длине фильтра (в м)									
	0,305	0,610	1,22	1,83	2,44	3,05	3,66	4,26	4,87	5,47
0,91	0,84	1,67	3,34	5,02	—	—	—	—	—	—
1,22	—	2,32	4,64	6,96	9,28	—	—	—	—	—
1,60	—	—	6,04	9,28	12,1	15,3	—	—	—	—
1,83	—	—	6,96	10,5	13,9	16,8	—	—	—	—
2,44	—	—	—	—	18,6	23,2	27,9	32,5	37,2	—
3,05	—	—	—	—	—	28,8	34,8	40,9	46,5	52,0
3,51	—	—	—	—	—	—	39,9	46,5	52,9	59,5
4,27	—	—	—	—	—	—	—	56,7	65,0	73,4

Горизонтальные фильтры Оливера

Диаметр, м	0,911	1,22	1,83	2,44	3,05	3,51	3,96	4,57	5,79
Поверхность, м ²	0,325	0,929	2,32	4,37	6,04	8,36	11,1	15,3	25,5

Американские дисковые фильтры

Диаметр, м	Поверхность фильтрования (в м ²) при следующем числе дисков											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,22	2,04	4,08	6,13	8,17	—	—	—	—	—	—	—	—
1,83	—	9,29	13,9	18,6	23,2	27,9	32,5	37,2	—	—	—	—
2,59	—	—	—	34,8	43,2	52,0	60,4	69,2	77,6	85,9	—	—
3,20	—	—	—	—	—	83,6	97,5	111,0	125,0	139,0	153,0	167,0
3,66	—	—	—	—	—	111,0	130,0	147,0	167,0	186,0	204,0	223,0

трубки к источнику вакуума или воздуха, используемого для продувки; соответственно через трубки присоединяются к источнику вакуума или сжатого воздуха отдельные ячейки фильтра. Автоматическое распределительное устройство 17 присоединено к вакуум-линии и к линии сжатого воздуха.

Под барабаном, на близком расстоянии от дна корыта подвешен каркас 31, поддерживающий горизонтальные скребки 24, которые во время работы фильтра слабо покачиваются, перемешивая исходную суспензию. Для перемешивания могут быть использованы также лопастные или пропеллерные мешалки.

Отфильтрованный осадок обычно снимается с поверхности ткани при помощи неподвижных скребков, сколь-

зуются разнообразные ткани из натуральных и синтетических волокон, проволочные сетки, а также тонко перфорированные металлические листы.

Во время фильтования барабан медленно вращается, в то время как в корыто непрерывно подается фильтруемый материал. Уровень жидкости поддерживается постоянным для обеспечения постоянной глубины погружения нижней части барабана. В разных конструкциях эта глубина различна. Выбранное распределительное устройство должно соответствовать данным условиям работы.

Через автоматическое распределительное устройство включается вакуум для отсасывания жидкости из тех отделений барабана, которые проходят через суспен-

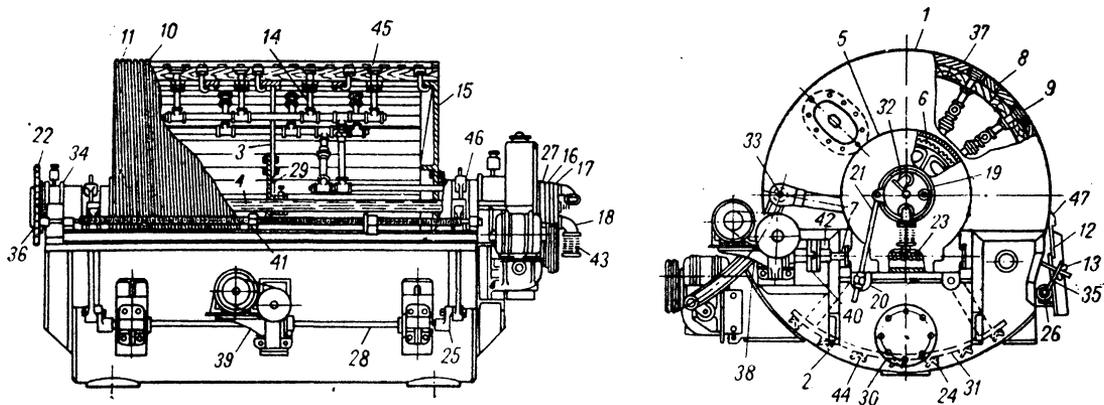


Рис. II-115. Барабанный вакуум-фильтр Оливера:

1 — барабан фильтра; 2 — корыто фильтра; 3 — спицы барабана; 4 — вал барабана; 5 — закрытый подшипник; 6 — червячный привод; 7 — вал; 8 — деревянные планки; 9 — разделительные рейки; 10 — фильтровальная перегородка; 11 — проволочная обмотка; 12 — скребковая пластинка; 13 — регулировочное устройство для скребковой пластинки; 14 — соединительные трубки; 15 — сплошная крышка барабана; 16 — защитная пластинка; 17 — автоматическое распределительное устройство; 18 — место присоединения к вакууму; 19 — войлочная прокладка; 20 — опора регулятора распределительного устройства; 21 — штанга регулятора распределительного устройства; 22 — звездочка для намотки проволоки; 23 — червяк; 24 — скребки мешалки; 25 — кривошип мешалки; 26, 34 — подшипники; 27 — вращающаяся пластинка, соединенная с трубами; 28 — колесчатый вал; 29 — центральная крестовина; 30 — крышка смотрового окна; 31 — каркас мешалки; 32 — фланец автоматического распределительного устройства; 33 — соединительное устройство; 35 — опорная планка; 36 — звездочка на винтовом валу; 37 — опорная перегородка для фильтровального материала; 38 — привод барабана; 39 — привод мешалки; 40 — муфта сцепления; 41 — обмоточное устройство; 42 — сцепление валов; 43 — гибкое соединение; 44 — седловидные опоры; 45 — nipples барабана; 46 — качающийся каркас; 47 — гребень скребковой пластинки.

зяхих по проволочной обмотке при вращении барабана. Скребки закреплены на краю корыта. Низкое положение зоны разгрузки осадка в фильтрах Оливера позволяет осуществлять удаление осадка отдувкой воздухом; в большинстве случаев скребок служит лишь направляющим устройством. Кроме того, осадок может быть удален при помощи валика или струны. Валики применяются для съема тонких слоев осадка липкого или тиксотропного материала. Вращающийся валик располагается около поверхности фильтования в зоне разгрузки осадка. С валика материал удаляется с помощью ножа. Туго натянутая фортепианная струна применяется для снятия тонких слоев рыхлых осадков. Струна должна быть ограждена, чтобы никого не ранить при ее разрыве.

Фильтры Оливера могут быть изготовлены из дерева, чугуна, свинца с различными покрытиями, нержавеющей стали и других материалов. Иногда используются стальные фильтровальные корыта со свинцовым покрытием. В некоторых случаях применяется защита стальных и деревянных частей слоем меди или латуни. В качестве фильтровальных перегородок ис-

пользуются разнообразные ткани из натуральных и синтетических волокон, проволочные сетки, а также тонко перфорированные металлические листы.

Во время фильтования барабан медленно вращается, в то время как в корыто непрерывно подается фильтруемый материал. Уровень жидкости поддерживается постоянным для обеспечения постоянной глубины погружения нижней части барабана. В разных конструкциях эта глубина различна. Выбранное распределительное устройство должно соответствовать данным условиям работы.

Через автоматическое распределительное устройство включается вакуум для отсасывания жидкости из тех отделений барабана, которые проходят через суспен-

зию. Под действием вакуума жидкость проходит через фильтровальную среду, соединительные трубки и распределительное устройство, а на поверхности барабана, погруженной в суспензию, откладывается слой осадка. Во время вращения барабана в ячейках поддерживается вакуум, и образующийся слой осадка после выхода из суспензии перемещается по дуге, соответствующей верхней непогруженной части барабана. Здесь он подвергается промывке водой из разбрызгивающих форсунок. Промывная вода проникает через осадок и вытесняет содержащуюся в нем жидкость.

После промывки осадок подсушивается и разгружается. Очищенная поверхность фильтования снова погружается в корыто и цикл повторяется.

Фильтр со шнуровым съемом осадка. Вместо скребкового устройства или валика в этом фильтре применяется система бесконечных шнуров, огибающих фильтровальный барабан и находящихся в 12—13 мм один от другого. Шнуры тангенциально сходят с барабана, отделяя слой осадка. Схема действия вакуум-фильтра с таким способом разгрузки дана на рис. II-116. Кольцеобразное распределительное устройство устанавливается так,

что действие вакуума прекращается в момент съема шнурами осадка с барабана.

По сравнению с обычными барабанными фильтрами, в которых хорошее отделение осадка достигается только при толщине его не менее 6—12 мм, фильтры со шнуровым съемом могут успешно работать при значительно меньшей толщине осадка (1,5 мм), поэтому на

два слоя спиральных пружин (диаметром 10 мм) из нержавеющей стали, уложенных вокруг барабана и облегающих его во время вращения. Осадок откладывается на пружинах и удаляется с помощью зубчатой планки. В зоне разгрузки оба слоя пружин сходят с барабана по касательной и огибают разгрузочные валики. Пружины промываются струями жидкости в ме-

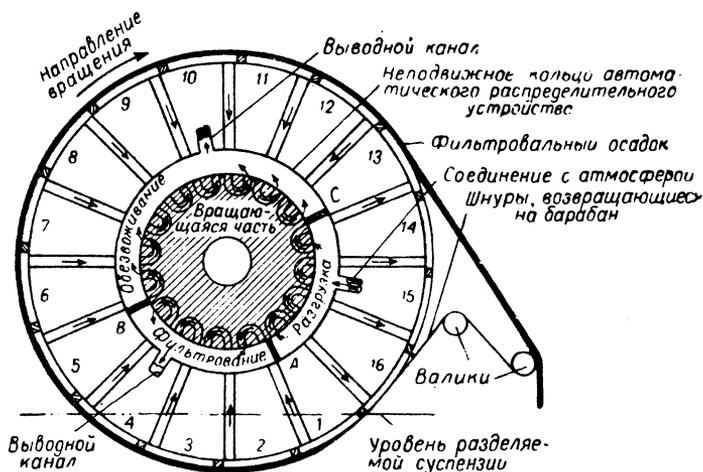


Рис. II-116. Схема действия вакуум-фильтра непрерывного действия со шнуровым съемом осадка:

Секция 1—4 — фильтрация; секции 5—12 — обезвоживание; секция 13 — разгрузка осадка с помощью шнуров. Секции 14—16 подготовлены к новому циклу. „Втулка“ на схеме поясняет конструкцию автоматического распределительного устройства, где А, В и С разделяют различные зоны.

них можно отфильтровывать и трудно разделяемые суспензии. Успешность применения рассматриваемых фильтров зависит, конечно, от способности осадка сниматься шнурами; такое свойство осадка надо проверить экспериментально, прежде чем выбрать этот фильтр.

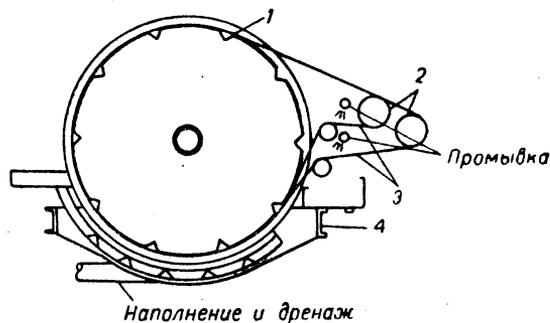


Рис. II-117. Схема фильтра с пружинным съемом осадка:

1 — дренажные каналы; 2 — разгрузочные валики; 3 — пружины; 4 — рама.

Фильтры со сходящим фильтровальным материалом. Некоторые барабанные фильтры устроены так, что во время их работы фильтровальный материал сходит с вращающегося барабана и затем снова возвращается на него. Такая конструкция улучшает условия разгрузки осадка и промывки фильтровального материала.

В фильтре с пружинным съемом осадка (рис. II-117) в качестве фильтровального материала используются

сте перегиба перед возвращением на барабан. На таком фильтре отделяются в основном слизистые осадки, образующиеся, например, при обработке сточных вод. Фильтр представляет значительный интерес для химической промышленности, где он может найти применение для обработки трудно разделяемых суспензий.

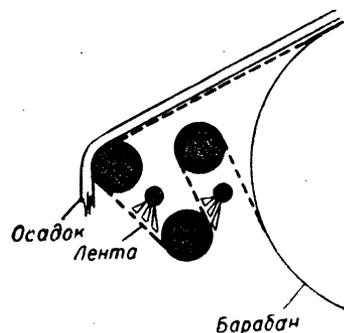


Рис. II-118. Разгрузка осадка и промывка на фильтре «Эймкобелт».

Фильтр «Эймкобелт» представляет собой барабан, покрытый тканью, которая сходит с него по касательной в зоне разгрузки осадка, проходит по валикам, освобождается от осадка и после промывки возвращается на барабан в очищенном состоянии. На рис. II-118 схематически показан путь движения ткани после ее отхода от барабана. Специальное устройство расправляет складки на ткани и направляет ее движение. На фильтре

«Эймкobelт» можно обрабатывать трудно разделяемые суспензии при толщине образующегося осадка, не превышающей 1,5 мм; это обеспечивает высокую скорость фильтрования.

Фильтры с верхней подачей суспензии. Крупные, быстро оседающие твердые частицы, которые не могут образовать хороший осадок на обычном барабане, успешно отфильтровываются на модифицированном барабанном фильтре. Суспензия поступает в фильтр в верхней части барабана, а осадок разгружается в желоб в нижней части. Более половины поверхности барабана используется для фильтрования и просушки осадка. Конструкция фильтра позволяет подводить тепло к отфильтрованному осадку. При этом легко получаются абсолютно сухие кристаллы. Количество материала, обрабатываемого на фильтре, зависит главным образом от степени дисперсности твердых частиц и требуемой окончательной влажности осадка.

В конструкции фильтра с верхней подачей суспензии имеется герметизированный резервуар с постоянно действующим переливным устройством (фильтр Петерсона TFR). Резервуар заполняется суспензией до постоянного уровня, позволяющего получать более равномерный осадок.

В некоторых фильтрах поверхность барабана разделяется на внешние ячейки (секции), ограничивающие стороны которых имеют высоту ≥ 150 мм. Такие фильтры применяются для получения пористых осадков, более крупных, чем в описанных выше фильтрах с верхней подачей суспензии. Для фильтрования и обезвоживания осадка используется менее половины секционированной поверхности фильтра.

Поверхность фильтров с верхней подачей суспензии и фильтров с секционированной поверхностью обычно не превышает 9 м (диаметр 1,5 м).

Фильтр с внутренней поверхностью фильтрования (фильтр «Доррко»). В этом вращающемся барабанном вакуум-фильтре (рис. II-119) фильтровальный мате-

рых случаях осадок удаляется при помощи шнека, расположенного в лотке.

Во время вращения аппарата фильтровальная ткань опускается в суспензию ниже линии ее поступления. Вакуум включается автоматически. Момент включения вакуума определяется расположением перегородок в головке распределительного устройства. Если это желательнее, можно обеспечить предварительное осаждение на ткани более крупных, быстро оседающих частиц суспензии. При выводе осадка из жидкости, когда он все еще находится в наклонном положении в барабане, на его поверхность подается промывная жидкость. После промывки следует просушка осадка под вакуумом и разгрузка.

В тот момент, когда осадок проходит над разгрузочным конвейером, вакуум отключается и фильтровальная секция барабана непосредственно соединяется со специальным разгрузочным каналом. Этот канал включает трубопровод, соединяющий распределительное устройство фильтра с небольшим четырехходовым краном, обеспечивающим последовательное присоединение к источнику вакуума или давления. Осадок присоединяется поочередно к вакууму и к воздуходувке небольшой мощности, разрыхленный осадок падает в сборный конвейер, ткань же повторно изгибается и вновь подготавливается к последующей операции. Если осадок полностью отделяется от ткани без затруднений, то пульсационная разгрузка заменяется простой разгрузкой путем отдувки при небольшом давлении.

При фильтровании легко разделяемых суспензий, допускающих высокие скорости фильтрования и обработки больших количеств жидкости, длина барабана обычно меньше его диаметра и вместо ленточного транспортера используется простой желоб. Короткий фильтр Доррко особенно пригоден для фильтрования очень грубых неоднородных осадков, которые осаждаются весьма быстро и не могут быть равномерно распределены на сколько-нибудь значительной длине.

Для процессов, при проведении которых нельзя применить текстильную фильтровальную ткань, сконструирован специальный тип фильтра с металлической проволоочной сеткой.

Вакуум-фильтр со слоем вспомогательного вещества. Этот фильтр является модификацией обычного барабанного фильтра непрерывного действия. Он дает широкую возможность фильтрования и осветления трудно фильтрующихся веществ (вязких, смолистых или коллоидных, а также суспензий с небольшим содержанием твердых частиц).

Фильтр работает циклично. Сначала на барабане откладывается толстый слой вспомогательного вещества, а затем в резервуар, освобожденный от избытка последнего, подается осветляемый раствор. При вращении барабана на поверхности вспомогательного вещества непрерывно откладывается тонкий слой осадка, который проходит зону промывки и сушки. Осадок снимается острием ножа вместе с некоторым количеством вспомогательного вещества. Очищенная поверхность слоя вспомогательного вещества снова погружается в резервуар, где на нем вновь откладывается осадок (рис. II-120). Скорость фильтрования равномерная и высокая. Вполне удовлетворительное осветление достигается, как правило, в одну ступень. Обычно слой вспомогательного вещества можно нанести менее чем за 1 ч. Фильтрование или осветление можно продолжать от 16 ч до одной недели в зависимости от того, какое количество вспомогательного вещества снимается со слоем твердых частиц.

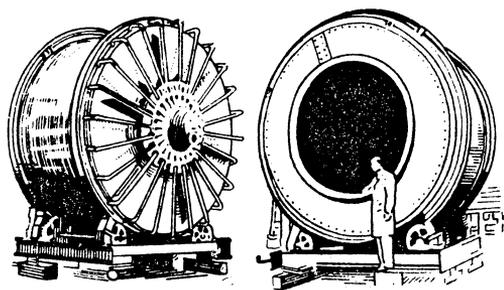


Рис. II-119. Фильтр «Доррко».

риал размещен на внутренней стороне барабана в виде ряда секций, параллельных оси барабана. Барабан служит одновременно резервуаром для исходной суспензии. Один конец барабана открыт и снабжен кольцевой закраиной для образования резервуара для шлама. Через открытый конец ведется наблюдение за работой фильтра. С одной стороны осевой линии в барабане перемещается лотковый ленточный транспортер, который собирает разгружаемый осадок и выводит его из фильтра. Приводной механизм фильтра устроен так, что скорость вращения барабана можно устанавливать независимо от скорости движения транспортера. В некото-

Безъячейковые барабанные фильтры. Фильтр Берд-Ионга (рис. II-121) не имеет ни внутренних соединительных труб в барабане, ни автоматического распределительного устройства. Вся внутренняя сторона барабана находится под вакуумом, а осадок разгружается при помощи обратных пульсирующих толчков воз-

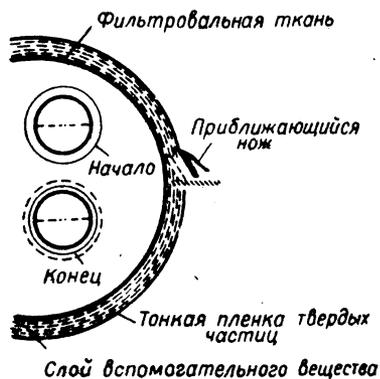


Рис. II-120. Схема работы вакуум-фильтра со слоем вспомогательного вещества.

духа без участия скребка или шнуров. Применяют фильтр Берд-Ионга для фильтрования слабо разделяющихся суспензий, что обуславливает возможность работать с очень тонким слоем осадка.

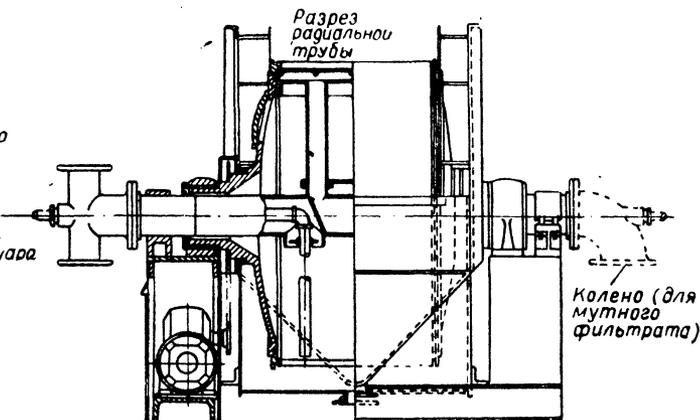
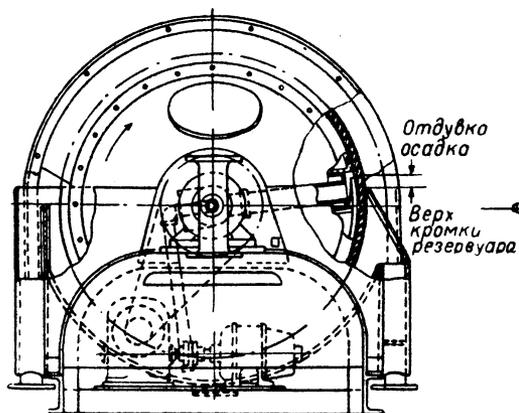


Рис. II-121. Безъячейковый барабанный фильтр.

Барабан, рассчитанный для работы под давлением 1 ат, опирается на цапфы. В резервуар с суспензией может погружаться от 5 до 50% поверхности барабана. Внутри барабана расположено устройство, подающее обратный поток сжатого воздуха на поверхность той части барабана, которая проходит зону разгрузки осадка. Оно находится на расстоянии в несколько десятых долей миллиметра от внутренней поверхности барабана и поддерживается при помощи радиальной опорной трубы. Эта труба в свою очередь поддерживается неподвижной осевой трубой, проходящей через уплотнительные кольца в цапфах и используемой в качестве канала для обратного и эвакуируемого воз-

духа, канала для удаления фильтрата (при низких степенях погружения для удаления фильтрата используется сифонная труба) и канала для промывного фильтрата.

Дренажная поверхность металлического барабана разделена посредством планок с прорезями на 50—100 продольных частей. Фильтровальный материал цельным куском покрывает барабан и фиксируется поперечными проволоками у каждой планки, как бы деля поверхность фильтрования на отдельные секции. Фильтрат из каждой секции спускается в нижнюю часть барабана и удаляется затем по осевой трубе или с помощью насоса через сифонную трубу.

Максимальный диаметр барабана равен 1,68 м, поверхность фильтрования составляет 0,09—13 м², фильтр изготавливается из металла или из металла с защитным покрытием. Стоимость его приблизительно вдвое выше стоимости обычного вращающегося вакуум-фильтра с такой же поверхностью.

Основное преимущество этого фильтра заключается в том, что он дает возможность работать с очень тонким слоем осадка и, следовательно, вести процесс с высокими скоростями и высокой производительностью, а также осуществлять хорошую промывку. Другими его преимуществами являются четкое разделение фильтрата и промывных вод и небольшое внутреннее сопротивление при движении воздуха и фильтрата. Из недостатков следует отметить его высокую стоимость и ограниченность использования из-за отсутствия распределительного устройства.

Дисковые вакуум-фильтры. Типичным представителем вращающихся дисковых вакуум-фильтров непрерывно-

го действия является американский фильтр Дорр — Оливера (рис. II-122), имеющий ряд фильтровальных дисков, укрепленных на определенных расстояниях один от другого на полом центрального вала. Вращение осуществляется с помощью редуктора от электродвигателя. Диски состоят из деревянных, стальных или бронзовых секторов, рифленых с обеих сторон (рифление необходимо для удаления фильтрата).

Каждый сектор имеет выводной ниппель, проходящий через отверстие в чугунном центральном валу и соединяющийся полостью сектора с каналом, проходящим по всей длине вала. Каждый канал заканчивается отверстием в распределительной головке и отводит

фильтрат из всех секторов, расположенных вдоль вала по одной его образующей. Распределительная головка подобна головкам других типов непрерывно вращающихся вакуум-фильтров. Секторы дисков удерживаются в своем положении с помощью радиальных тяг, укрепленных на валу. Каждая тяга имеет на внешнем конце дугообразную накладку и гайку, которые удерживают на месте два соседних сектора. Каждый сектор может быть сменен без нарушения работы других секторов.

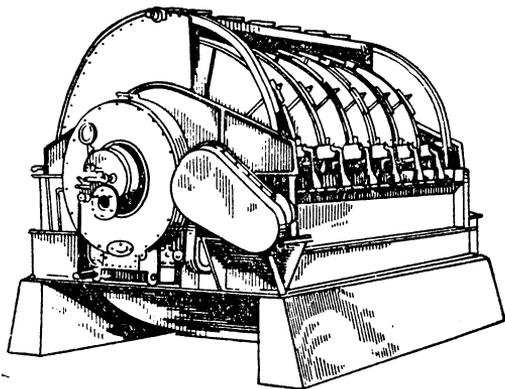


Рис. II-122. Американский фильтр.

На каждый сектор надевается мешок из фильтровальной ткани, внешние концы мешка складываются и зажимаются. У ниппеля для отвода фильтрата мешок закрепляется веревкой, обмотанной вокруг суженной части мешка. Резиновая прокладка обеспечивает плотное соединение сектора с валом. Комплект фильтровальных дисков вместе с валом устанавливается в резервуаре для исходной суспензии так, что нижние секторы полностью погружаются в жидкость во время образования осадка. На стороне разгрузки резервуар имеет выступы, в которые входят диски. Пространство между этими выступами используется для разгрузки осадка. Ножи или конические разгрузочные валки размещаются на краю выступов около каждого диска. В некоторых случаях разгрузка производится с помощью тонких водяных струй, подаваемых под давлением.

Во время работы фильтра суспензия поступает на разделение через распределительную трубу, которая имеет по одному отводу для каждого отделения резервуара. Размешивание суспензии осуществляется непрерывной подачей фильтруемой жидкости, избыток которой через переливное устройство возвращается в запасной бак. Диски вращаются медленно, и как только секторы погружаются в суспензию, сейчас же распределительная головка включает вакуум. Слой осадка образуется на обеих сторонах сектора, а фильтрат удаляется из сектора через канал в центральном валу и распределительную головку. Вакуум поддерживается и тогда, когда секторы выходят из суспензии. В случае необходимости осадок промывается. В тот момент, когда сектор достигает ножа или разгрузочного валика, действие вакуума прекращается и производится легкая отдувка воздухом. Фильтровальный мешок раздувается, так как он не укреплен на секторе сеткой или проволокой. Мешок соприкасается с ножом или вращающимся разгрузочным валиком и осадок падает между секциями резервуара. В некоторых случаях суспензия

поступает в фильтр из желоба, расположенного вдоль края резервуара фильтра.

Секторы фильтра могут иметь трапециевидную форму. Для перемешивания суспензии в резервуаре можно использовать лопастные или пропеллерные мешалки.

Основные достоинства таких фильтров — низкая стоимость и компактность. В качестве основного недостатка следует отметить невозможность хорошей промывки соединения сектора с валом. Комплект фильтровальных осадка. Стандартные фильтры имеют размеры, указанные в табл. II-14.

Горизонтальные вакуум-фильтры непрерывного действия. К таким фильтрам относятся тарельчатые (план-фильтры), ленточные (безъячейковые и ячейковые) и карусельные. Достоинства этой группы фильтров: возможность свободно выбирать толщину осадка, а также продолжительность промывки и просушки; успешное разделение суспензий с тяжелыми твердыми частицами; возможность заливать осадок промывной жидкостью и легко осуществлять противоточную промывку. К недостаткам их следует отнести повышенную по сравнению с барабанными фильтрами стоимость и относительно большую занимаемую производственную площадь, приходящуюся на единицу поверхности фильтрования. Такие фильтры могут успешно применяться для отделения гипса и остатков фосфоритных руд в производстве фосфорной кислоты, а также для разделения суспензий в металлургии. Перспективным является их применение при производстве масел экстракционным способом.

Тарельчатый фильтр. Этот фильтр представляет собой вращающийся горизонтальный диск с низкими бортами (рис. II-123).

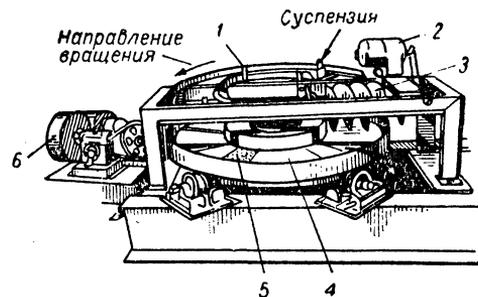


Рис. II-123. Горизонтальный вакуум-фильтр непрерывного действия;

- 1 — опора для перфорированных промывных труб;
- 2 — электродвигатель шнекового транспортера;
- 3 — шнековый транспортер;
- 4 — фильтровальная ткань;
- 5 — опорная металлическая сетка;
- 6 — редуктор.

Фильтр разделен на ряд секторов, каждый из которых представляет собой самостоятельную ячейку. Вакуум подводится через расположенную в низу ячейки дренажную камеру, которая непосредственно соединена с вращающимся распределительным устройством (головкой). Суспензия подается на фильтр сверху, а осадок удаляется в зоне, расположенной в нескольких градусах от этого места. Удаление осадка производится шнековым транспортером.

Слой осадка толщиной около 3 мм остается на фильтровальной перегородке. Прежде чем поступит новая порция суспензии, оставшийся осадок взмучивается струей, имеющей значительную скорость. Этот остающийся слой осадка является специфическим недостатком.

тарельчатого фильтра. Между местом подачи суспензии и зоной разгрузки осуществляются операции промывки (которая может быть противоточной) и просушки осадка.

порции исходной суспензии. Одна из конструкций карусельного фильтра показана на рис. II-124. Достоинства карусельных фильтров — наличие хороших условий для промывки и разгрузки осадка. К недостаткам

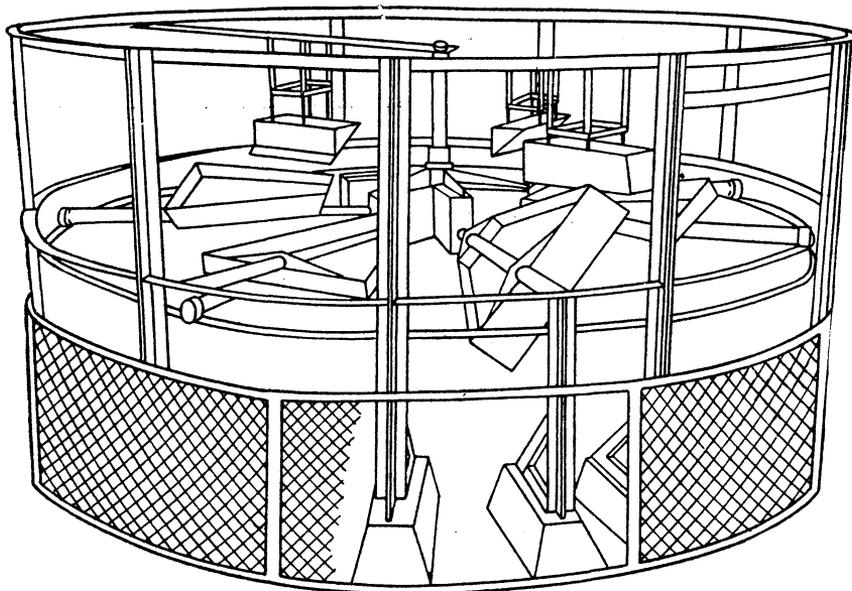


Рис. II-124. Карусельный фильтр Бёрд — Прейона.

Карусельный фильтр (с опрокидывающимися нутчами). Этот фильтр является разновидностью тарельчатого. Вместо секторов в фильтре имеется ряд смежных независимых нутчей, соединенных радиальными трубами

их можно отнести высокую стоимость и сложность конструкции.

Ленточный фильтр. Третьей разновидностью горизонтальных вакуум-фильтров непрерывного действия

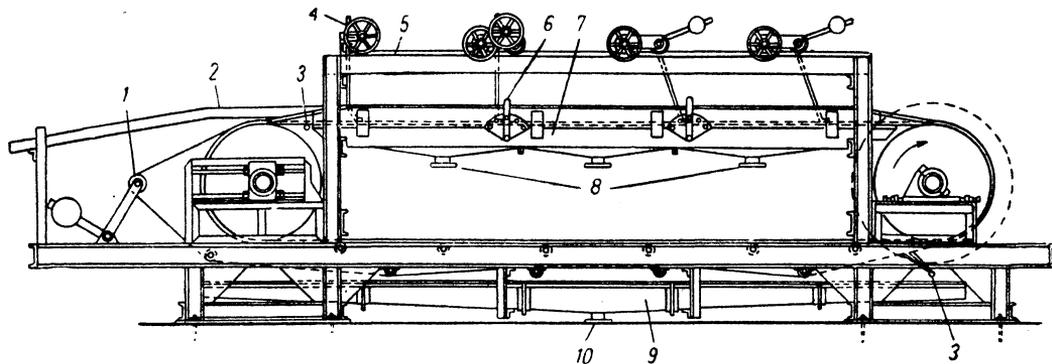


Рис. II-125. Ленточный фильтр Лурги:

1 — натяжной ролик для фильтровальной ткани; 2 — передливный желоб; 3 — труба для промывки; 4 — перегородка; 5 — направляющая рейка; 6 — регулирующая заслонка; 7 — вакуумная камера; 8 — штуцеры вакуумных камер; 9 — поддон; 10 — сливной штуцер.

с центральным вакуумным распределительным устройством. Нутчи движутся на ролике по окружности вокруг оси фильтра. В зоне разгрузки специальный механизм опрокидывает нутч на 180° и осадок выпадает. При необходимости проводится короткая отдувка воздухом. Затем нутч снова занимает первоначальное положение, после чего он готов к приему следующей

является ленточный фильтр. Такой фильтр имеет транспортирующее устройство в виде бесконечной перфорированной резиновой ленты, на которой находится фильтровальная ткань. Лента с тканью охватывает два барабана и перемещается над вакуумными камерами. Схема ленточного фильтра Лурги дана на рис. II-125. Суспензия подается на один конец ленты со стороны

ведомого барабана, промывная жидкость поступает вдоль пути перемещения ленты, а осадок удаляется с другого конца фильтра (со стороны ведущего барабана). Перегородки, расположенные над осадком, делят верхнюю часть аппарата на зоны фильТРования и промывки. На нижнем (холостом) участке пути лента и фильТРовальная ткань отделяются одна от другой для очистки струями воды. Важным преимуществом ленточного фильТра является удобство промывки фильТРовальной ткани. Специфический недостаток этого фильТра заключается в том, что половина поверхности фильТРования не используется. В другой конструкции фильТров рассматриваемого типа лента несет ряд нутчей, размещенных по ее длине. Каждый нутч закрыт с боков и имеет фильТРовальную ткань на дне, которое является дренажной поверхностью.

ФильТры-сгустители

Сгустители предназначаются для сгущения суспензий с целью повышения концентрации в них твердых частиц. Сгущение часто является предварительной стадией фильТРования.

Наиболее экономично сгущение осуществляется в гравитационном седиментационном резервуаре (отстойнике), например в сгустителе Дорра. Однако не всегда имеется возможность установки такого аппарата. Поэтому в некоторых случаях может быть использован фильТр-сгуститель.

Сгуститель непрерывного действия Шрайвера. Такой сгуститель является модифицированным фильТрпрессом, у которого рамы заменены плитами специальной конструкции (рис. II-126). Спиральные каналы, образован-

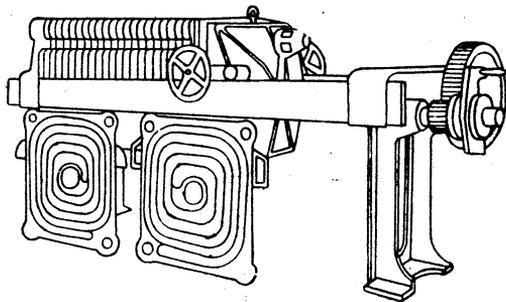


Рис. II-126. Сгуститель непрерывного действия Шрайвера.

ные направляющими перегородками, находятся на обеих сторонах плиты и соединяются между собой так, что суспензия поступает в один из углов плиты, проходит по каналу к центральному отверстию и через него попадает в находящийся на противоположной стороне плиты канал, по которому она перемещается к другому углу плиты. Одновременно происходит фильТРование части жидкой фазы суспензии, в результате чего она сгущается. Сгущенная суспензия и фильТрат непрерывно отводятся. Ряд плит может работать последовательно или параллельно в одном и том же сгустителе.

Осветлитель Петерсона с вращающимися дисками. Этот аппарат представляет собой полностью погруженный в суспензию дисковый вакуум-фильТр непрерывного действия с обычными секционированными дисками и распределительным устройством, позволяющим или подводить вакуум, или осуществлять в нужный момент

времени обратный ток воздуха, пара или фильТрата (рис. II-127). ФильТРование на диске происходит до тех пор, пока не образуется осадок заданной толщины. Затем осадок разрушается в резервуар, и диск можно использовать в повторном цикле. Осадок быстро опускается на дно резервуара, откуда непрерывно удаляется диафрагмовым насосом.

Если предусмотрено непрерывное удаление сгущенной суспензии, то фактически любой трубчатый или листовый вакуум-фильТр может быть приспособлен для про-

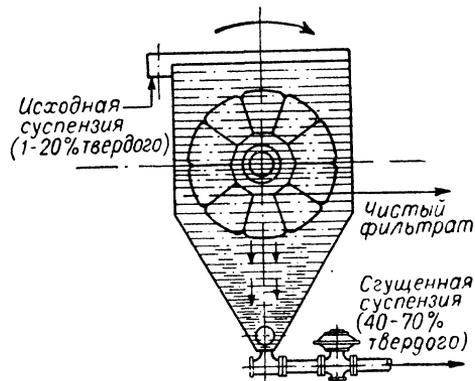


Рис. II-127. Осветлитель Петерсона с вращающимися дисками.

цесса сгущения путем циклического повторения операций фильТРования с последующей разгрузкой осадка.

Так как фильТРовальная ткань сгустителя в значительной мере соприкасается с суспензией, поры ее могут интенсивней, чем в обычных фильТрах, закупориваться твердыми частицами. Поэтому заменять ткань в сгустителях приходится чаще, чем в обычных фильТрах.

Осветлительные фильТры

Осветлительные фильТры используются для разделения жидких смесей, содержащих лишь незначительное количество твердых частиц. Если последние диспергированы настолько тонко, что наблюдаются только в виде мути, то фильТр, извлекающий их, иногда называется очистным. Исходная суспензия содержит обычно не более 0,1% твердых частиц размером от 0,01 до 100 мкм. На фильТре, как правило, не получается видимого осадка, так как извлекаемые частицы или задерживаются в порах фильТРовальной перегородки, или их количество настолько незначительно, что они не видны. Наиболее часто осветлительные фильТры применяются для очистки напитков и воды, фильТРования фармацевтических препаратов, осветления жидких топлив и смазочных масел, кондиционирования гальванических растворов и регенерации растворителей на установках химической чистки. Используются они также в процессах прядения волокон и экструзии пленок.

Большинство фильТров, работающих с образованием осадка, могут, хотя и не всегда достаточно эффективно, действовать как осветлители. Собственно осветлительные фильТры в большинстве случаев не могут быть использованы для других целей, кроме осветления или процеживания. В целом осветлительные фильТры менее дороги, чем фильТры, работающие с образованием осадка. Они подразделяются на дисковые прессы; фильТры

со слоем вспомогательного вещества, работающие под давлением; патронные осветлители и т. д.

В качестве осветлителей жидкостей, содержащих очень крупные частицы, иногда применяются простые процеживающие устройства, имеющие большое сходство с устройствами для мокрого просеивания.

Дисковые фильтры и плиточные прессы. Такие аппараты используются для очистки напитков, гальванических растворов и других жидкостей с небольшой вязкостью, содержащих малые количества суспендированных частиц. В качестве фильтровальной среды в них используются асбесто-целлюлозные диски, лепешки из хлопковых волокон, а также слои бумаги, целлюлозы или асбеста. Дисковый фильтр состоит из комплекта волокнистых дисков, изготовленных из асбеста и целлюлозы и помещенных в герметичный корпус, рассчитанный для работы под давлением. Диски могут быть предварительно собраны в виде безпорного пакета (рис. II-128), или каждый диск может опираться на

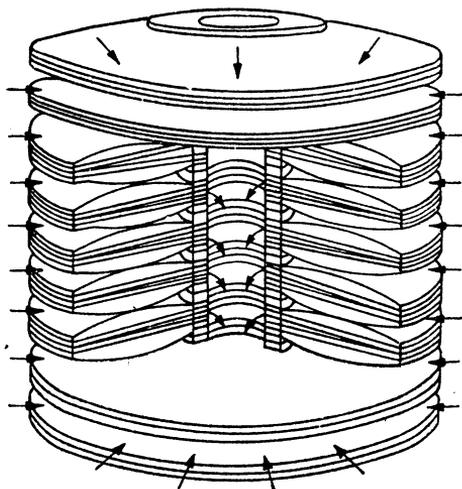


Рис. II-128. Собранный пакет осветлительных дисков.

отдельную сетку или пластину, при помощи которых он сжимается при закрывании фильтра (рис. II-129). Комплект дисков уплотняется в корпусе путем прижимания крышки натяжным устройством или при помощи отдельного винта внутри корпуса. Жидкость проходит через диски и поступает в центральный или периферийный отводной канал. Скорость потока жидкости $\sim 120 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Давление при фильтровании не должно превышать 3,5 ат. Дисковые фильтры, подобно плиточным осветлителям, почти всегда работают под давлением. Производительность некоторых фильтров для жидкости с небольшой вязкостью достигает $22 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В другой конструкции фильтра используется несколько фильтровальных цилиндрических пластин, полученных прессованием хлопкового волокна (фильтровальная масса) и помещенных в кожух, рассчитанный для работы под давлением. Осветляемая жидкость фильтруется под давлением не более 3,5 ат и проходит через волокнистые цилиндрические пластины в дренажный канал. Скорости потоков несколько меньше, чем в дисковых фильтрах, и составляют $\sim 20 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Такие фильтры используются главным образом для очист-

ки напитков. Фильтровальная масса может быть промыта в специальных аппаратах и снова использована в виде волокнистого осадка.

Плиточные прессы, называемые иногда слоевыми фильтрами, состоят из слоев бумаги или асбеста, плит, сит или рам. По существу они являются разновидностью фильтрпресса и практически не обладают способностью удерживать осадок. Пресс может состоять из многих плит и фильтровальных слоев или из единичного фильтровального слоя, находящегося между двумя

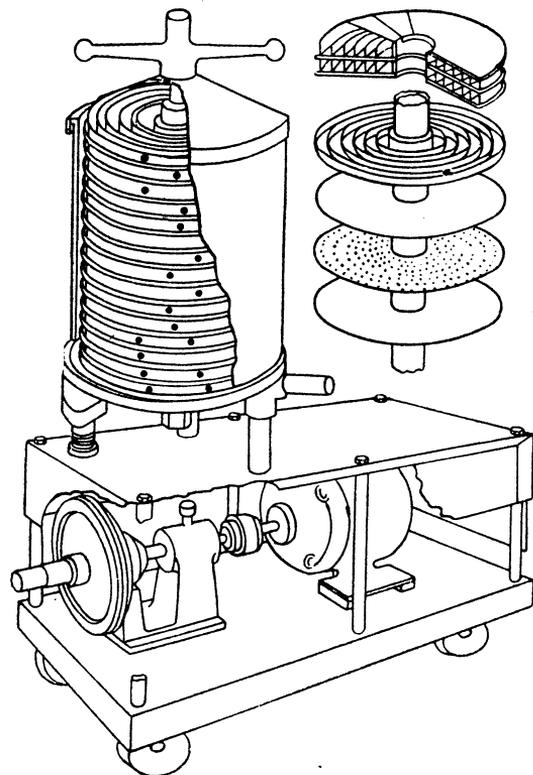


Рис. II-129. Дисково-пластинчатый осветлительный комплект.

плитами. Плиты изготавливаются прямоугольными или круглыми, а слои располагаются горизонтально или вертикально. Скорости потоков в плиточных прессах те же, что и в дисковых фильтрах, а давление при фильтровании обычно не превышает 1,4 ат.

На дисковых фильтрах и плиточных прессах извлекаются частицы размером более $0,01 \text{ мкм}$ и менее 5 мкм (частицы крупнее 5 мкм задерживаются, как правило, более грубым фильтром, используемым перед стадией очистного фильтрования).

Фильтры со слоем вспомогательного вещества, работающие под давлением. Эти фильтры состоят из одного или нескольких листов, плит или труб, на которые наносится слой диатомита или другого вспомогательного вещества, в результате чего образуется поверхность фильтрования, используемая в процессе осветления. Часто фильтровальная бумага заменяет слой вспомогательного вещества. Чтобы обеспечить высокую ско-

рость фильтрации, вспомогательное вещество смешивается с фильтруемой жидкостью, в особенности при наличии в ней твердых частиц, образующих студенистые или липкие осадки. Эти фильтры по существу не отличаются от фильтров, работающих под давлением в условиях образования осадка. Хотя при надлежащем выборе вспомогательного вещества эти фильтры могут применяться и для очистного фильтрации, они чаще применяются как первичные осветлители с использованием так называемых «быстрых» вспомогательных веществ, резко повышающих производительность. Таким образом, рассматриваемые фильтры могут предшествовать очистным фильтрам при обработке напитков. Они широко используются для регенерации растворителей на установках химической чистки и могут быть применены для очистки воды в плавательных бассейнах.

В качестве фильтровальных элементов могут быть применены: вертикальные прямоугольные сетчатые листы со слоем вспомогательного вещества, помещенные в вертикальный цилиндрический резервуар; вертикальные круглые листы в виде сеток со слоем вспомогательного вещества, помещенных в горизонтальный цилиндрический резервуар; круглые пористые керамические листы; обвитые проволокой цилиндрические металлические листы; полые трубки из пористой керамики, пористого угля, проволочной сетки или пористого слоя нержавеющей стали. Особое приспособление позволяет брать пробы фильтрата из каждого элемента. Это дает возможность оператору выключать из работы любой из них. Плиточно-рамные фильтпрессы также могут быть легко приспособлены для осветления при помощи вспомогательного вещества.

Следует отметить новое в способах извлечения осадка из фильтров, работающих с вспомогательным веществом под давлением. Так как осадок легко удаляется с фильтрующих элементов и обычно не используется, имеется хорошая возможность извлекать его без остановки и разбора корпуса фильтра. Таким образом осветлители с вспомогательным веществом имеют большое сходство с листовыми фильтрами, работающими под давлением, из которых осадок разгружается во влажном состоянии; для обеих групп фильтров характерна однотипность конструкции и принципов действия. Полученный осадок разгружается обратным током фильтрата, отдувкой воздухом, барботажем, вибрацией, центробежной силой, различными смывными разбрызгивающими устройствами и снимается ножом. Многие из этих способов запатентованы и являются главными отличительными достоинствами этой группы фильтров.

При эксплуатации фильтров с вспомогательным веществом следует наблюдать за тем, чтобы перед началом фильтрации на фильтрующем элементе откладывался равномерный и однородный слой вспомогательного вещества. В противном случае пропускная способность фильтра может быстро и значительно понизиться.

Патронные осветлители. В таком осветлителе в качестве фильтрующих элементов применяются цилиндрические патроны, собранные из колец прессованной бумаги, пористой керамики и другого материала. Осветлитель обычно располагается на трубопроводе, по которому протекает обрабатываемая жидкость. Механические или краевые фильтры состоят из наборов металлических дисков, разделенных точными интервалами, или из проволоки, навитой на опорную перегородку по желобкам с точным шагом, или из сочетания обеих конструкций. Фильтруемая жидкость обычно под дей-

ствием вакуума протекает в радиальном направлении между дисками, проволоками или слоями бумаги, и частицы, более крупные, чем щели, задерживаются на внешней стороне цилиндрического патрона. Краевые фильтры могут извлекать частицы размером до 25 мкм, но наиболее часто применяемое минимальное расстояние между фильтрующими элементами вдвое больше этой величины. Фильтры имеют небольшую емкость (по удерживаемой твердой фазе) и поэтому должны часто подвергаться очистке во избежание забивки. В некоторых конструкциях обеспечивается непрерывная очистка. Например, фильтр «Фло-клин» фирмы Куно из навитой проволоки снабжен медленно вращающимся соплом, с помощью которого производится обратная промывка элемента фильтратом, а «Авто-клин» оборудован скребком, установленным в прорезях внутреннего диска, чтобы счищать скопившийся осадок. В обоих случаях удаленный осадок падает в грязеотстойник, откуда вымывается через некоторые промежутки времени.

Большинство патронных осветлителей представляют собой фильтры микронного класса с элементами, изготовленными из пропитанной смолой фильтровальной бумаги, пористой керамики или пористой нержавеющей стали (с определенной пористостью). Применимы также и другие нержавеющие металлы. Элементы выбирают так, чтобы из раствора удалялись частицы крупнее микронной фракции, хотя есть фильтры для извлечения частиц размером 10 мкм и меньше. При правильном выборе фильтра (многоэлементного или с несколькими включенными параллельно патронами) можно получить любой желаемый расход жидкости, исходя из приемлемого гидравлического сопротивления (обычно меньше 1,4 ат). Если давление повышается до допустимого максимума, то патрон необходимо открыть и заменить элемент. В микронных фильтрах элементы волокнистого типа нельзя подвергать очистке, поэтому расходуют фильтровальный материал экономно, так как отработанные элементы обычно выбрасывают (их стоимость незначительна). Отработанные элементы, изготовленные из керамики, обычно подвергают очистке, а из нержавеющей стали — химической обработке.

Некоторые патронные фильтры набируются адсорбентом — активированным углем или фуллеровой землей (например, для очистки масла), а другие — бумажной или сукном, расположенным на проволочных сетках.

Различные другие осветлители. Некоторые масла осветляют прокачиванием (или процеживанием) через камеры, заполненные отходами неметаллических волокон, твердыми адсорбентами, или через тканевые мешки. Медленное процеживание (под действием силы тяжести) делает этот способ обычно непригодным для обслуживания химических процессов.

Для селективного извлечения железа или других частиц, обладающих магнитными свойствами, из жидкости пригодны различные магнитные сепараторы. Фильтруемая жидкость протекает над решетками, которые извлекают присутствующую в растворе магнитные твердые частицы мельче 1 мкм.

Решетки очищаются размагничиванием и промыванием струей жидкости. По этому же принципу действуют магнитные фильтры, в которых применяются постоянные магниты. Так, в магнитном сепараторе-охладителе жидкость движется вокруг магнитного вращающегося барабана, к которому прилипают магнитные частички. Они снимаются с барабана скребком.

Факторы, влияющие на выбор фильтра для обработки наиболее характерных материалов

Материал	Характеристика	Разреже- ние, мм рт. ст.	Давление, ат	Производительность фильтра		Типы пригодных фильтров		
				кг/(м ² ·сутки)	м ³ /(м ² ·ч)	пласти- чатый или рамный	бара- банный	вакуум- ный непрер- ывного действия
Воды сточные	Коллоидные частицы и муль	560—610			1 220—12 200	—	—	×
Кристаллы (соль и др.)	Гранулированные или кристалличе- ские частицы	50—150			14 600—58 500	—	—	×
Лаки	Непрозрачные вязкие жидкости, филь- труются горячими		1,05—1,1		200	×	—	—
Масла минераль- ные (с глиной, воском)	Удаляются отбели- вающие глины (1—20%) из масел или нефтепродук- тов		$P_{\max} = 3,5$					
					120—1200 (смазочное масло)	—	×	—
					1000—3000 (бензин)	—	×	—
Песок и гравита- ционные кон- центраты	Металлические и не- металлические ми- нералы, почти не содержат мути	50—150			48 000—340 000	—	—	×
Пигменты	Пачкающие, липкие тонкоизмельчен- ные некристалли- ческие		2,8—3,5		Периодиче- ский процесс	×	×	—
		500—685			975—2440	—	—	×
Раствор тростни- кового сахара (осветление) и напитки	Сиропы и растворы с малым содержа- нием твердой фазы		2,8—3,5			×	×	—
		450—500			61—2380	—	—	×
Раствор цемент- ный	Тонкоизмельченные известняк, сланец или глина и т. д.	450—500			1 950—9 750	—	—	×
Флотоконцентраты	Тонкоизмельченные минералы	450—500			1 950—8 800	—	—	×
Шлам тростнико- вый	Растительные волокна и тростниковый сок					—	—	×
Шлам пшанидов	Тонкоизмельченные руды	450—500			1 950—9 750	—	—	×
Целлюлоза и бу- мага	Свободно филь- трующиеся волокна	150—400			975—5 850	3,7—73,4 (воды)	—	×

ВЫБОР ФИЛЬТРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Для правильного выбора фильтрующего оборудования необходимо учитывать множество различных факторов¹. В большинстве случаев необходимо провести лабораторные испытания (как описано ранее), а после этого найти равнодействующую таких параметров, как производительность (по готовому продукту), первоначальная стоимость, рабочая стоимость (включая эксплуатационные расходы) и надежность действия.

В табл. II-15 приведены данные о некоторых характерных материалах и пригодных для их обработки фильтров.

А. Г. Касаткин, Основные процессы и аппараты химической технологии, Госхимиздат, 1960. — П. Г. Романков, Гидравлические процессы химической технологии, Госхимиздат, 1948. — Я. Циборовский, Процессы химической технологии, Госхимиздат, 1958. — З. Б. Канторович, Машинная химическая промышленности, Изд. «Машиностроение», 1965. — В. А. Жужиков, Фильтрование, Госхимиздат, 1968. — Н. В. Шпанов, Фильтры непрерывного действия, Машгиз, 1949. — М. В. Пискарев, Фильтровальные ткани, Изд. АН СССР, 1963. — А. Е. Шейдеггер, Физика течения жидкостей через пористые среды, перев. с англ., Госпотехиздат, 1960. — В. И. Аравин, С. Н. Нумеров, Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде, Гостехтеоретиздат, 1953. — Н. И. Дружинин, Метод электрогидродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации, Госэнергоиздат, 1956. Фильтростроение за рубежом, ЦИТИАМ, 1963. — Фильтры Каталог-справочник, Машгиз, 1955. — Фильтры для жидкостей, ч. I и II, Каталог ЦИТИХИМНЕФТЕМАША, 1965.

¹ Smith, Chalmers et al., Chem. Eng., 62 (6), 177; 191 (1955).

ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ

Центрифуги применяются для разделения неоднородных жидких систем путем осаждения или фильтрования. Благодаря тому, что оба процесса протекают в результате воздействия мощного поля центробежных сил, их скорость значительно выше, чем в случае действия поля тяжести. При движении тела вокруг неподвижной оси с постоянной угловой скоростью оно испытывает ускорение, возникающее от изменения направления скорости тела и характеризующее отклонение движения от прямолинейного. Это ускорение направлено по главной нормали траектории движения тела к центру вращения, почему его называют центростремительным. Последнее возникает под действием центростремительной силы, направленной аналогично центростремительному ускорению. На элемент жидкости, вращающейся вместе с сосудом, также действует центростремительное ускорение. Вращающуюся вместе с сосудом жидкость можно рассматривать как находящуюся в относительном покое. Пользуясь системой координат, связанной с сосудом, можно ввести центробежную силу инерции, равную по величине центростремительной силе, но направленную в противоположную сторону. Эта сила вызывает осаждение взвешенных в жидкости частиц или фильтрование жидкости через пористый слой осадка, находящегося внутри перфорированного вращающегося сосуда.

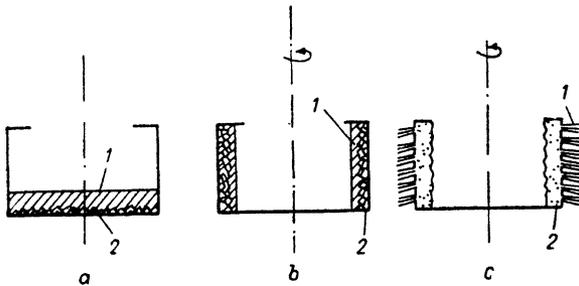


Рис. II-130. Принципы осаждения и фильтрования в центрифугах:

a — неподвижный сплошной ротор; *b* — осаждение во вращающемся сплошном роторе; *c* — фильтрование во вращающемся перфорированном роторе; *1* — жидкость; *2* — осадок.

На рис. II-130 схематически показаны принципы разделения неоднородных жидкостей. На рис. II-130, *a* изображен неподвижный цилиндрический сосуд, частично заполненный жидкостью, содержащей твердые частицы большей плотности, чем жидкость. Свободная поверхность жидкости в сосуде является горизонтальной плоскостью. Через определенный отрезок времени все взвешенные в жидкости частицы осаждаются на дне сосуда.

На рис. II-130, *b* изображен такой же сосуд с жидкостью, но вращающийся вокруг вертикальной оси. На жидкость и взвешенные в ней твердые частицы в этом случае действуют две силы: сила тяжести, направленная вниз, и центробежная сила инерции, направленная радиально. В промышленных центрифугах центробежная сила так велика, что силой тяжести можно пренебречь. На рис. II-130, *b* показана поверхность уровня жидкости в чисто центробежном поле — она цилиндрическая. Взвешенные в жидкости частицы оседают в ра-

диальном направлении и образуют слой осадка, сильно прижатый к цилиндрической стенке сосуда.

На рис. II-135, *c* изображен вращающийся вокруг вертикальной оси цилиндрический сосуд, стенки которого перфорированы и покрыты фильтрующим материалом. Жидкость может вытекать из сосуда наружу, а твердые частицы удерживаются фильтрующей поверхностью. Почти вся жидкость довольно быстро покинет сосуд, а оставшийся в нем осадок будет содержать незначительное количество жидкости.

ВЕЛИЧИНА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ

Промышленные центрифуги развивают поле центробежных сил, напряженность которого во много раз превышает напряженность поля сил тяжести. Для характеристики напряженности поля центробежных сил, развиваемого центрифугой, удобно пользоваться понятием фактора разделения, который является отношением ускорения поля центробежных сил к ускорению поля тяжести. У стенки ротора диаметром D_p фактор разделения центрифуги $F_{ГД}$ достигает величины:

$$F_{ГД} = 5,55 \cdot 10^{-6} D_p n^2 \quad (II-32)$$

где n — число оборотов ротора в минуту; D_p — диаметр ротора, см.

НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТЕНКАХ РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ

При вращении цилиндрического ротора центрифуги в его стенках возникают напряжения, определяемые из уравнения:

$$\sigma_0 = 2,74 \cdot 10^{-3} n^2 D_p^2 \rho \text{ кгс/см}^2 \quad (II-33)$$

где ρ — плотность материала стенки, $\text{кгс} \cdot \text{сек}^2/\text{см}^4$.

Находящаяся в роторе жидкость во время его вращения оказывает на стенки давление p , величина которого определяется из формулы:

$$p = 1,36 \cdot 10^{-3} n^2 \rho_{ж} (D_p^2 - D_{вн}^2) \text{ кгс/см}^2 \quad (II-34)$$

где $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, $\text{кгс} \cdot \text{сек}^2/\text{см}^4$; $D_{вн}$ — внутренний диаметр слоя жидкости, см.

Давление жидкости вызывает дополнительное напряжение в стенке цилиндра:

$$\sigma_e = 0,678 \cdot 10^{-3} D_p n^2 \rho_{ж} \frac{(D_p^2 - D_{вн}^2)}{\delta} \quad (II-35)$$

где δ — толщина стенки, см.

Полное напряжение в стенке цилиндра будет $\sigma = \sigma_0 + \sigma_e$

$$\sigma = 2,74 \cdot 10^{-3} n^2 D_p \left[\rho D_p + \frac{\rho_{ж} (D_p^2 - D_{вн}^2)}{4\delta} \right] \quad (II-36)$$

Давление жидкости, действующее на стенки цилиндра, может быть велико, но обычно напряжение в стенке от действия сил инерции бывает больше, чем от давления жидкости на стенки цилиндра. Например, на стенки цилиндра диаметром 407 мм, вращающегося со

скоростью 5000 об/мин и содержащего слой жидкости толщиной 16 мм, жидкость оказывает избыточное давление в 35 ат. Если цилиндр изготовлен из нержавеющей стали толщиной 12,5 мм, то общее напряжение в стенке будет 146 кгс/см², из которых 62% составляют напряжения от собственных сил инерции стенки и 38% — напряжение, обусловленное давлением жидкости.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦЕНТРИФУГ

Центрифуги изготавливаются из прочных сплавов, способных выдерживать большие нагрузки растяжения. Технические условия на изготовление тихоходных фильтрующих центрифуг значительно менее жестки, чем для быстроходных осадительных центрифуг, поэтому для

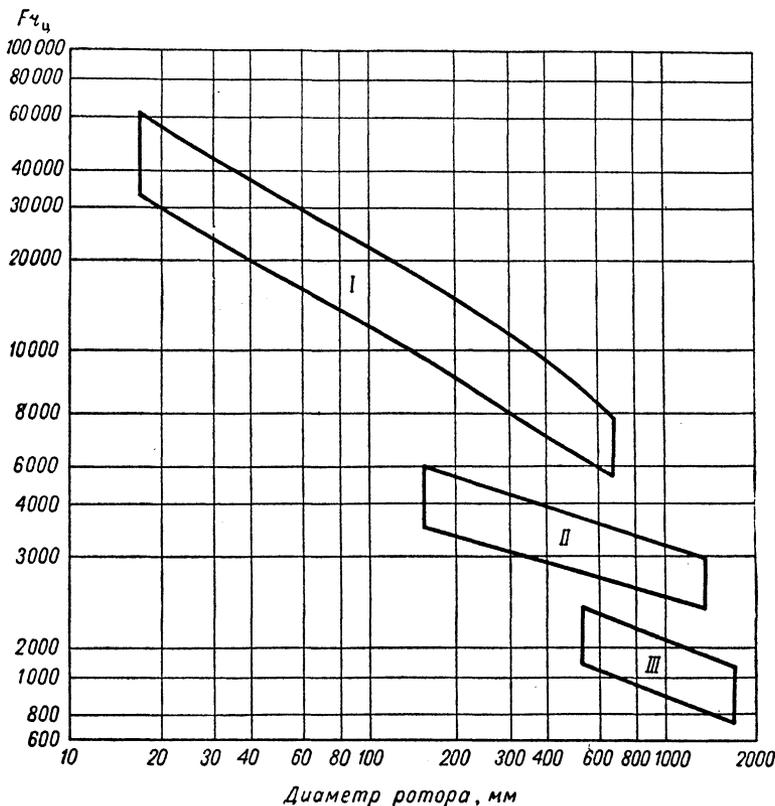


Рис. II-131. Зависимость между диаметром ротора и фактором разделения различных типов центрифуг:

I — трубчатые, тарельчатые, с выгрузкой через сопла и клапаны; II — шнековые осадительные; III — фильтрующие.

Уравнения (II-32) и (II-33) показывают, что фактор разделения центрифуги возрастает пропорционально D_p , а напряжения от сил инерции стенки увеличиваются пропорционально D_p^2 . Поскольку допускаемая величина напряжений ограничивает рабочую скорость ротора центрифуги, то при данном материале для изготовления ротора центрифуги, развивающего большую центробежную силу, можно проектировать цилиндр малого диаметра, так как в случае цилиндра большого диаметра развиваемая максимальная центробежная сила сравнительно мала.

На графике II-131 показана ориентировочная зависимость между диаметрами роторов центрифуг различных типов и максимальной величиной фактора разделения центрифуг. Наибольшие величины фактора разделения развивают осадительные центрифуги, в которых не применяются выгружающие осадок шнеки.

изготовления тихоходных машин имеется более широкий выбор материалов: для них используются сталь, гуммированная сталь, нержавеющая сталь и монель-металл. Для изготовления быстроходных моделей выбор более ограничен: ротор чаще всего изготавливается из высокопрочной углеродистой стали, покрытой оловом или нержавеющей, по большей части типа 316; применяются часто нержавеющие стали типов 302, 304, 431К, а также монель и инконель, хастелой С и сплавы титана. Бункера, питатели и разгрузочные устройства, как неподвижные узлы, могут быть изготовлены из любого коррозионностойкого материала.

КРИТИЧЕСКОЕ ЧИСЛО ОБОРОТОВ

При проектировании быстро вращающихся машин необходимо учитывать возможность прохождения ими критической скорости, т. е. такой угловой скорости,

при которой возникают собственные колебания вращающейся детали. При этой скорости незначительный дебаланс ротора усиливается во много раз и может привести к значительному искривлению вала, к возникновению больших динамических напряжений и даже к авариям. Скорости, соответствующие собственным частотам колебаний более высокого порядка, являются также критическими, но приводят к относительно меньшим отклонениям от нормальной работы аппарата, чем скорость, соответствующая первой частоте колебаний. Критическая скорость может быть вычислена по известным моментам инерции детали, но для таких сложных деталей, какими являются многие роторы центрифуг, может быть определена только экспериментально. Большинство центрифуг работает при скорости, превышающих первую критическую, и поэтому они должны проходить ее при разгоне или остановке ротора; это не создает затруднений в том случае, когда ротор хорошо отбалансирован.

ОСАДИТЕЛЬНЫЕ ЦЕНТРИФУГИ

Осадительные центрифуги выделяют твердые частицы из жидкости в результате осаждения их в направлении к оси или от оси вращения. Если плотность твердых частиц меньше плотности жидкости, то они движутся по направлению к свободной поверхности жидкости; если же они имеют большую плотность, чем жидкость, они осаждаются на внутренней поверхности ротора; отсюда они выводятся механически или вручную. В некоторых моделях не стремятся к фиксации частиц на стенках ротора (барабана), а непрерывно выводят их через сопла в виде густой суспензии. Осадительные центрифуги с роторами малого диаметра могут работать при очень высоких скоростях.

Большая часть осадительных центрифуг работает непрерывно или почти непрерывно, если принимать во внимание только подачу и вывод центрифугируемой жидкости. В некоторых случаях приходится периодически прекращать подачу жидкости для удаления накопившегося твердого осадка. Эти перерывы могут длиться более 30 мин или менее нескольких секунд. Во многих моделях жидкость и концентрат твердых веществ выгружаются непрерывно; таким образом машина может работать непрерывно в течение многих часов или дней. Лабораторные или аналитические центрифуги работают периодически и имеют малые емкости. Промышленные центрифуги по большей части работают непрерывно.

Трубчатые сверхцентрифуги. Наиболее распространенной конструкцией является трубчатая сверхцентрифуга (рис. II-132). Выпускные модели снабжены ротором диаметром 100 мм и длиной 765 мм; он вращается вокруг вертикальной оси при 15 000 об/мин, создавая центробежную силу, в 13 200 раз превышающую силу тяжести. Ротор свободно подвешен сверху и имеет внизу свободную направляющую; таким образом он может самоцентрироваться, если только значительно не нарушится балансировка ротора под влиянием накопившегося твердого осадка. Самоцентрирование используется у многих центрифуг, работающих на высоких скоростях. При низких скоростях даже малая неуравновешенность ротора может быстро вывести из строя центрифугу, если только не предусмотрена возможность компенсации нагрузок, возникающих в результате выхода ротора из равновесия.

Разделяемая жидкость подводится к центру дна ротора трубчатой сверхцентрифуги через неподвижное

сопло. Жидкость получает ускорение от вращения ротора и образует слой у внутренней стенки ротора. Если траектория данной частицы пересекает стенку ротора, то частица удаляется из жидкости. В противном случае она уходит вместе со сливом. Слой жидкости не всегда полностью заполняет ротор. Его толщина регулируется положением порога, находящегося в верх-

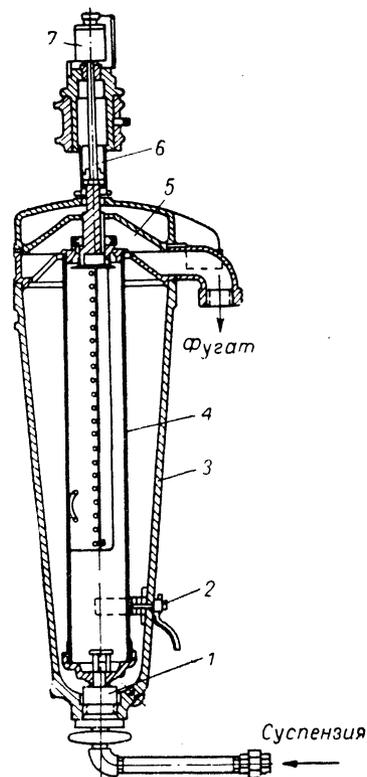


Рис. II-132. Трубчатая сверхцентрифуга:

1 — направляющая втулка; 2 — тормоз; 3 — кожух; 4 — ротор; 5 — сборник фугата; 6 — вал; 7 — шкив.

ней части ротора. Для того чтобы предотвратить скольжение жидкости относительно стенок ротора, установлена крыльчатка. Из ротора жидкость попадает в неподвижный кожух и выводится через отводящую трубку. Она покидает ротор при высокой скорости и удаляется о кожух с достаточно большой силой. В результате жидкость раздробляется на мелкие капельки и нередко частично испаряется, поэтому у некоторых моделей центрифуг полностью закрывают выходное отверстие для предотвращения потерь летучих жидкостей. В некоторых случаях жидкость пенится на выходе. Тогда необходимо предотвратить соприкосновение жидкости с воздухом, как например, при очистке фруктового сока. В этих условиях жидкость выводится из ротора с помощью трубчатого коллектора, вычерпывающего жидкость под давлением (включение воздуха невелико или его нет вовсе). Другие приспособления для удаления жидкости без аэрации описаны в разделе, посвященном тарельчатым центрифугам.

Создавая два выхода для жидкости, расположенные на разных радиальных расстояниях от оси (рис. II-132), можно одновременно удалить из ротора две несмешивающиеся жидкости. Более легкая располагается слоем ближе к оси ротора и выводится, как из осветляющих центрифуг, а более тяжелая образует наружный слой и выводится самостоятельно в кожух. Твердые частицы осаждаются так же, как и в случае одной жидкости.

Производительность трубчатых очистителей для переработки жидкости зависит от величины разности плотностей твердой фазы и жидкости, а также от размера и формы частиц, вязкости жидкости и желаемой степени очистки. Типовая центрифуга с ротором диаметром 100 мм пропускает от 140 до 280 л/ч при условиях трудной очистки и доходит до 5500 л/ч при легком разделении; более подробные данные приведены в табл. II-16.

Осадок удаляется из таких центрифуг вручную. В некоторых случаях для облегчения удаления твердых частиц применяется вкладка из пергаментной бумаги. При работе с трубчатыми роторами удается собрать в одном цикле работы только 2,3—4,5 кг осадка. Лишь в редких случаях экономично разгружать ручную центрифугу более одного раза в час, поэтому целесообразно, чтобы концентрация твердых веществ в жидкости не превышала 0,5—1 вес. %.

Многокамерные центрифуги. Чтобы удлинить путь, который должен быть пройден жидкостью во время очистки, иногда ротор делится на несколько кольцевых камер (от двух до шести).

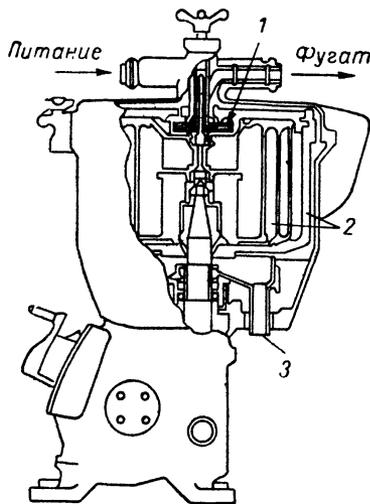


Рис. II-133. Многокамерная центрифуга:

1 — напорный диск; 2 — многокамерный ротор; 3 — дренаж.

На рис. II-133 изображен трехкамерный ротор; жидкость поступает в верхнюю часть ротора. Твердые частицы наибольшего размера движутся с потоком по внутренней поверхности ротора и оседают во внутренней камере; наиболее тонкие частицы уносятся в наружные камеры. По мере заполнения внутренних камер все большее и большее количество твердых частиц уносится в наружные камеры. Производительность по уловленной твердой фазе не увеличивается в резуль-

тате разделения ротора на камеры. Однако распределение грубых и тонких частиц по отдельным камерам в некоторых случаях приводит к более полному удалению твердых частиц, чем при простом трубчатом роторе. Кроме того, вследствие частичного освобождения наружной камеры от твердых отложений жидкость, покидая центрифугу, подвергается воздействию наиболее интенсивного поля центробежных сил. В обычном роторе накопление твердого остатка постепенно уменьшает рабочий диаметр ротора и снижает величину центробежной силы на наибольшем радиусе потока жидкости.

Тарельчатые центрифуги. Наиболее распространенными осветляющими центрифугами являются показанные на рис. II-134. Подача осуществляется к центру ротора у дна. Поток поднимается по каналу, образованному отверстиями в конических тарелках, расположенных друг от друга на расстоянии 0,5—1,1 мм. Угол наклона образующей тарелки к вертикали составляет 35—50°. В каждой тарелке имеется несколько отверстий диаметром 7—13 мм. Эти отверстия после сборки и установки тарелок в роторе образуют каналы, по которым жидкость поднимается от дна ротора. Тарелки предназначены для уменьшения пути осаждения, поскольку твердые частицы должны пройти только короткое расстояние перед тем, как они достигнут противоположной стороны одной из тарелок.

В простейшей модели тарельчатой центрифуги (рис. II-134) выделенные твердые частицы должны периодически удаляться вручную, как и в трубчатых центрифугах. Это вызывает необходимость остановки машины, разборки барабана с извлечением пакета тарелок. Хотя отдельные тарелки редко требуется чистить, однако удаление твердых частиц вручную может быть экономично только при очень малом процентном содержании твердых частиц в жидкости. В описываемых ниже моделях твердый осадок удаляется автоматически без снижения скорости вращения ротора.

Жидкость может быть выведена из ротора через диафрагмы, как это практикуется в трубчатых центрифугах. Созданы другие способы выведения жидкости для предупреждения пенообразования и соприкосновения с воздухом, а также для удаления жидкости под давлением. В моделях герметических центрифуг, показанных на рис. II-134, жидкость поступает в ротор через полый стержень у дна, а очищенная жидкость покидает центрифугу через трубку у центра вверху. Сальники на соединениях ротора с неподвижной питающей трубой и трубой выгрузки допускают ведение работ под избыточным давлением от 5,6 до 7 ат. Клапан, находящийся на выходном трубопроводе, поддерживает постоянство давления. Другие модели снабжены также нагнетательными дисками, смонтирован-

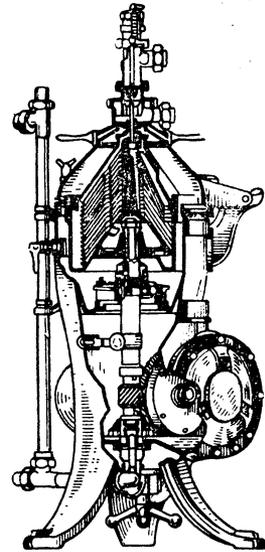


Рис. II-134. Герметический тарельчатый сепаратор.

ными на неподвижной питательной трубе (рис. 11-133). Вращающаяся жидкость поступает снаружи диска и протекает внутрь, проходя между неподвижными лопастями кольцевой камеры, окружающей питающую трубу, и оттуда наружу. В нагнетательном диске большая часть кинетической энергии жидкости преобразуется в давление и жидкость покидает ротор под избыточным давлением, достигающим 7 ат.

Тарелки центрифуги бывают диаметром от 175 до 750 мм и создают центробежную силу, превышающую в 4000 и 10 000 раз силу тяжести. Способность разделения у тарельчатых центрифуг может быть такой же, как у трубчатых, и выше несмотря на развиваемую ими меньшую центробежную силу. Тарельчатые центрифуги имеют свою область применения. Они эффективны при разделении и концентрации эмульсий. Большое количество машин было выпущено для концентрирования сливок.

Центрифуги с выгружающими соплами. При работе центрифуги, показанной на рис. 11-135, твердые ча-

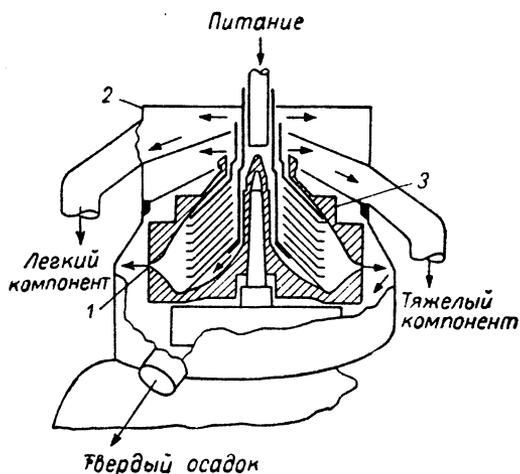


Рис. 11-135. Ротор с выгрузкой осадка через сопла:

1 — сопла; 2 — кожух; 3 — ротор.

жидкостей, как, например, при отделении воды и пульпы от цитрусового масла. В данном случае через сопла удаляется вода с пульпой; ценное очищенное масло выводится без потерь из жидкости, содержащей много легкого компонента.

Широко распространена центрифуга для выделения одного компонента и концентрирования другого с частичным возвратом в ротор сгущенной суспензии. Очищенная жидкость удаляется обычным путем, часть же суспензии, выходящая через сопла, возвращается в ротор для повторного центрифугирования. Благодаря этому становится возможным увеличивать концентрацию сгущенной суспензии и снижать потери жидкости.

Максимально допустимое содержание твердых веществ в обрабатываемой суспензии зависит от их природы; в некоторых случаях их содержание в суспензии может доходить до 50 вес. %, но обычно предельной является концентрация 20—30%.

Удаление твердой фазы через клапаны и саморазгружающиеся сепараторы. В некоторых центрифугах по периферии ротора установлены клапаны, через которые выводится твердая фаза в виде уплотненного осадка. Клапаны периодически открываются, выбрасывая осадок с небольшим количеством жидкости. Клапаны обычно открываются при помощи гидравлического механизма, подающего жидкость в корпус клапана; механизм приводится в действие находящимися во время его устройствами, регулируемые по времени в отношении частоты и продолжительности периода открывания. В других конструкциях (рис. 11-136) действует

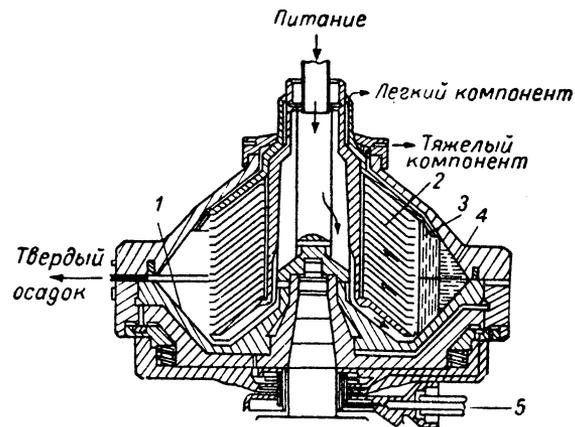


Рис. 11-136. Саморазгружающийся ротор:

1 — поршень; 2 — легкий компонент; 3 — тяжелый компонент; 4 — твердые вещества; 5 — гидравлическая система.

гидравлический плунжер, периодически открывающий щель на периметре ротора, через которую выгружается накопившийся осадок. Обе эти машины выгружают более сухой осадок, чем модель с выгружающими соплами.

Центрифуги с выгружающим шнеком. Некоторые осадительные центрифуги для непрерывного удаления твердой фазы снабжены одним или несколькими шнеками, вращающимися в том же направлении, что и барабан, обычно с несколько меньшей скоростью. Как показано на графике 11-131, это дополнительное устройство снижает величину максимальной центробежной силы. Такие модели не являются особо хорошими осветлителями, однако могут разделять суспензии

стицы непрерывно выводятся из ротора. Ротор примерно такой же, как и у описанных тарельчатых центрифуг, но более массивный, и по окружности в нем установлено несколько выводных сопел, имеющих обычно диаметр в 1—3 мм. Осветленная жидкость выводится из верхней части барабана, как у обычных тарельчатых центрифуг. Сгущенная суспензия непрерывно выводится через сопла. Направляя сопла тангенциально против движения ротора и используя таким образом часть кинетической энергии выгружаемой через сопла жидкости, можно снизить затраты энергии на работу центрифуги.

Многие модели центрифуг с выводом сгущенной суспензии через сопла специально предназначаются для центрифугирования продуктов, имеющих определенную концентрацию твердой фазы. Скорость вращения барабана и производительность такого оборудования весьма зависят от размера и числа сопел. В этих центрифугах разделяют суспензии с относительно небольшим содержанием твердой фазы. Их выгодно применять, когда осветление сопровождается разделением

с высоким содержанием твердой фазы большого интервала дисперсности. Они выдают менее влажный осадок, чем другие осадительные центрифуги, так как он удаляется из ротора после осаждения твердой фазы и выделения его из жидкости. Эти центрифуги применяются по большей части тогда, когда целесообразно

лется по выводящей трубе. Твердые частицы осаждаются на стенки ротора и транспортируются шнеком к узкому концу ротора. Образовавшийся осадок выводится шнеком из слоя жидкости, проходит зону обезвоживания и выбрасывается через разгрузочные окна. При прохождении осадка через зону обезвоживания

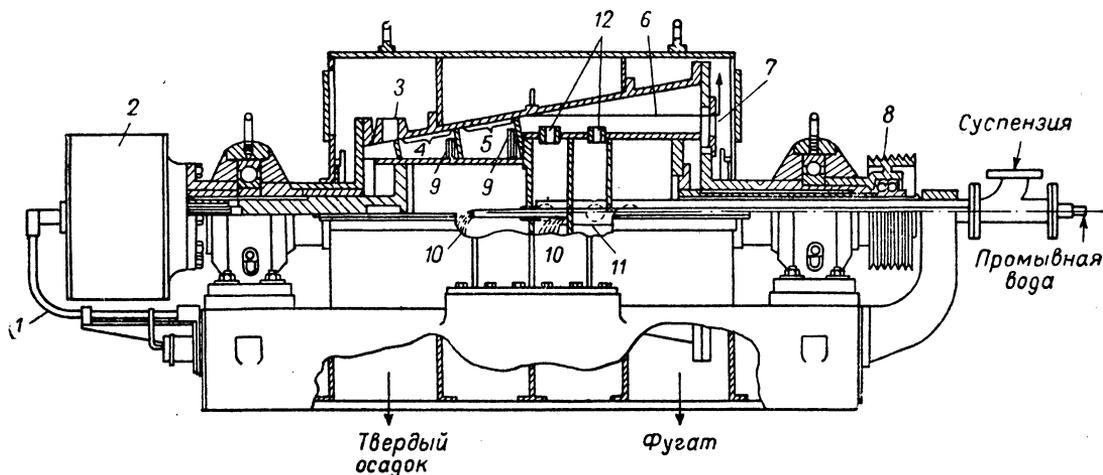


Рис. II-137. Осадительная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка с коническим ротором:

1 — выключатель при перегрузке; 2 — привод шнека для выгрузки осадка; 3 — отверстие для выгрузки осадка; 4 — зона сушки; 5 — зона промывки; 6 — уровень глубины зоны осаждения; 7 — регулятор выхода фугата; 8 — приводной шкив; 9 — сопла; 10 — промывная вода; 11 — питающая труба; 12 — входные отверстия.

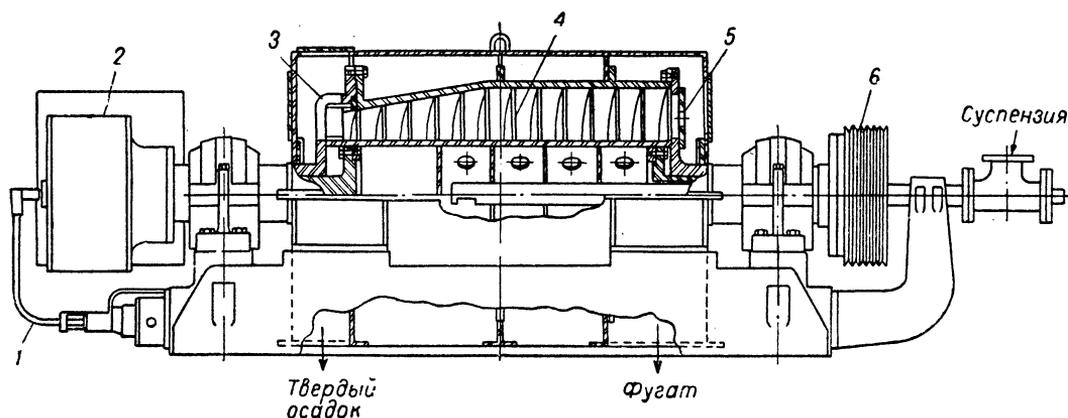


Рис. II-138. Осадительная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка с цилиндрико-коническим ротором:

1 — выключатель при перегрузке; 2 — привод шнека; 3 — отверстия для вывода осадка; 4 — шнек; 5 — регулятор выхода фугата; 6 — приводной шкив.

выделять твердые вещества из жидкости без осветления последней.

Две распространенные центрифуги показаны на рис. II-137 и II-138. Модель, изображенная на рис. II-137, имеет конический ротор, вращающийся вокруг горизонтальной оси; он питается суспензией через неподвижный питатель, установленный по оси ротора. Жидкость под влиянием поля центробежных сил образует слой, толщина которого увеличивается к широкому концу ротора. Фугат выходит через сливные окна в днище ротора и попадает в кожух, из которого уда-

может быть подана жидкость по специальным соплам для его промывки; эта жидкость поступает затем к широкому концу ротора и смешивается с фугатом.

Данные центрифуги предназначаются главным образом для очистки жидкости. Осадок можно транспортировать только в случае равновесия сил трения частиц о шнек и о стенки ротора. Если частицы легко скользят по стенке ротора, они захватываются шнеком, прилипая к спирали, вместо того чтобы продвигаться к выходу. Когда осадок выводится из зоны осаждения, на него перестает действовать подъемная сила, в связи

с чем увеличивается сопротивление движению осадка. От этого твердые вещества, хорошо продвигающиеся в зоне осаждения, могут задерживаться в зоне осушки. В крайних случаях осадок может всплыть и попасть в пограничный слой между разделенными жидкостями разной плотности.

Иногда для лучшего удаления осадка к стенкам ротора прикрепляют полоски шириной ~ 6 мм. Для выгрузки некоторых осадков предпочтителен цилиндрический ротор вместо конического. Ближе к месту вывода осадка диаметр спирали шнека уменьшается, и таким образом слой осадка по мере движения к разгрузочным окнам становится толще. Неподвижный слой твердых частиц создает пологий откос, по которому транспортируется осадок. Подобный же эффект может быть получен введением металлического вкладыша надлежащей формы, который уменьшает величину неподвижного слоя в роторе.

Всплывающая часть осадка легко продвигается по направлению к зоне осушки при помощи шнека.

Модели с цилиндро-коническим ротором (рис. II-138) присущи некоторые преимущества только что описанной центрифуги, и она имеет широкий диапазон применения.

В центрифугах со шнековой выгрузкой осадка широко применяется промывка, что создает весьма положительный эффект, если только большая часть частиц крупнее 80 мкм; промывающая жидкость не должна непосредственно проходить через осадок, она протекает самостоятельно над осадком по периметру спирали, совершая спиральное движение в обратном направлении к движению шнека и проходит в зону осаждения. При наличии частиц мельче 40 мкм промывка осадка не дает положительных результатов.

Применение ножевого съема осадка. При небольшом содержании грубых частиц в суспензии они могут быть легко удалены из большого объема жидкости при помощи центрифуг с ножевым съемом осадка, похожих по внешнему виду на подвесные фильтрующие центрифуги, показанные на рис. II-140. Подобные центрифуги состоят из перфорированного ротора диаметром 760—1200 мм, в котором накапливаются твердые частицы. Жидкость наполняет ротор и переливается через его верхний борт. Горизонтальные круглые вставки с внутренней стороны ротора предохраняют от колебаний жидкости. После накопления достаточного количества осадка подача суспензии прекращается и уменьшается скорость вращения ротора. Лишняя жидкость удаляется из ротора при помощи устанавливаемой вручную отсасывающей трубки, а влажный осадок отделяется ножом и выводится через отверстие в дне ротора.

Выпускаются полностью автоматизированные горизонтальные осадительные центрифуги с ножевым съемом осадка. Порядок проведения операции для них тот же, что и для вертикальных моделей, но удаление оставшейся жидкости и выгрузка осадка производится при полной скорости вращения ротора. При малом содержании твердой фазы в суспензии отвод жидкости можно производить многократно до удаления осадка. Модели, предназначенные для промышленного применения, имеют роторы диаметром 300—2400 мм. Технические характеристики центрифуг приведены в табл. II-16. По большей части центрифуги с ножевым съемом осадка не обеспечивают полного разделения суспензий и применяются в основном лишь для удаления грубых или тяжелых частиц.

Лабораторные центрифуги с определенной порционной загрузкой. Широкое распространение получили лабора-

торные и ограниченное — промышленные центрифуги с порционной загрузкой исследуемой жидкости. Они всегда применяются для исследований или анализа жидких неоднородных систем. Имеющиеся модели представляют собой пробирочные центрифуги и ультрацентрифуги.

Пробирочные центрифуги. Такие центрифуги имеют несколько пробирок емкостью в 10—1000 см³, вращающихся вокруг вертикальной оси с большой скоростью. Твердые частицы отбрасываются к дну пробирки, где их количество может быть определено по шкале. По полученному объему осадка в зависимости от продолжительности центрифугирования может быть оценен процент осаждения. Обычно лабораторные центрифуги с пробирками вращаются со скоростью до 12 000 об/мин и создают центробежную силу на дне пробирки, превышающую силу тяжести в 10 000 раз.

Ультрацентрифуги. Ультрацентрифуга является лабораторным прибором для осаждения и анализа высокодисперсных частиц, в том числе вирусов, протеинов, высоких полимеров и пигментов. Частицы эти весьма малы (до 100 мкм в диаметре) и могут быть осаждены в ультрацентрифуге в течение определенного промежутка времени. Обычно ротор имеет 12 целлулоидных аналитических ковет, каждая емкостью 5—40 см³, которые вращаются при определенном угле наклона их оси к вертикали или в горизонтальной плоскости. В камере ротора во время работы создается вакуум. Выпускаемые ультрацентрифуги вращаются со скоростью до 40 000 об/мин и создают фактор разделения до 173 000. В некоторых ультрацентрифугах можно фотографировать содержимое коветы через определенные интервалы времени с целью определения степени осаждения частиц.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ

На рис. II-131 и в табл. II-16 приведены данные о величине фактора разделения, создаваемого выпускаемыми осадительными центрифугами, и об их производительности. Если исключить из рассмотрения лабораторно-аналитические центрифуги, то можно сказать, что наибольшую центробежную силу создают простые трубчатые и тарельчатые сверхцентрифуги. Введение разгрузочных сопел до некоторой степени снижает достигаемое тарельчатыми сверхцентрифугами максимальное значение фактора разделения; шнеки или выгружающие ножи также довольно значительно снижают эффект влияния центробежной силы. Приведенные величины производительности почти соответствуют набору имеющихся машин, но не полностью характеризуют их. Например, при экономичном режиме работы трубчатой центрифуги с ротором диаметром 100 мм производительность составляет 4,5—23 л/мин, но при легком разделении производительность этой же центрифуги будет 90 л/мин. При затрудненном разделении производительность не должна превышать 2,3 л/мин. Центрифуга с выгрузкой сгущенной суспензии через сопла пропускает значительные количества разделяемой жидкости. Однако центрифуга с барабаном в 350 мм работает при производительности только 4,5—9 л/мин при концентрировании каучукового латекса. Потребная мощность может, кроме того, оказываться в 2 раза больше, чем это указано в табл. II-16.

Осадительные центрифуги непрерывного действия успешно применяются при рабочих температурах 40—180°С и давлениях $p_{изб} = 1 \pm 10$ ат. Жидкость должна

ТАБЛИЦА II-16

Технические характеристики осадительных центрифуг

Тип центрифуги	Диаметр ротора, мм	Скорость вращения ротора, об/мин	Фактор разделения	Производительность		Мощность электродвигателя, кВт
				по жидкости, л/мин	по твердому веществу, т/ч	
Трубчатая	44,5	50 000	62 000	...	...	См. 1
	108	15 000	13 600	4,5—45,4	...	2,2
	127	15 000	16 000	6,8—68	...	2,2
Тарельчатая	178	12 000	14 300	0,45—4,5	...	0,24
	292	6 000	5 900	18,2—182	...	3,7
	610	4 000	5 500	91—910	...	5,5
С выгрузкой через сопла	350	6 250	7 600	68—680	0,1—0,5	14,7
	765	3 000	3 830	182—1820	0,5—2,5	91
Шнековая	133	6 000	3 070	45,4—91	0,25	2,2
	356	4 000	3 160	182	0,5—1,5	11
	460	3 500	3 130	272	0,5—1,5	11
	610	2 800	2 670	454	1,5—3	22
	810	1 800	1 470	1130	3—6	44
	1020	1 600	1 450	1700	10—18	73,6
С ножевым съемом осадка	1370	1 000	770	3400	35—90	110
	510	1 800	920	См. 2	28,6—см. 3	14,7
	910	1 200	740	См. 2	127—см. 3	22
	1680	850	680	См. 2	580—см. 3	29,4

¹ Турбинный привод; 45,5 кг пара в час при $P_{изб} = 2,8$ ат.

² Подача жидкости меняется в зависимости от соотношения T : Ж и желаемой степени очистки.

³ Максимальный объем осадка в роторе в dm^3 .

быть достаточно текучей для прохождения через центрифугу даже после сгущения твердой фазы. Это значит, что ее вязкость должна быть ниже 100,0 *спз* при рабочей температуре. Производительность центрифуги при значительной вязкости поступающей жидкости намного меньше, чем при малой вязкости жидкости, как это следует из уравнения (II-40).

Центрифуги со шнековой выгрузкой осадка редко хорошо разделяют вязкие жидкости. Предпочтительно, чтобы вязкость жидкости после отделения твердой фазы суспензии не превышала 20 *спз*, хотя вязкость суспензии может быть намного выше. Выпускаемые машины могут обезвоживать и отделять твердые частицы размером от 12,5 *мм* и до 1 *мкм*. Однако для обеспечения высокой производительности при разделении суспензий, содержащих очень тонкие частицы, необходимо значительное превышение плотности твердых частиц по отношению к плотности жидкости. Обычно превышение плотности на 0,1 предопределяет относительно легкое разделение. Высокая производительность достигается при разности в плотностях в пределах 0,02—3,2.

ТЕОРИЯ ЦЕНТРИФУГАЛЬНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Скорость осаждающейся в жидкости частицы под действием центробежной силы никогда не достигает предельного значения, как это имеет место при осаждении в поле тяжести. Несмотря на это, применение закона Стокса при определении скорости осаждения частицы в центробежном поле на данном радиусе не при-

водит к ощутимым погрешностям, так что можно написать:

$$u_0 = \frac{\omega^2 r (\rho_T - \rho_{ж}) D_p^2}{18\mu} \frac{m}{сек} \quad (II-37)$$

где ω — угловая скорость вращения ротора, *рад/сек*; ρ_T и $\rho_{ж}$ — плотность твердой фазы и жидкости, *кг/м³*; D_p — эквивалентный диаметр сферической твердой частицы, *м*; μ — вязкость жидкости, *кг/(м·сек)*.

Пусть частицы осаждаются в цилиндрическом или трубчатом роторе радиусом r *м*, суспензия течет тонким слоем толщиной s *м*. В предположении вероятного выделения из потока 50% частиц данного граничного размера D_p , производительность центрифуги по исходной суспензии определится из выражения:

$$Q_c = \frac{(\rho_T - \rho_{ж}) D_p^2 V \omega^2 r}{9\mu s} \frac{m^3}{сек} \quad (II-38)$$

где V — объем жидкости в роторе, *м³*.

По заданному значению Q_c можно определить граничный диаметр частиц $D_{0,c}$:

$$D_{0,c} = \sqrt{\frac{9Q_c \mu s}{(\rho_T - \rho_{ж}) V \omega^2 r}} \quad m \quad (II-39)$$

Большая часть частиц крупнее $D_{0,c}$ осядет на стенку ротора центрифуги; большая часть частиц мельче $D_{0,c}$ уйдет с фугатом.

В случае нецилиндрического ротора или когда слой жидкости в роторе нельзя считать тонким, уравнение (II-39) принимает вид:

$$Q_c = \frac{(\rho_T - \rho_{ж}) D_p^2 V \omega^2 r_{cp}}{9\mu s_{cp}} \frac{m^3}{сек} \quad (II-40)$$

где r_{cp} и s_{cp} — осредненные величины радиуса ротора и толщины слоя потока, *м*.

Уравнение (II-40) может быть представлено в виде:

$$Q_c = \frac{2(\rho_T - \rho_{ж}) D_p^2 V \omega^2 r_{cp}}{18\mu s_{cp}} = 2u_g \Sigma \frac{m^3}{сек}$$

где u_g — предельная скорость осаждения частицы в поле силы тяжести, *м/сек*; Σ — индекс производительности центрифуги¹, представляет собою площадь (в *м²*) сосуда, обеспечивающую такое же осаждение частиц данного размера в поле тяжести, как и в центрифуге.

Для трубчатых центрифуг величина Σ приблизительно может быть определена из уравнения:

$$\Sigma = \frac{\pi l \omega^2}{4g} (3r_{нар}^2 + r_{вн}^2) \quad (II-41)$$

где $r_{нар}$ и $r_{вн}$ — наружный и внутренний радиусы слоя суспензии в роторе; l — длина ротора.

Для тарельчатой центрифуги Σ определяется из уравнения:

$$\Sigma = \frac{2\pi(N-1)(r_{нар}^3 - r_{вн}^3)\omega^2}{3g \operatorname{tg} \theta} \quad (II-42)$$

где N — число тарелок в пакете; $r_{нар}$ и $r_{вн}$ — наружный и внутренний радиусы тарелок; θ — половина раствора угла конуса.

¹ Ambler, Chem. Eng. Progr., 48, 150 (1952).

Характерные значения Σ для трех типов осадительных центрифуг приведены в табл. II-17. На основании результатов лабораторных испытаний или путем сопоставления данных о работе центрифуг разного типа можно принять эффект разделения одинаковым в том случае, если величина Q/Σ (число осветления B) одинакова для обеих машин.

ТАБЛИЦА II-17

Данные для определения характеристики осадительных центрифуг¹

Тип центрифуги	Диаметр ротора, мм	Скорость, об/мин	Индекс производительности Σ , м ²	
			вычисленный	рекомендованный
Трубчатая	45	23 000	287	120
	105	15 000	2 520	2 520
Тарельчатая Со шнековой выгрузкой	258	6 000	12 400	6 300—12 400
	355	3 250	820	558

¹ A m b l e r, Chem. Eng. Progr., 48, 150 (1952).

Подробнее см. Meyer, Smith, Chem. Eng. Progr., 5, 404 (1955).

Таким образом, трубчатая центрифуга с диаметром ротора 105 мм должна иметь в 8,8 большую производительность, чем лабораторная центрифуга с диаметром ротора 45 мм.

вок из-за гидродинамических особенностей внутрироторных потоков. Еще большие поправки необходимы в случае шнековых центрифуг.

ФИЛЬТРУЮЩИЕ ЦЕНТРИФУГИ

В фильтрующих центрифугах твердая фаза удерживается проницаемой для жидкости стенкой ротора и образует осадок. Последний иногда после уплотнения подвергается промывке. Промывная жидкость удаляется последующим центрифугированием. Эти центрифуги снабжены дозирующими устройствами, управляемыми вручную или автоматически. В зависимости от способа выгрузки осадка из ротора фильтрующие центрифуги конструктивно можно подразделить на ряд типов. По назначению они могут иногда называться центрифугами, экстракторами, сушилками и т. д.

В небольших моделях ротор вращается в подшипниках, жестко связанных со станиной или фундаментом. Большие роторы устанавливаются свободно, так чтобы они могли самоцентрироваться. Этого достигают, либо подвешивая ротор сверху, либо подвешивая центрифугу на нескольких колонках.

Центрифуги с жесткими опорами. Небольшие центрифуги с жесткими опорами применяются обычно в специальных случаях, например, для очистки эмульсий, используемых для охлаждения резцов металлообрабатывающих станков, для обезжиривания металлических стружек в цехах холодной обработки металла; для очистки лаков и т. д. Роторы по большей части имеют сплошные стенки; сверху диаметр их больше, чем снизу. Отделенная от материала жидкость, достигнув стенок,

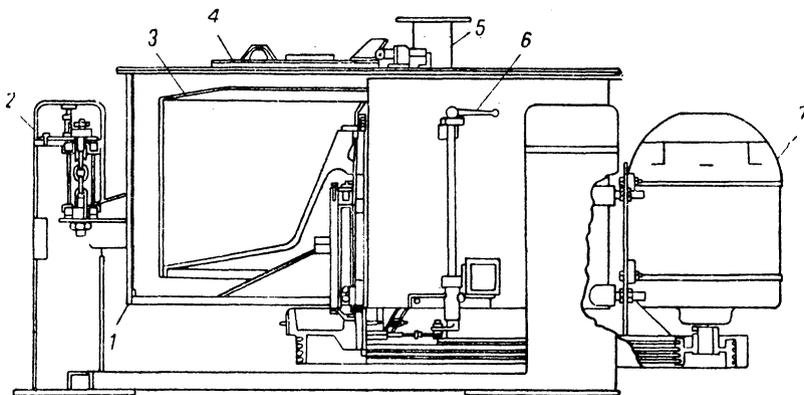


Рис. II-139. Центрифуга периодического действия, подвешенная на колонках:

1 — кожух; 2 — колонка; 3 — ротор; 4 — крышка; 5 — питающая труба; 6 — рукоятка тормоза; 7 — электродвигатель.

При определении производительности используются значения u_g . Однако после введения суспензии во вращающийся ротор фактический диаметр отдельных частиц может значительно меняться. Поэтому фактическая величина Q/Σ может быть меньше расчетной.

Сравнение работы центрифуг по величине Σ целесообразно только в пределах данного типа машин, когда можно считать, что поведение частиц в роторах двух центрифуг различного размера примерно одинаково.

Наиболее эффективно сравнение по величине Σ трубчатых центрифуг. В случае тарельчатых центрифуг при сравнении их по величине Σ требуется введение попра-

влет к более широкому концу ротора и переливается через борт. Загрузка и выгрузка центрифуги производится вручную.

Скорость вращения ротора обычно очень невелика. В связи с неравномерной загрузкой ротора возможны опасные перегрузки машины, вследствие чего конструкция должна быть прочной. Типовая центрифуга для очистки от стружки снабжена ротором, который имеет диаметр у дна 580 мм и 660 мм сверху, а высоту 460 мм. Ротор вмещает 228 кг стальной стружки. Центрифуга совершает 5 рабочих циклов в час. Скорость вращения ротора 1025 об/мин, мощность электродви-

Данные о производительности центрифуг
при обычных условиях работы
Диаметр ротора 1020 мм, емкость 0,22 м³.

Тип центрифуг	Продукт	Продолжительность цикла, мин	Загрузка ротора, кг	Производительность, т/ч
Подвесные	Сахар	2—5	158—226	2—5
	Неорганические соли	10—15	158—318	0,7—2,5
	Органические кристаллы	10—20	113—158	0,4—1
	Тонкие порошки	30	158	0,35
Подвешенные на колонках	Отходы	10	36,4	0,4
	Текстильные материалы	15	31,8—54,5	0,15—0,25
	Соли, кристаллические вещества и порошки			

То же, что и для подвесных машин

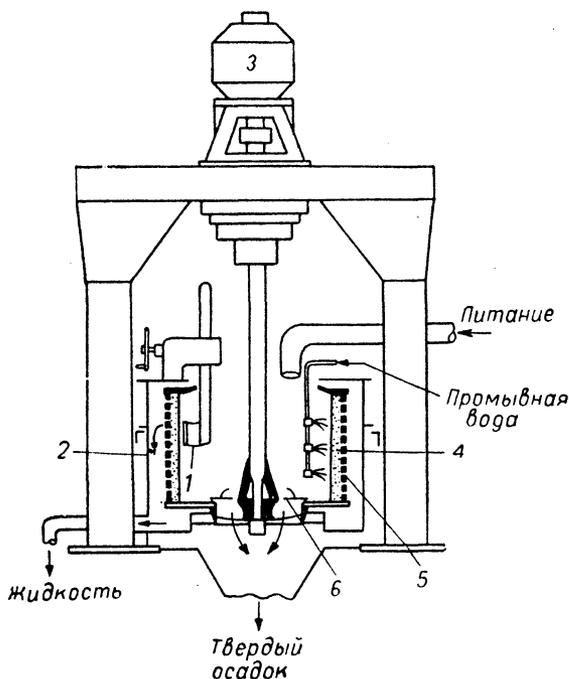


Рис. II-140. Подвешенная центрифуга:

1 — выгружающий нож; 2 — кожух; 3 — электродвигатель; 4 — осадок; 5 — перфорированный ротор; 6 — подвижная плита.

Подвешенные центрифуги. На рис. II-140 показана подвешенная центрифуга, предназначенная для обработки кристаллических и гранулированных материалов. Она работает по циклу, аналогичному для трехколонных центрифуг с нижней выгрузкой. Этот тип широко применяется на сахарорафинадных заводах, где подвергаются центрифугированию большие количества сахарных

уфелей при очень коротких циклах работы (табл. II-18). Большая часть других крупнокристаллических суспензий перерабатывается на фильтрующих центрифугах непрерывного действия. Продолжительность цикла этой центрифуги в обычных условиях (см. табл. II-18) составляет около 15—20 мин. Диаметр ротора 300—1200 мм, а фактор разделения уменьшается по мере увеличения диаметра, как это видно из рис. II-131. Эти машины перерабатывают от 0,0056 до 0,31 м³ твердого за один цикл. Герметизация кожуха позволяет снизить потери летучих. Машины с ручным обслуживанием требуют от персонала напряженного наблюдения, хотя при правильной организации работы один аппаратчик может обслужить несколько машин. Очень часто некоторые элементы цикла, такие, как промывка и отжим, осуществляются автоматически. В таких крупных производствах как сахарное, экономически целесообразно автоматизировать целиком весь цикл.

Полностью автоматизированные центрифуги. Подвешиваемые на колонках и подвесные центрифуги с роторами диаметром 640—1200 мм целесообразно полностью автоматизировать и исключить таким образом непосредственное их обслуживание. На автоматизированных центрифугах устанавливаются электрореле, приводящие в действие пневматические клапаны на линии подачи суспензии и промывки. После окончания центрифугирования и затормаживания ротора до скорости разгрузки, гидравлический механизм снимает осадок и выбрасывает его через отверстие в днище ротора.

Различные элементы цикла регулируются по отдельности и легко изменяются: таким образом, цикл, в течение которого достигнуты наилучшие результаты, может быть повторен, а также в зависимости от условий изменен для достижения лучших результатов. Во многих случаях обрабатываемый продукт подается в ротор и промывается при уменьшенной скорости ротора, например при 980 об/мин, а конечный отжим производится при 1180 об/мин. При других процессах, в зависимости от характеристики твердых веществ и жидкостей, все операции, за исключением выгрузки, производятся при высокой скорости вращения ротора. Скорость же при выгрузке обычно составляет 35—50 об/мин.

На рис. II-141 показана горизонтальная центрифуга с автоматической загрузкой. Принципиально ее работа идентична работе автоматических подвесных центрифуг; продукт загружается в ротор, осадок промывается, отжимается от жидкости и выгружается — все в течение одного цикла; при этом для каждой операции имеется самостоятельный регулятор. Центрифуга отличается от подвесных машин тем, что ротор вращается с постоянной скоростью в течение всего цикла, в том числе в период загрузки, промывки и выгрузки, а осадок удаляется широким ножом с карбидным покрытием. Срез осадка производится в течение 1—2 сек. Рабочий цикл продолжается всего 30—80 сек. Машины этого типа имеют ограниченное применение предпочтительно для обработки легко отделяющихся кристаллов

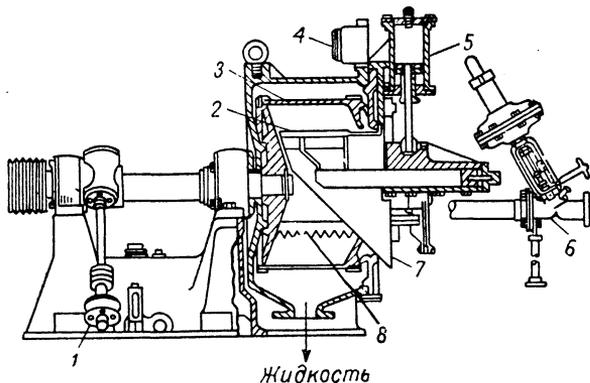


Рис. II-141. Горизонтальная автоматическая центрифуга с ножевым съемом осадка:

1 — гидравлический насос; 2 — выгружающий скребок; 3 — перфорированный ротор; 4 — предельный выключатель; 5 — цилиндр управления скребком; 6 — питающий клапан; 7 — желоб для вывода осадка; 8 — распределитель кристаллов.

крупнее 100 мкм. Обычно ротор имеет диаметр 510—820 мм; производительность от 1—24 т твердого осадка в час. Имея специальную станину, машина может работать под давлением $p_{н\text{об}} \approx 10,5$ ат. Благодаря очень короткому рабочему циклу эта машина вполне может быть включена в непрерывный технологический процесс.

Фильтрующие центрифуги непрерывного действия. Центрифуги в полном смысле слова непрерывнодействующие также применяются только для обработки хорошо фильтрующихся кристаллических продуктов.

Кроме того, они не могут обеспечить получение чистого фугата. Фильтром служит металлическая сетка, зачастую в 150 меш или еще грубее; в некоторых случаях применяются шелевые роторы. Тонкие, плохо фильтрующиеся продукты либо проходят через фильтр, либо так медленно разделяются, что машина становится неэкономичной. Наиболее распространены горизонтальные центрифуги со шнековой и с пульсирующей выгрузкой. Вертикальные аппараты со шнековой выгрузкой и вибрационные, разработанные для обезвоживания угля, нашли пока ограниченное применение лишь в некоторых отраслях промышленности.

Горизонтальные фильтрующие центрифуги со шнековой выгрузкой осадка. Эти машины сходны с описанными ранее осадительными центрифугами со шнековой выгрузкой и цилиндрическим ротором. Жидкость в них не течет вдоль ротора, а проходит сквозь слой

осадка и покидает ротор через фильтрующую поверхность стенок. Шнек транспортирует осадок в осевом направлении к разгрузочным отверстиям в одном из концов ротора. Промывающая жидкость орошает осадок по мере его продвижения шнеком. Поскольку кристаллы могут в значительной степени измельчаться шнеком и возможен унос твердой фазы фугатом, область применения центрифуг данного типа весьма ограничена.

Центрифуги с пульсирующей выгрузкой. Центрифуга с пульсирующей выгрузкой (рис. II-142) имеет горизонтальный фильтрующий ротор, покрытый металлической сеткой специального типа. Подача суспензии производится через неподвижную питающую трубу к вращающемуся конусу, который направляет ее на внутреннюю поверхность ротора вблизи от его днища. Центрифугуемый крупнокристаллический продукт очень быстро освобождается от жидкости, которая проходит сквозь решетку в кожух. Совершающий возвратно-ступательные движения поршень продвигает осадок на 25—50 мм по направлению к открытому концу ротора, затем он возвращается обратно, предоставляя возможность другой порции продукта попасть на освободившуюся фильтрующую поверхность. Питающий конус соединен с поршнем и движется вместе с ним. По мере продвижения осадка по стенке ротора он может промываться жидкостью, поступающей из одной или более промывающих дюз. В самом конце своего пути осадок достигает края ротора и выбрасывается в кожух, а оттуда падает на конвейер. Центрифуги с пульсирующей выгрузкой имеют роторы 300—1200 мм в диаметре, а их номинальная производительность составляет от 1 до 25 т/ч при крупнокристаллическом характере подаваемого на обработку материала. Некоторые модели имеют ротор с расширяющимися по диаметру тремя секциями, благодаря этому твердые вещества подвержены воздействию все увеличивающейся центробежной силы по мере своего продвижения через ротор.

Вертикальные фильтрующие центрифуги со шнековой выгрузкой. В вертикальных фильтрующих центрифугах со шнековой выгрузкой, предназначенных для обезвоживания кристаллической массы, продукт поступает через кольцевую щель в верхней части ротора. Вращение продукта, соответствующее скорости ротора, передается через крыльчатку, укрепленную в верхнем (меньшем по диаметру) конце ротора. Фугат проходит через щели в стенках ротора в кожух. Шнек, вращающийся несколько быстрее ротора, продвигает твердый осадок вниз и выбрасывает его в кожух. Усилие шнека, необходимое для движения осадка, уменьшено благодаря действию в направлении большего диаметра ротора составляющей центробежной силы инерции. По большей части от шнека требуется незначительное усилие. У днища ротора расположена другая крыльчатка, выбрасывающая твердый осадок в выгрузочную воронку. Наибольший диаметр ротора обычной конструкции составляет 400 мм и создает центробежную силу примерно в 1800 раз превышающую силу тяжести при 2800 об/мин.

Вибрационные центрифуги. На рис. II-143 представлена вертикальная центрифуга с вибрационной выгрузкой осадка. Ротор центрифуги имеет коническую форму. Для выгрузки осадка в данном случае не требуется применение шнека. Ротор колеблется вертикально с частотой 1700—2300 кол/мин при амплитуде 7 мм. В результате колебаний твердая гранулированная масса становится подвижной и под влиянием центробежной

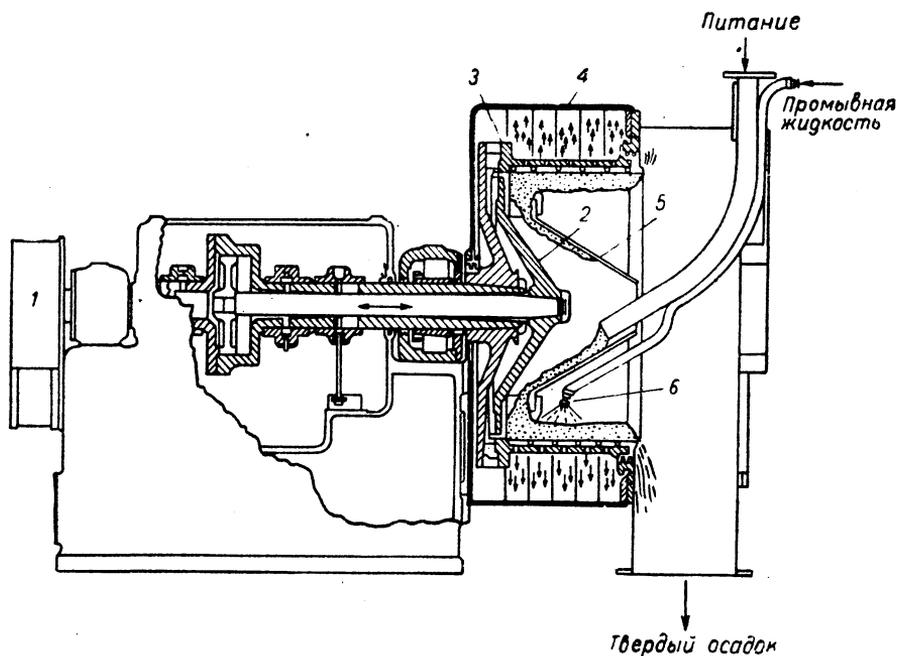


Рис. II-142. Центрифуга непрерывного действия с пульсирующей выгрузкой осадка:

1 — приводной шкив; 2 — толкатель; 3 — ротор; 4 — кожух; 5 — питающая труба; 6 — сопло для промывки.

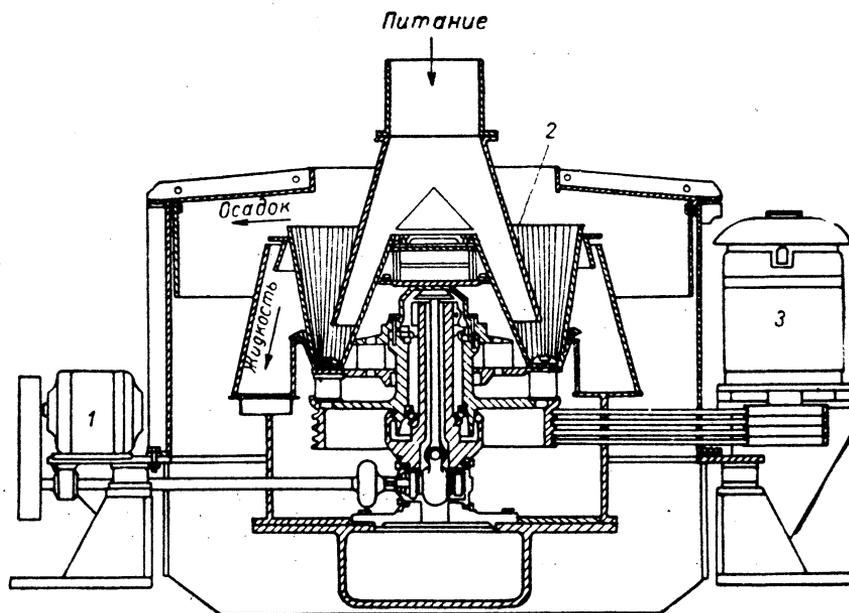


Рис. II-143. Центрифуга с вибрационной выгрузкой:

1 — привод эксцентрика; 2 — ротор; 3 — главный привод.

силы поднимается к широкому открытому концу ротора; отсюда она устремляется наружу в кожух, а из него удаляется через отверстия в днище. Диаметр ротора 508—1000 мм. Фактор разделения невисок ($F_{гн}=120$). Для обеспечения удовлетворительной работы центрифуги частицы твердого вещества не должны быть мельче 147 мкм. Производительность по осадку находится в пределах 25—100 т/ч. На центрифуге допустима промывка. Измельчение частиц осадка незначительно, благодаря чему обеспечена продолжительная служба сит. Эти центрифуги предназначены для обезвоживания угля и находят малое применение в химической промышленности.

ТЕОРИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ

Возможность теоретического анализа работы фильтрующих центрифуг оказалось ограниченной. Процесс центробежного фильтрования сложнее, чем фильтрование под влиянием силы тяжести или под давлением. В данном случае как поверхность фильтрования, так и движущая сила процесса возрастают с увеличением радиуса слоя осадка. Существенно может изменяться и удельное сопротивление осадка в зависимости от толщины слоя. Выбор центрифуг почти всегда производится на основании предварительных лабораторных опытов. Наиболее важными данными при этом являются степень фильтрования, промываемость осадка, продолжительность центрифугирования и конечное содержание жидкости в осадке.

Скорость фильтрования. Когда образовавшийся в центрифуге осадок затоплен жидкостью, скорость протекания через него фильтрата примерно соответствует величинам, найденным при фильтровании под соответствующим давлением.

Следует иметь в виду, что величина удельного сопротивления осадка в центрифуге превышает величину удельного сопротивления при фильтровании под давлением. В случае несжимаемых или почти несжимаемых осадков скорость фильтрования может быть вычислена по уравнению¹:

$$Q = \frac{\rho_{ж} \omega^2 (r_2^2 - r_1^2)}{2\mu \left(\frac{a m_T}{S_{ср. \log} S_{ср. ар}} + \frac{R_{\phi}}{S_{\phi}} \right)} \quad (\text{II-43})$$

где Q — объемная скорость вытекающей жидкости, м³/сек; ω — угловая скорость вращения, рад/сек; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³; r_1 и r_2 — радиус поверхности жидкости и внутренний радиус ротора, м; μ — вязкость жидкости, кг/(м·сек); a — удельное сопротивление осадка, м/кг; m_T — масса твердого осадка в роторе, кг; $S_{ср. \log}$, $S_{ср. ар}$ — среднелогарифмическое и среднеарифметическое значения площади осадка, определяемые по уравнениям (II-44) и (II-45), м²; R_{ϕ} — удельное сопротивление фильтра, м⁻¹; S_{ϕ} — площадь фильтра, м².

Средние площади осадка определяются из уравнений:

$$S_{ср. \log} = \frac{2\pi b (r_2 - r_1)}{\ln (r_2/r_1)} \quad (\text{II-44})$$

$$S_{ср. ар} = (r_2 - r_1) \pi b \quad (\text{II-45})$$

где b — высота ротора, м; r_1 — радиус внутренней поверхности осадка, м.

Даже при несжимаемом осадке можно применить уравнение (II-43) только при одинаковой толщине слоя. Большая часть твердого осадка откладывается ровным слоем на поверхности стенок вращающегося ротора центрифуги. Однако в поперечном сечении осадок может иметь клинообразную форму. В этом случае его проницаемость на 5—20% больше, чем осадка постоянной толщины, имеющего тот же объем¹.

Конечное содержание жидкости. Определить заранее необходимую продолжительность центрифугирования и конечную влажность осадка в роторе центрифуги несколько сложнее, чем предсказать скорость фильтрования. Вещества, состоящие из крупных кристаллов, достаточно центрифугировать 10—20 сек для достижения конечной влажности; вещества с тонкой кристаллической структурой необходимо центрифугировать 5—15 мин и даже более. В этом отношении нельзя найти удовлетворительной теоретической корреляции.

Влажность осадка после центрифугирования значительно меньше, чем после прессования или вакуум-фильтрования, даже если осадок в последних двух случаях продут воздухом. В результате воздействия поля центробежных сил удаляется значительная часть жидкости, находившейся в порах осадка (за исключением жидкости, удерживаемой капиллярными и молекулярными силами). После центрифугирования остается 40—60% от количества жидкости, содержащейся в осадке после фильтрования. Например, если влажность осадка после фильпресса составляет 35% (на влажный вес), то после центрифугирования можно ожидать ~20%; если отфильтрованные кристаллы содержат 7% влаги, то после центрифугирования они могли бы содержать только 3%.

При повышении скорости вращения ротора в некоторых случаях остаточная влажность снижается очень незначительно, а в других — на очень большую величину. Если осадок получен при недостаточной скорости вращения ротора, то для выяснения влияния повышенной скорости вращения на конечную влажность осадка можно воспользоваться следующей эмпирической формулой²:

$$R - R_m = K (n_m - n)^x \quad (\text{II-46})$$

где R — остаточная влажность, в килограммах влаги на килограмм сухого вещества, полученного при n об/мин; R_m — остаточная влажность, полученная при вращении со скоростью n_m ; K и x — эмпирические постоянные.

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕНТРИФУГ

Центрифуги являются основным звеном в оборудовании для разделения, но для ведения технологического процесса необходимо много вспомогательного оборудования: механический привод, приспособления для подачи обрабатываемого материала и выгрузки продуктов разделения, для накопления подаваемого материала (например, сосуды для осаждения или танки для агломерации), очищающие приспособления (например, фильтры, линии фугата).

¹ Grace, Chem. Eng. Progr., 49, 427 (1953).

¹ Haruni, Storrow, Chem. Eng. Sci., 2, 164 (1953).
² Haruni, Storrow, Chem. Eng. Sci., 2, 203 (1953).

Механический привод. Почти все центрифуги в настоящее время имеют индивидуальный привод. Центрифуги непрерывного действия обычно снабжаются электродвигателями с постоянным числом оборотов, для которых предусмотрено преодоление сопротивлений пускового момента. Для предотвращения опасной перегрузки электродвигателей целесообразно применять реле автоконтроля. В зависимости от условий эксплуатации применяется открытый, закрытый или же взрывобезопасный электродвигатель.

Центрифуги периодического действия с частыми остановами и пусками должны быть снабжены приводом специальной конструкции. Чаще применяются электродвигатели, а в отдельных случаях гидропривод или паротурбинный. Мощность привода должна быть достаточной для достижения в самое короткое время рабочей скорости. Пусковой момент должен обеспечить вращение с постоянной скоростью 30 об/мин. Последнее легко может быть достигнуто в случае применения гидропривода или электродвигателя постоянного тока, или регулируемого включения мотора переменного тока. В некоторых конструкциях вспомогательный небольшой электродвигатель вращает ротор в период разгрузки, обычно в направлении, обратном принятому направлению вращения.

Центрифуги должны быть оборудованы тормозными устройствами; часто применяется электроторможение до определенной скорости вращения ротора с последующим механическим торможением.

Приспособления для питания и выгрузки. Центрифуги и сепараторы не могут работать эффективно, не имея строго постоянной подачи исходного продукта, а также отвода продуктов разделения. Недостаточная производительность очень часто является следствием плохой конструкции приспособлений для питания и выгрузки, а не недостатков самой центрифуги.

Приспособления для питания должны быть достаточно емкими, чтобы перерабатываемая масса могла подаваться без задержки в нужных количествах и чтобы не было слишком большого падения давления, но в то же время достаточно малыми, чтобы предотвратить или уменьшить оседание в них продукта (см. стр. 113). Повороты трубопроводов должны быть большого радиуса. Не должно быть застойных зон, где собирается бы осадок в моменты временного перерыва подачи. По мере возможности, движение перерабатываемой жидкости должно быть непрерывным в течение всего процесса, даже тогда, когда сепаратор имеет перерыв в работе.

Линия разгрузки не создает затруднений в обычных условиях, если только давление не высоко и жидкость не пенится. Трубопровод должен быть достаточного сечения, чтобы мог выделиться какой-либо увлеченный газ. Наибольшие затруднения причиняют осадки, особенно очень влажные. Бункеры должны быть достаточно широкими и с крутыми стенками. Иногда приходится вводить механические конвейеры для передвижения полученного твердого продукта; в других случаях приходится разжижать или растворять осадок и в таком виде перекачивать.

Насосы для откачивания шлама должны быть тщательно подобраны. Наиболее важна бесперебойная работа выгружающих насосов. Целесообразно применять нескоростные крупногабаритные. Применение высокоскоростных небольших насосов приводит к оседанию твердых веществ, что иногда создает непреодолимые трудности.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Предварительная подготовка подлежащей центрифугированию жидкости очень часто намного повышает производительность центрифуги. Производительность фильтрующей центрифуги в большой степени зависит от объема жидкости, который должен пройти сквозь образующийся осадок. Желательно сгустить суспензию, пропуская ее до центрифугирования через отстойник или гидроциклон. Иногда целесообразно предварительное сгущение с помощью осадительной центрифуги с механической выгрузкой осадка.

В ряде случаев разделение можно улучшить, добавляя в обрабатываемую жидкость флокулирующие средства (крахмал, квасцы и др.). Иногда хрупкий хлопьевидный осадок разрушается внутри центрифуги, что замедляет разделение; в других случаях хлопьеобразование ускоряет разделение, делая его более полным. Трудно заранее предвидеть эффект от флокулянта без опытной проверки на центрифуге. В общем применение флокулянтов при центрифугировании менее эффективно, чем при осаждении в отстойниках, где хлопья оседают более легко и не подвержены разрушающим усилиям, как это имеет место в центрифугах. На некоторых жидкостных сепараторах достигается практически полное осветление жидкостей. Фильтрующие центрифуги непрерывного действия с автоматической подачей требуют предварительного отделения 0,5—2% твердой фазы с помощью фильтрующей сетки; эти твердые остатки могут быть затем пропущены вторично или поданы в другую технологическую линию для отделения от жидкой фазы.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЦЕНТРИФУГ

Себестоимость. Нельзя заранее определить ни основные затраты, ни эксплуатационные расходы путем применения корреляционной зависимости в соответствии с принятым типом машины, поскольку они связаны с трудностью разделения, зависящей от физической и химической природы материалов, подлежащих разделению, с потребностью во вспомогательном оборудовании и с многими другими факторами. Определение себестоимости должно базироваться на данных эксплуатации подобных установок на современных химических предприятиях.

Стоимость монтажа. Стоимость монтажа очень сильно зависит от характера машины, т. е. в конечном счете от объема монтажных работ. Некоторые машины, например переносные тарельчатые и трубчатые сверхцентрифуги, могут легко транспортироваться и даже не всегда требуют простейших приспособлений для установки. Для этих центрифуг необходимо минимальное количество трубопроводов и электропроводки. Другие машины требуют сооружения мощного фундамента, установки вспомогательных питательных танков, специальных приспособлений для питания, емкостей и приспособлений для выгрузки, а также сложного электрооборудования.

Стоимость минимальных монтажных работ, включая трубопроводы и электропроводку, составляет 6—10% от продажной цены для трубчатых, тарельчатых сверхцентрифуг; 10—25% для центрифуг с приводом на станине, с автоматической загрузкой и шнеками, и 25—30% для подвесных. Если включить стоимость всего

вспомогательного оборудования, в том числе специальных фундаментов, баков, насосов, конвейеров и прочего, то это доведет стоимость монтажных работ до 100—400% от стоимости самих центрифуг.

Расходы по уходу и ремонту. Несмотря на применение повышенных скоростей при использовании центрифугального оборудования, расходы по уходу за ним и ремонту обычно невысоки. Для машин малой и средней производительности расходы по уходу и ремонту находятся в пределах 5—10% их покупной цены (не считая расходов на фильтрующую основу, если она применяется). Наиболее подвержены износу подшипники и валы. В непрерывнодействующих и автоматических центрифугах изнашиваются от эрозии выгружающие скребки, а также спирали шнеков. Для машин, работающих в тяжелых условиях с агрессивными средами, расходы по уходу и ремонту могут превысить в несколько раз нормальные затраты.

Энергетические затраты. Затрата энергии на единицу продукции во многом зависит от трудности разделения, особенно при работе быстроходных трубчатых и тарельчатых центрифуг. В какой-либо машине на выделение только одной десятой доли жидкости по сравнению с другой может быть затрачено столько же энергии. Центрифуги со шнековой выгрузкой требуют затраты энергии на передвижение твердого осадка. Этот расход прямо пропорционален количеству транспортируемого осадка. Крупная тихоходная машина потребляет несколько меньше энергии на единицу продукции, чем центрифуга малого размера того же типа.

Обычно расход энергии при разделении суспензии на центрифугах (в киловатт-часах на 1000 л обработанной жидкости) представляется в следующем виде:

Тарельчатые и трубчатые центрифуги . . .	0,22—2,2
Центрифуги с выгружающими соплами . . .	0,44—2,64
Центрифуги со шнековой выгрузкой . . .	0,44—0,88

Обычный расход энергии для центрифуг с выгружающими соплами составляет 15—40 *квт-ч* на тонну твердого остатка, выбрасываемого через сопла.

Ниже приводятся данные по расходу энергии при работе центрифуг, обрабатывающих концентрированные суспензии и выдающие сильно отжатые осадки или «сухие» кристаллы:

Тип центрифуги	Расход энергии, <i>квт-ч</i> на 1 <i>т</i> сухого вещества
Со шнековой выгрузкой при диаметре ротора до 610 <i>мм</i> . . .	12—15
при большем диаметре	2—10
С порционной загрузкой (автоматическая)	4—6
Вибрационные	0,2—0,3
С пульсирующей выгрузкой	2—4

Периодически загружаемые центрифуги расходуют 5—25 *квт-ч* на тонну твердого осадка, в зависимости от продолжительности цикла работы и от величины загрузки ротора.

Во многих случаях стоимость расходуемой энергии по сравнению с другими затратами незначительна. Однако при необходимости разделять большие количества дешевых материалов, удельный вес энергетических затрат может оказаться высоким.

ВЫБОР ТИПА ЦЕНТРИФУГ

При выборе центрифуги основное требование заключается в обеспечении необходимой производительности при соблюдении неизменной заданной эффективности

разделения в течение продолжительного времени. При этом затраты по эксплуатации, ремонту и обслуживанию должны быть минимальными. Только при условии положительного решения поставленных задач можно считать, что затраты окупятся: при использовании центрифугального оборудования особенно выявляется правильность положения о ложной экономии при приобретении более дешевых машин за счет ухудшения их коррозионной стойкости и других свойств, необходимых в работе.

Преобладающее большинство центрифуг изготавливается специализированными фирмами, хотя некоторые, созданные для решения специфических проблем, выпускаются отдельными заводами¹. При выборе следует заранее решить, будет ли вестись поточное производство и выбирать ли машины непрерывного или периодического действия. Решение зависит от объема производства: при малом объеме вряд ли целесообразно поточное производство. Надо заметить, что быстродействующие автоматические центрифуги могут быть легко включены в поточное производство.

В табл. II-19 приводятся различные типы зарекомендовавших себя в работе центрифуг; указаны применяемые методы выгрузки осадка и фугата, скорость разгрузки и производительность.

Осадительные центрифуги выбираются по данным предварительных испытаний небольшого масштаба, например в пробирочных лабораторных или трубчатых центрифугах или на сверхцентрифугах и сепараторах. На малых пробирочных центрифугах производительность определяется путем серии испытаний различной продолжительности — выясняется время, необходимое для удовлетворительного осаждения. Результаты могут быть оценены с использованием теории Σ (сигма) с помощью приведенных выше формул. Значение Σ для трубчатых и тарельчатых центрифуг определяется из уравнений (II-41) и (II-42). Для пробирочных центрифуг Σ определяется из уравнения²:

$$\Sigma = \frac{\omega^2 V}{4,6g \lg [2r_2/(r_1 + r_2)]} m^2 \quad (II-47)$$

где ω — угловая скорость вращения, *рад/сек*; V — объем жидкости в пробирке, *м*³; g — ускорение силы тяжести, *м/сек*²; r_1 — радиус поверхности жидкости в момент вращения пробирки и r_2 — расстояние от оси вращения до дна пробирки, *м*. Производительность центрифуги непрерывного действия определяется по данным, полученным при центрифугировании порции суспензии с использованием числа осветления $B = Q/\Sigma$, где Q — производительность центрифуги, *м*³/*сек*. Для пробирочной центрифуги число осветления B вычисляется по формуле:

$$B = \frac{4,6g}{\omega^2 t} \lg \frac{2r_2}{r_1 + r_2} \quad (II-48)$$

где t — время осаждения, *сек*, определенное экспериментально. Для вычисления производительности больших машин найденное значение B умножается на значение Σ , подсчитанное для этой машины по уравнениям (II-41) и (II-42).

¹ Meyers, Smith, Smith, Chem. Eng. Progr., 51, 415 (1955).
² Ambler, Kieth, Organic Analysis, vol. 3, ch. 4, New York, 1956.

Характеристика центрифуг

Механизм разделения	Тип ротора	Тип машины	Способ выгрузки твердой фазы	Скорость вращения ротора при выгрузке твердой фазы	Способ выгрузки жидкости	Производительность
Осаждение	Порционный	Ультрацентрифуга	.....	.....	.....	1 мл
		Клиническая лабораторная	Ручная порционная	0	Ручная	До 6 л
	Трубчатый	Суперцентрифуга	То же	0	Непрерывная	» 5 450 л/ч
		Многокамерный	Сепаратор	» »	0	»	» 10 900 л/ч
	Тарельчатый	Сепаратор обычный	» »	0	»	» 5 450 л/ч
		Полузакрытый	Непрерывная, если твердая фаза легче жидкой	Полная	»	» 5 450 л/ч
		С сопловой выгрузкой	Непрерывная, если твердая фаза тяжелее жидкой	»	»	» 82 300 л/ч
		С клапанами по периферии	Автоматическая периодическая	»	»	» 13 700 л/ч
	Сплошной	Саморазгружающаяся	То же	»	»	» 13 700 л/ч
		Горизонтальная с постоянной скоростью ротора	» »	Обычно полная	Отсосной трубкой или через край	» 1,7 м ³
Вертикальная с переменной скоростью ротора		Ручная или автоматическая периодическая	0 или сниженная	Непрерывная или порционная	» 0,454 м ³	

Продолжение

Механизм разделения	Тип ротора	Тип машины	Способ выгрузки твердой фазы	Скорость вращения ротора при выгрузке твердой фазы	Способ выгрузки жидкости	Производительность
Осаждение	Сплошной	Непрерывного действия	Непрерывная	Полная	Непрерывная	До 22 800 л/ч жидк., 75 т/ч тверд. в-ва
Центробежная фильтрация	Конический	С инерционной выгрузкой	»	»	»	До 40 т/ч тверд. в-ва
		Со шнековой выгрузкой	»	»	»	До 40 т/ч тверд. в-ва
		Вибрационная	В основном непрерывная	»	»	До 20 т/ч тверд. в-ва
	Цилиндрический	Пульсирующая	Порционная	Полная или сниженная	»	Данные ограничены
		Пульсирующая одноступенчатая	В основном непрерывная	Полная	»	До 25 т/ч тверд. в-ва
		Пульсирующая многоступенчатая	То же	»	»	До 44 т/ч тверд. в-ва
		Горизонтальная	Автоматическая порционная, выгружающий скребок	»	Периодическая	До 25 т/ч тверд. в-ва
		Вертикальная с приводом на станине	Ручная порционная. Ножевой съем с ручным или автоматическим управлением	0 или сниженная	Периодическая	До 3 т/ч тверд. в-ва
	Вертикальная подвешенная на колонках	То же	То же	То же	До 10 т/ч тверд. в-ва	

На основании одного только лабораторного эксперимента довольно трудно установить точную производительность жидкостных сепараторов с выгрузкой через сопла или самооткрывающихся. Лишь специалист может сделать соответствующий прогноз. Однако гарантировать достижение необходимой производительности машины можно только после промышленных экспериментов; испытания должны проводиться в течение возможно более продолжительного времени в лаборатории завода-изготовителя или на заводе, где осуществляется технологический процесс. Без промышленных испытаний также не могут быть выбраны осадительные центрифуги со шнековой выгрузкой осадка, хотя информация, полученная с помощью пробирочных центрифуг, и может помочь при предварительных подсчетах.

Фильтрующие центрифуги выбираются на основании лабораторных испытаний в центрифугах с порционной загрузкой; желательно, чтобы диаметр ротора был не менее 300 мм. Методика выбора описана в литературе¹. Метод определения производительности фильтрую-

щих центрифуг на основании данных по фильтрации шлама под давлением в небольших сосудах в широком диапазоне различных производственных условий описан Грейсом².

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

В. И. Соколов, Современные промышленные центрифуги. Изд. «Машиностроение», 1957. — В. И. Соколов, Д. Е. Шкоропад, Автоматические и непрерывнодействующие центрифуги. Машгиз, 1954. — В. И. Соколов, Трубочатые сверхцентрифуги. Госхимиздат, 1949. — Г. А. Финкельштейн, Шнековые осадительные центрифуги, Госхимиздат, 1952. — Г. И. Бремер, Жидкостные сепараторы, Машгиз, 1957. — Д. Е. Шкоропад, И. В. Лысковцев, Центробежные жидкостные экстракторы, Машгиз, 1962. — Центрифуги. Каталог-справочник, Машгиз, 1963. — Промышленные центрифуги. Каталог ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШа, 1965. — Сепараторы жидкостные центробежные для химической промышленности. Каталог ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШа, 1965.

¹ Flood, Chem. Eng., 62 (6), 217 (1955). — Smith, Ind. Eng. Chem., 39, 474 (1947).

² G a s e, Chem. Eng. Progr., 49, 427 (1953).

Глава третья

СИСТЕМЫ ГАЗ—ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО

П. Мак-Кормик (P. Y. McCormick), Р. Лукас (R. L. Lucas),
Д. Уэллс (D. F. Wells)

Неподвижный, движущийся, взвешенный слой и пневмотранспорт —
перевод и редакция М. И. КУРОЧКИНОЙ

Разделение систем газ — твердое вещество —
перевод В. Д. ЛЕБЕДЕВОЙ под редакцией Н. Н. ЕГОРОВА

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Системы с неподвижным слоем	230
Полочные и камерные аппараты периодического действия	231
Полочные сушилки с прямым обогревом	231
Камерные циркуляционные сушилки	233
Вакуум-сушильные шкафы	234
Печи периодического действия	235
Туннельные аппараты непрерывного действия	237
Сушилки со сквозной циркуляцией	237
Ленточные вакуум-сушилки	242
Печи непрерывного действия	243
Системы с движущимся слоем	243
Вращающиеся аппараты	243
Вращающиеся сушилки с прямым нагревом	245
Вращающиеся обжиговые печи с прямым нагревом	250
Вращающиеся паровые трубчатые сушилки с непрямым нагревом	256
Печи для прокалывания (кальцинаторы) с непрямым нагревом	259
Сушилка «Рото-Лувр» с прямым нагревом	262
Аппараты с перемешиванием	262
Вакуум-сушилки с перемешиванием	263
Полочные турбосушилки	265
Подовые печи	267
Многополочные печи	268
Гравитационные аппараты	269
Шахтные печи	270
Установки каталитического крекинга	272
Охладители и сушилки для гранулированных материалов	273
Сушилки «Мульти-Лувр»	273
Аппараты с фонтанирующим слоем	274
Системы со взвешенным слоем	275
Особенности установок со взвешенным слоем	275
Применение взвешенного слоя	284
Каталитические химические реакторы	284
Некаталитические реакторы	284
Конвейерные вибросушилки с прямым нагревом	288
Пневматические системы	289
Пневматические подъемники	289
Распылительные сушилки	292
Скоростные обжиговые печи	298
Разделение систем газ — твердое вещество (пылеулавливание)	298
Цели и способы пылеулавливания	298
Характеристики пылеуловителей	298
Оборудование для разделения систем газ—твердое вещество	300
Гравитационные отстойные камеры	300
Сепараторы ударного действия	300
Циклоны	301
Механические центробежные сепараторы	308
Сепараторы с зернистым слоем	308
Рукавные фильтры	309
Электрофильтры	315
Воздушные фильтры	325
Другие типы пылеуловителей	331
Литература	332

Классификация оборудования в данной главе производится в зависимости от условий существования слоя твердых частиц и от метода контактирования твердой и газовой фаз (без учета применения в определенном процессе). При описании же аппарата, используемого в конкретном технологическом процессе, за ним сохраняется наиболее часто употребляемое, исторически сложившееся название. При обсуждении методов расчета и механиз-



Рис. III-1. Неподвижный слой твердых частиц (в камерной сушилке).

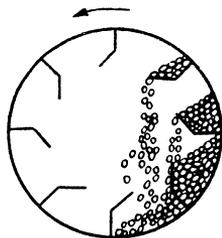


Рис. III-2. Движущийся слой твердых частиц (во вращающейся сушилке с подъемно-лопастной насадкой).

ма явлений, протекающих в аппарате, особое внимание уделяется тому технологическому процессу, в котором этот аппарат обычно используется.

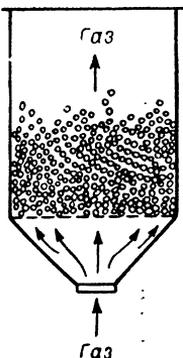


Рис. III-3. Взвешенный слой твердых частиц.

В оборудовании, предназначенном для проведения процессов взаимодействия твердой и газовой фаз, слой твердых частиц может существовать в следующих формах.

1. Неподвижный слой (рис. III-1) — это плотный слой твердых частиц, в котором каждая отдельная частица соприкасается с другой при постоянной, по существу, насыпной плотности твердой фазы. Для неподвижного слоя характерно отсутствие относительного движения между твердыми частицами.

2. Движущийся слой (рис. III-2) представляет собой незначительно увеличившийся в объеме слой твердой фазы, в котором частицы отделяются одна от другой, перемещаясь вниз или вверх. Обычно полог твердой фазы движется вниз под действием силы тяжести, но в некоторых случаях внутри аппарата может быть организовано движение твердых частиц вверх (механическим подъемом или при перемешивании).

3. Взвешенный слой¹ (рис. III-3) образуется, когда твердые частицы разъединяются под действием газового потока, проходящего через промежутки между ними с некоторой критической скоростью. Слой неустойчив, если скорость газового потока, движущегося снизу вверх, меньше конечной скорости осаждения твердых частиц; однако даже в этом случае внутри газового потока существуют вихри, которые движутся с довольно высокими скоростями, достаточными для того, чтобы временно поднимать частицы. Таким образом, во взвешенном слое частицы твердого материала постоянно поднимаются вверх и снова падают. Характерной особенностью этого слоя является непрерывное перемешивание твердой и газовой фаз, причем смесь ведет себя подобно кипящей жидкости.

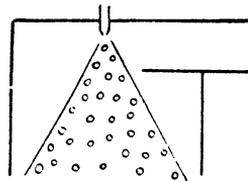


Рис. III-4. Твердая фаза в условиях предельного разбавления в верхней части распылительной сушилки.

4. Разбавленный слой² (рис. III-4) наблюдается при предельном расширении слоя твердой фазы, когда частицы так далеко удаляются одна от другой, что, по существу, не оказывают никакого взаимного влияния. Характерной особенностью разбавленного слоя является настолько полное рассеяние твердой фазы в газе, что плотность смеси можно считать равной плотности газовой фазы. В общем, разбавленный слой образуется, когда скорость газа во всех точках системы превышает конечную скорость осаждения твердой фазы и взвешенные частицы могут непрерывно двигаться в газе.

В действительности слоя твердых частиц в условиях разбавления не существует, поэтому обычно это явление связывается с предельно высокой скоростью газа и пневматическим транспортированием твердой фазы.

Возможны следующие способы контактирования газа со слоем твердой фазы.

1. Параллельный ток (рис. III-5): направление потока газа параллельно поверхности твердой фазы, контактирование осуществляется главным образом на

¹ В отечественной литературе термин «взвешенный слой» используется, как правило, для описания взаимодействия системы газ — твердое вещество между первой и второй (уноса) критическими скоростями газового потока (при порозности твердой фазы $\varepsilon = 0,4 \div 1$). Взвешенный слой в области первой критической скорости (при которой неподвижный слой переходит во взвешенное состояние) обычно называют кипящим или псевдоожженным. — Прим. ред.

² В отечественной литературе такое состояние системы газ — твердое вещество носит название уноса. Транспортирование твердой фазы в режиме уноса называется пневмотранспортом. — Прим. ред.

поверхности раздела фаз (возможно некоторое проникновение газа в промежутки между твердыми частицами вблизи поверхности слоя). Слой твердых частиц обычно находится в неподвижном состоянии, но в некоторых случаях может двигаться.

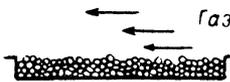


Рис. III-5. Параллельный ток (газовый поток движется параллельно неподвижному слою твердых частиц).

2. Перпендикулярный ток (рис. III-6): направление потока газа нормально к поверхности раздела фаз, газ сталкивается со слоем твердых частиц. В этом случае слой твердых частиц также обычно неподвижен, но может и двигаться.

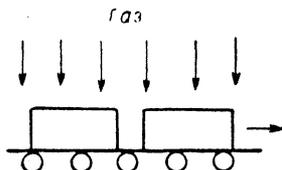


Рис. III-6. Перпендикулярный ток (циркулирующий газ ударяется о твердые предметы на конвейерной ленте перпендикулярно их поверхности).

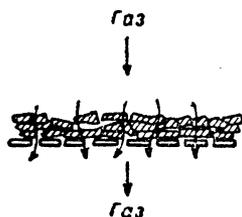
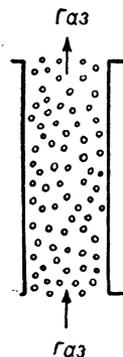


Рис. III-7. Сквозная циркуляция газа через слой отформованных твердых частиц на перфорированной конвейерной ленте.

циркулирует более или менее свободно вокруг отдельных частиц. Твердая фаза при этом может находиться в неподвижном, движущемся, взвешенном или разбавленном состоянии.



При взвешенном и разбавленном слоях контактирование всегда осуществляется методом сквозной циркуляции. Направления движения газа и твердой фазы в аппарате могут совпасть — прямоток (рис. III-8), быть противоположными — противоток (рис. III-9) или составлять прямой угол — перекрестный ток (рис. III-10).

Рис. III-8. Прямоток разбавленной системы газ — твердая фаза в вертикальном подъемнике (пневмотранспорт).

Так как в процессах контактирования твердой и газовой фаз тепло- и массоперенос происходит на по-

верхности твердых частиц, то максимальной эффективности процесса можно ожидать при максимальном соприкосновении поверхности твердой фазы с газом и

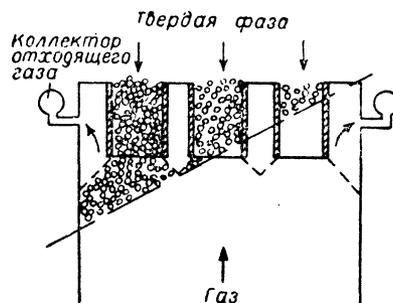


Рис. III-9. Противоток системы газ — твердая фаза в верхней части выводной секции реактора с движущимся слоем катализатора.

при полном перемешивании газа и твердых частиц. Важны оба эти фактора.

При любом расположении твердых частиц газ поступает в пустоты между ними и контактирует со всей поверхностью, за исключением точек соприкосновения частиц друг с другом. Если слой твердых частиц находится в неподвижном состоянии или медленно движется, то газ внутри пустот отсекается от основной массы газовой фазы и для большинства процессов его можно не учитывать. Некоторый незначительный перенос энергии и массы в этом случае может происходить за счет диффузии.

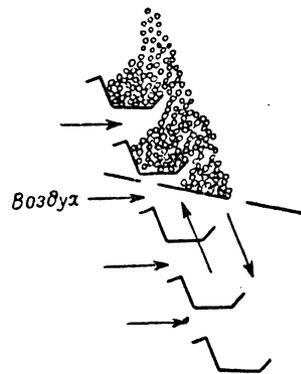


Рис. III-10. Перекрестный ток газа (воздуха) и твердой фазы в сушилке каскадного типа.

После того как твердая фаза и газ поступили в аппарат и прореагировали или смешались, возникает необходимость в их разделении. Ниже будет рассмотрено извлечение твердого вещества из газового потока в сухом состоянии (включая удаление пыли из атмосферного воздуха). Мокрая пылеочистка и удаление мелких капель жидкости (тумана) из газов, обсуждались в гл. I этого тома справочника.

СИСТЕМЫ С НЕПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ

Контактирование газа и твердого материала наиболее простым способом осуществляется в неподвижном слое. В таком слое движение твердых частиц относительно друг друга отсутствует. Поток газа движется снизу вверх, ударяясь о частицы или проходя через пустоты между ними. Контакт газа и твердой фазы происходит на поверхности раздела. Более высокая эффективность взаимодействия газовой и твердой фаз

возможна при циркуляции. Однако в условиях неподвижного слоя циркуляция может сопровождаться каналобразованием и завихрениями потока газа, что является причиной неоднородности слоя или изменения его плотности. При начавшемся процессе каналобразования невозможно вернуть систему с неподвижным слоем к тем условиям, которые были нарушены.

Из других недостатков, присущих системам с неподвижным слоем, следует отметить трудность добавки или удаления твердой фазы при проведении процесса. Кроме того, цикличность процессов обуславливает необходимость установок запорных устройств (арматуры) и очистки аппаратов, что усложняет обслуживание аппаратов с неподвижным слоем (особенно при высокотемпературных процессах). Вследствие относительно низких коэффициентов теплоотдачи в слое твердых частиц обычно имеют место большие градиенты температур.

Процессы с неподвижным слоем твердых частиц имеют некоторые преимущества перед процессами с непрерывным движением твердой фазы: 1) очень малы потери твердого материала от истирания; 2) обычно не требуется вспомогательное механическое оборудование для циркуляции, разделения фаз или извлечения твердой фазы из газового потока.

Слой твердой фазы в аппаратах с неподвижным слоем обычно состоит из частиц размером от 0,6 до 75 мм или из отдельных крупных предметов. Такие аппараты используются при проведении процессов адсорбции, газоочистки, сушки, теплопередачи, а также в случае некаталитических и каталитических химических реакций (например, риформинг в неподвижном слое). Иногда для взаимодействия газа и твердого материала (при адсорбции и сушке) применяют обычные насадочные колонны. В литературе¹ описано оборудование с неподвижным слоем твердой фазы, используемое в процессах нефтеочистки.

ПОЛОЧНЫЕ И КАМЕРНЫЕ АППАРАТЫ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

В полочных и камерных аппаратах периодического действия твердый материал может быть насыпан рядами или помещен на противни (в случае сыпучих материалов), а также сложен в кучи или загружен на полки (в случае крупных предметов). Теплопередача в аппаратах осуществляется либо непосредственно от газа к твердой фазе при циркуляции больших объемов горячего газа, либо через стенку при использовании полых полок, змеевиков или отражательных поверхностей внутри корпуса.

Полочное и камерное оборудование используется главным образом в процессах простой сушки и термообработки. Полочные и камерные сушилки, а также печи периодического действия до сих пор остаются наиболее широко применяемыми аппаратами для взаимодействия систем газ — твердое вещество.

Постоянство толщины слоя загрузки в сушилках и печах, обрабатывающих сыпучий твердый материал, имеет большое влияние на последовательность операций, минимальную продолжительность нагрева, а также контроль конечной влажности. Поэтому после того, как полки загружены, следует проверить, одинакова ли на них толщина слоя высушиваемого материала.

Если при проведении процесса выделяются вредные газы, дым или пыль, то в отсасывающую систему установки необходимо включить пыле- или дымоулавливающее оборудование. Для регенерации выходящих из сушилок паров растворителей применяют мокрые скрубберы. Иногда на всасывающей воздушной линии аппаратов с прямым нагревом устанавливают фильтры

для очистки воздуха и газоосушители (см. т. I, гл. VIII). При использовании вакуум-сушильных шкафов обычно требуются эжекторы или другие создающие вакуум устройства, промежуточные конденсаторы для удаляемых паров и, в некоторых случаях, мокрые скрубберы или рукавные фильтры. Для предварительной подготовки поступающих на сушку паст и осадков иногда приходится пользоваться специальными таблетующими машинами и экструдерами.

Чтобы за время проведения процесса свести до минимума потери тепла, необходимо тщательно изолировать камеру кирпичом, асбестом или другим теплоизоляционным материалом. В современных камерных сушилках слой изоляции (75—150 мм) располагается между внутренней и внешней стенками камеры, изготовленными из листового металла. Двери камеры обычно снабжаются прокладками и уплотняются.

В полочных и камерных аппаратах чаще всего контролируют температуру (или влажность) циркулирующего воздуха и реже — температуру твердого материала; в работающих под вакуумом установках контролируют абсолютное давление и температуру греющего агента.

В сушилках с прямым обогревом в течение цикла приходится регулировать температуру воздуха или его скорость. Воздух с высокой температурой может быть использован в период постоянной скорости сушки. В течение периода падающей скорости температура воздуха должна быть понижена. Более высокие скорости воздушного потока можно применять на более ранней ступени сушки для того, чтобы улучшить условия теплопередачи, однако как только сушка поверхности материала полностью закончится, скорость воздуха необходимо уменьшить во избежание большого пылеобразования (обычно для этой цели используют вентиляторы с двумя скоростями вращения).

Полочные сушилки с прямым обогревом

Современная полочная сушилка состоит из хорошо изолированного кожуха, вентиляторов и установленных совместно греющих змеевиков, а также устройств для поддержки материала. Такие аппараты более эффективны, чем высокие сушилки с естественной циркуляцией воздуха над высушиваемым материалом, и дают возможность регулировать процесс.

Для увеличения коэффициента теплопередачи и уничтожения застойных воздушных мешков в полочных сушилках с прямым обогревом желательна циркуляция воздуха со скоростью от 1 до 10 м/сек. Одной из наиболее важных проблем в работе таких сушилок является неравномерность распределения воздушного потока.

Существуют два типа полочных сушилок: стационарные и с вагонетками. В первом случае полки располагают на стационарных штативах и загружают непосредственно внутри сушилки, во втором — на вагонетках, которые затем вталкивают в сушилку. Обычно вагонетки снабжают ребрами (колесами с бортом) для движения по рельсам, плоскими поворотными колесами или подвешивают на монорельсе. В каждой вагонетке имеется два ряда противней (18—48 в ряду). Противни (полки) могут быть квадратными или прямоугольными. Изготавливают их из различных материалов, противостоящих коррозионному и термическому воздействию. При укладке противней на вагонетку должен оставаться зазор не меньше 35—40 мм между

¹ Petrol, Refiner, 37, 9 (1958).

высушиваемым материалом и дном расположенного выше противня. Для получения дополнительной поверхности сушки в некоторых случаях днища противней делают ситчатыми. Металлические противни предпочтительнее неметаллических, так как они легче проводят тепло. Площадь каждого противня 0,37—0,75 м², высота слоя высушиваемого материала, нагружаемого на противень, 12—100 мм. Греющим агентом обычно является насыщенный водяной пар. В качестве нагревателя воздуха используют калорифер, установленный перед циркуляционным вентилятором. При небольшой производительности сушки можно пользоваться электронагревом. Для достижения температур >200°С применяют продукты горения угля, масла или газа, а также нагреватели воздуха прямого действия.

Циркуляция воздуха осуществляется с помощью осевого или центробежного вентилятора. При температуре >200°С необходимо устанавливать наружные или охлаждаемые водой подшипники. Общее гидравлическое сопротивление противней, калорифера и воздуховодов находится в пределах 25—50 мм вод. ст. Обычно рециркулирует 80—95% воздушного потока (за исключением периода внутренней сушки при быстром испарении влаги). Свежий воздух засасывается циркуляционными вентилятором (в большинстве случаев — через фильтры для очистки от пыли). Чаще всего отработанный воздух удаляется из сушилки отдельным небольшим вытяжным вентилятором с шибером, регулирующим скорость рециркуляции воздуха.

Методы расчета. При испарении с полностью смоченной поверхности материала истинная температура этой поверхности может быть рассчитана по уравнению (VII-31)¹.

В случае хорошо изолированных полок и отсутствии влияния тепловой радиации температура поверхности твердого высушиваемого материала приближается к температуре мокрого термометра осушающего воздуха. Это можно считать справедливым для периода постоянной скорости сушки при условии, что коэффициент теплоотдачи не учитывает поправок на радиацию и теплопроводность через несмоченный слой поверхности.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией для параллельного тока α_k [в ккал/(м²·ч·град)] может быть рассчитан по уравнению:

$$\alpha_k = 12,65G^{0,8} \quad (\text{III-1})$$

где G — массовая скорость воздуха, кг/сек на 1 м² поперечного сечения потока.

При потоке воздуха, перпендикулярном влажной поверхности материала:

$$\alpha_k = 20,8G^{0,37} \quad (\text{III-2})$$

Уравнения (III-1) и (III-2) обычно используются для предварительной оценки величины α_k . В случае более точных расчетов α_k необходимо учитывать поправки на радиацию и теплопроводность несмоченной поверхности, а также размеры сушилки (см. гл. VII первого тома).

Когда воздух проходит над длинным рядом полок с низкой скоростью, падение его температуры Δt может быть значительным. При высоких скоростях воздуха в сушилках с двумя или тремя вагонетками величина Δt редко превышает несколько градусов.

Скорость воздуха и его температура на входе в сушилку должны выбираться для каждого отдельного случая. Если скорость испарения, рассчитанная без учета падения температуры воздуха во время каждого его прохода, велика, то при расчете необходимо исправить температуру воздуха на среднюю между температурами на входе и выходе [см. уравнение (VII-36)].

Во время периода падающей скорости сушки температура поверхности увеличивается, как только движение влаги из твердого материала начинает контролировать процесс. Скорость сушки может быть пропорциональна квадрату толщины слоя загруженного материала [см. уравнение (VII-39)], а капиллярность и усадка в этот период могут так воздействовать на ход процесса, что время сушки останется в линейной зависимости от толщины слоя. Для правильного расчета необходимо провести эксперименты.

Если критическое влагосодержание известно (см. табл. VII-14 и III-5 на стр. 240) или может быть принято, расчет проводится по приближенным уравнениям (VII-48) и (VII-49).

Характеристика и стоимость. Типовая сушилка с двумя вагонетками показана на рис. III-11. Подвижные

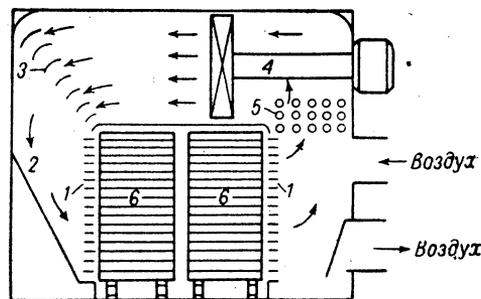


Рис. III-11. Сушилка с двумя вагонетками:

1 — подвижные перегородки; 2 — нагнетательная камера; 3 — направляющие; 4 — вентилятор (0,736—1,1 кет); 5 — калориферы; 6 — вагонетки с противнями.

перегородки или перфорированные распределительные пластины с гидравлическим сопротивлением 2,5—5,0 мм вод. ст. обычно устанавливают в стенке, через которую воздух проникает в пространство, где находятся вагонетки. Такие перегородки и пластины повышают равномерность распределения нагретого воздуха по высоте. Если в сушилке с тремя или более вагонетками нагрузка по испарению влаги высока, между ними могут быть размещены змеевики для промежуточного подогрева воздуха. Это значит, что в установках с большим числом вагонеток можно также предусматривать рециркуляцию воздушного потока.

Стоимость камер с вагонетками составляет 280—880 долл. за 1 м³ рабочего объема (наиболее дорогие камеры объемом приблизительно до 2 м³, менее дорогие камеры объемом >8,5 м³). В стоимость установки включается цена корпуса со слоем изоляции толщиной 75 мм, циркуляционного вентилятора и калорифера для нагрева воздуха. Цены разнятся в зависимости от способа нагрева камеры — прямого или непрямого, паром или электрическим током. Контрольно-измерительная аппаратура увеличивает стоимость сушилки на

¹ Здесь и ниже имеется в виду гл. VII первого тома. — Прим. ред.

200—800 долл. (по ценам 1959 г.). Внутренняя обшивка корпуса нержавеющей сталью повышает стоимость сушилки примерно на 30%. Вагонетки, изготовленные из обычной стали, в зависимости от размеров стоят 200—400 долл. каждая. Противни или полки из углеродистой стали стоят от 20 до 40 долл. за 1 м², из нержавеющей стали — от 30 до 80 долл. за 1 м². Менее дорогие, усиленные стекловолокном пластмассовые противни также применяются в таких сушилках. Стоимость смонтированного оборудования составляет 100—200% стоимости материала (углеродистой стали).

Камерные циркуляционные сушилки

В одном из типов циркуляционных сушилок периодического действия нагретый воздух проходит через неподвижный проницаемый слой влажного материала, помещенный на съемные противни с ситчатым дном. Сушилки этого типа подобны стандартным полочным сушилкам, за исключением того, что горячий воздух в них проходит через влажный материал, а не над ним. Гидравлическое сопротивление слоя высушиваемого материала обычно не превышает 25 мм вод. ст.

Характеристика некоторых типовых полочных и камерных сушилок¹

ТАБЛИЦА III-1

	Высушиваемый материал				
	краситель		полупродукт титана	крон желтый	толуидин красный
Тип сушилки	С двумя вагонетками		С тремя вагонетками	16-полочная	
Производительность, кг продукта/ч	11,1	4,75	56,5	16	1,85
Число противней (полок)	80	120	180	16	16
Расстояние между противнями, мм	100	87,5	75	100	100
Размеры противней, мм	610×760×38	610×670×25	610×685×38	660×965×22	660×965×22
Толщина слоя высушиваемого материала, мм	25—50	—	28	28—32	28—38
Влажность материала, % (на сухой продукт):					
начальная	207	116	223	46	220
конечная	4,5	0,5	25	0,25	0,1
Температура воздуха, °С	75—85	27—99	93	100	50
Нагрузка, кг продукта/м ²	10	9,25	15	33,7	7,8
Продолжительность сушки, ч	33	96	20	21	41
Скорость воздуха, м/сек	0,9	2,6	3,0	2,3	2,3
Объемный расход воздуха, м ³ /сек	3,78	—	4,7	—	—
Общая скорость сушки, кг влаги/(ч·м ²)	0,58	0,11	1,17	0,65	0,41
Расход пара, кг/кг испаренной влаги	2,5	—	2,75	3,0	—
Полная установочная мощность, кВт	1,47	1,47	2,21	0,736	0,736

¹ По данным Proctor a. Schwartz, Inc.

Характеристика некоторых типовых полочных и камерных сушилок приведена в табл. III-1. В таких сушилках можно ожидать значений общей скорости испарения в пределах 0,15—1,5 кг воды/ч на 1 м² поверхности полок. Термический к. п. д. сушилок изменяется от 20 до 50% в зависимости от температуры сушки и влажности отработанного воздуха. При сушке до очень низкого содержания влаги при ограниченной температуре термический к. п. д. может быть ~10%. Важнейшую статью расхода составляют затраты на рабочую силу для загрузки и разгрузки противней. Что бы загрузить и разгрузить стандартную сушилку с двумя вагонетками, требуется около 2 человеко-часов. Кроме того, примерно 1/3—1/5 рабочего времени обслуживающего персонала затрачивается на наблюдение за работой аппарата. Расход мощности для полочных и камерных сушилок ~1,1 кВт на одну вагонетку. Эксплуатационные расходы составляют 3—5% от установочной стоимости в год.

В других сушилках глубокие противни с перфорированными днищами помещают в верхней части нагнетательной камеры в закрытую циркуляционную систему с горячим воздухом. Таким образом высушивают, например, порох. В некоторых установках для обезвоживания продуктов питания и сушки зерна материал помещают в специальные ящики с перфорированным дном. Горячий воздух проходит снизу вверх через высушиваемый материал и выходит из верхней части ящика, затем вновь подогревается и возвращается в сушилку. В сушилках такого типа гидравлическое сопротивление слоя материала увеличивается с 50 до 450 мм вод. ст. при относительно низких скоростях воздуха.

Характеристика циркуляционных сушилок периодического действия приведена в табл. III-2. Такие сушилки имеют ограниченное применение для сушки гранулированных материалов (только в тех случаях, когда допустима свободная циркуляция воздуха). Продолжительность проведения процесса сушки в этих

аппаратах обычно значительно меньше, чем в полочных сушилках с параллельным током.

ТАБЛИЦА III-2

Характеристика циркуляционных сушилок периодического действия¹

	Высушиваемый материал		
	гранулированный полимер	овощи	семена овощей
Производительность, кг продукта/ч	122	42,5	27,6
Число противней (полок)	16	24	24
Расстояние между противнями, мм	430	430	430
Размеры противней, мм	910×1040	910×1040	850×975
Толщина слоя высушиваемого материала, мм	62,5	61	38
Характеристика продукта	Дробленые частицы	Кубики со стороной 6 мм	Промытые семена
Влажность материала, % (на сухой продукт):			
начальная	11,1	669,0	100,0
конечная	0,1	5,0	9,9
Температура воздуха, °С	88	77 (от $t_m = 49$ до $t_c = 63$) — см. ²	35
Скорость воздуха, м/сек	0,91	0,6—0,96	1,02
Нагрузка, кг продукта/м ²	16	5,16	6,7
Продолжительность сушки, ч	2,0	8,5	5,5
Общая скорость сушки, кг испаренной влаги/(ч·м ²)	0,89	11,8	1,13
Расход пара, кг/кг испаренной влаги	4,0	2,42	6,8
Установочная мощность, квт	7,36	18,5	18,8

¹ По данным Proctor a. Schwartz, Inc.

² t_m и t_c — температура мокрого и сухого термометров.

Вакуум-сушильные шкафы

Вакуум-сушильный шкаф (рис. III-12) является аппаратом периодического действия с непрямым обогревом и обычно состоит из вакуумной камеры, изготовляемой из чугунных или стальных плит, полок, укрепленных в камере и обогреваемых изнутри, устройства, создающего вакуум, и конденсатора. В зависимости от размеров камеры шкаф имеет одну или две двери,

которые уплотняются упругими прокладками из резины или другого подобного материала.

Полые полки из плоских стальных плит укреплены внутри вакуумной камеры и параллельно присоединены к входному и выходному коллекторам теплоносителя. В качестве теплоносителя, входящего через один коллектор и проходящего внутри полок к выходному коллектору, обычно используется греющий пар, подводимый под давлением от <1 ат (для низкотемпературных процессов) до 7 ат.

Сравнительно низкие температуры во время процесса обеспечивают циркуляцией горячей воды. Высоких температур можно добиться с помощью циркуляции горячего масла или высококипящего органического теплоносителя (ВОТ). В некоторых небольших вакуум-сушильных шкафах применяется электронагрев полок. Высушиваемый материал помещается на противнях или тарелках, устанавливаемых на нагреваемых полках. Для обеспечения хорошей теплопередачи между полкой и противнем последние обычно изготовляют из металла.

Вакуум-сушильные шкафы имеют от 1 до 24 полок. Габариты наиболее крупных шкафов: длина 5,5, высота 2,45, ширина 2,75 м.

Для создания вакуума и удаления образующегося вторичного пара служит большая труба, соединенная с сушильной камерой таким образом, что если вакуум внезапно нарушится, то прорвавшийся воздух не сможет сильно нарушить слой высушиваемого материала. Вакуумная линия ведет к конденсатору, где испаренная влага или растворитель конденсируются. Несконденсированные пары удаляются источником создания вакуума, в качестве которого обычно используют сухой или мокрый вакуум-насос либо паровой эжектор.

Широкое применение вакуум-сушильные шкафы находят при сушке фармацевтических препаратов и лекарств, чувствительных к температуре или легко окисляющихся материалов, а также различных ценных веществ. Особенно удобны они при обработке малых партий материала, влага которых представляет собой токсичные или ценные растворители. Пылящие материалы можно высушивать в вакуум-сушильных шкафах с незначительными потерями, гигроскопические вещества могут быть полностью высушены при температурах более низких, чем в сушилках, работающих под атмосферным давлением. Кроме того, такие аппараты используются для сушки вымораживанием (см. гл. IX первого тома), для проведения процессов ме-

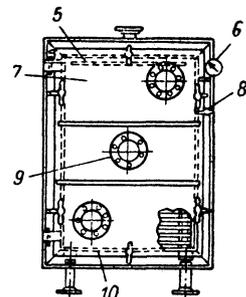


Рис. III-12. Вакуум-сушильный шкаф:

1 — наружный подвод пара или горячей воды; 2 — воздушник; 3 — наружные усиливающие ребра; 4 — прокладка из неопрена; 5 — верхняя греющая полка; 6 — вакуумметр; 7 — стальная дверь; 8 — вентиль для сброса вакуума; 9 — смотровое окно; 10 — водоотвод из камеры.

ТАБЛИЦА III-3

Характеристика вакуум-сушильных шкафов

	Высушиваемый материал		
	краситель сернистый черный	карбонат кальция	фосфат кальция
Нагрузка, кг сухого материала/м ²	25,7	20	32,8
Давление греющего пара, ат	4,2	4,2	2,1
Давление в аппарате, мм рт. ст.	685—710	685—710	685—710
Влажность материала, % ₃ (на общую массу):			
начальная	50	50,3	30,6
конечная	1	1,15	4,3
Продолжительность сушки, ч	8	7	6
Скорость испарения, кг/(ч · м ²)	3,24	2,84	2,4

Печи периодического действия

Печи периодического действия применяют главным образом для термообработки металлических деталей (отжига, закалки, нормализации), а также сушки и обжига керамических изделий. В химической технике их используют в тех же целях, что и периодически действующие полочные и камерные сушилки, когда температура процесса сушки превышает температуру, которую могут выдержать без деформации металлические стенки (обычные полочные или камерные сушилки применяют редко, если температура циркулирующего газа >320—430°С). Кроме того, эти печи используют для обжига небольших количеств материала, термическое разложение и других химических реакций, проведение которых в большом масштабе осуществляется во вращающихся обжиговых, подовых и шахтных печах.

Методы расчета и описание процесса теплопередачи в печах даны в гл. IV первого тома.

Специальные конструкции печей периодического действия показаны на рис. III-13—III-16 и кратко описаны ниже. Все они могут нагреваться газом, мазутом или электричеством. Стандартные обжиговые печи конструктивно подобны изображенной на рис. III-16 небольшой муфельной печи (за исключением кожуха муфеля).

Шахтные печи с принудительной конвекцией применяют для термообработки мелких металлических предметов (навалом). Большие металлические детали помещают в корзину с сетчатым дном, причем наиболее крупные из них располагают на решетке. Воздух, нагретый с помощью электрического тока, пропущенного через нихромовые спирали, поступает в пространство, выложенное огнеупорным кирпичом, по периферии шахты. Высококоростной вентилятор, расположенный ниже корзины, заставляет циркулировать горячий воздух вверх, вдоль спиралей, а затем вниз, через корзину. Часть тепла излучается внешней оболочкой корзины, но основной тепловой поток передается прямой конвекцией от циркулирующего газа твердому материалу,

таллизации, а также в производстве полупроводниковых деталей в регулируемых атмосферах (все эти процессы требуют гораздо более низких рабочих давлений, чем обычно применяемые при сушке).

Методы расчета. Тепло передается к влажному материалу теплопроводностью через полку или дно противня и радиацией от полки вверх. Значения критической влажности в данном случае не обязательно будут такими же, как при атмосферной сушке на полках или противнях¹. В течение периода постоянной скорости сушки влага удаляется быстро. Часто ~50% влаги испаряется в первый час 6—8-часового цикла. Продолжительность сушки пропорциональна толщине слоя высушиваемого материала (степень пропорциональности обычно больше 1, но меньше 2). Вакуум-сушильные шкафы работают в пределах изменения давления от 1 до 25 мм рт. ст. Для оценки размеров вакуум-сушильного шкафа коэффициент теплопередачи можно принять равным 19,5 ккал/(м² · ч · град), или 22,4 вт/(м² · град). Поверхность нагрева определяется как поверхность полок, находящаяся в прямом контакте с противнями. Для обеспечения максимальной поверхности контакта с обогреваемыми полками противни необходимо изготовлять возможно более плоскими. По той же причине полки не должны иметь окалины и ржавчины. На обогреваемых паром полках нужно обязательно устанавливать воздушники для удаления неконденсирующихся газов. Чтобы уменьшить возможность перегрева материала или всучивания в начале процесса сушки, греющий агент не следует подавать внутрь полок до тех пор, пока из камеры не будет удален воздух. Затвердевания поверхности высушиваемого материала можно избежать, замедляя скорость сушки в начальной стадии цикла.

Характеристика и стоимость. Закупочная цена вакуум-сушильного шкафа зависит от размеров камеры и числа полок в ней. Ориентировочные цены за 1 м² поверхности шкафа таковы: 2000 долл. при поверхности ~1,5 м², 1300 долл. при поверхности 3,4 м², 1100 долл. при поверхности 4,7 м² и 650 долл. при поверхности 18,5 м². Противни вакуум-сушильных шкафов стоят столько же, сколько противни камерных сушилок (см. стр. 233). В стоимость шкафа обычно включают стоимость кожуха, полок, соответствующего конденсатора и вакуум-насоса. Покрытие полок и внутренней поверхности камеры специальным пластиком (Heresite) увеличивает стоимость аппарата примерно на 20%. Изготовление полок из нержавеющей стали может удвоить цену вакуум-сушильного шкафа. Стоимость монтажа оборудования обходится примерно в 200% от стоимости металла (углеродистой стали), затрачиваемого на изготовление установок. Расход на рабочую силу может быть равен 50% стоимости аппарата, на ремонт и обслуживание — 20%. Годовые затраты на ремонт и эксплуатацию составляют от 5 до 10% общей установочной стоимости. Действительная стоимость рабочей силы зависит от продолжительности сушки, условий загрузки и разгрузки противней и т. д.

Для обеспечения вакуума в таких аппаратах требуется определенный расход мощности (например, при 685—735 мм рт. ст. потребляется 0,056—0,12 квт на 1 м² поверхности противней). Термический к. п. д. вакуум-сушильного шкафа обычно составляет 60—80%. Характеристика некоторых вакуум-сушильных шкафов приведена в табл. III-3.

¹ Ernst, Ridway, Tiller, Ind. Eng. Chem., 30, 1122 (1938).

Печи с подвижным дном отличаются от стандартных печей тем, что загрузку в них помешают на тележки, которые можно вкатить внутрь печи. Верхняя часть

кулирует под тележкой. Когда производственная площадь пола ограничена, в тех же целях используют элеваторные печи.

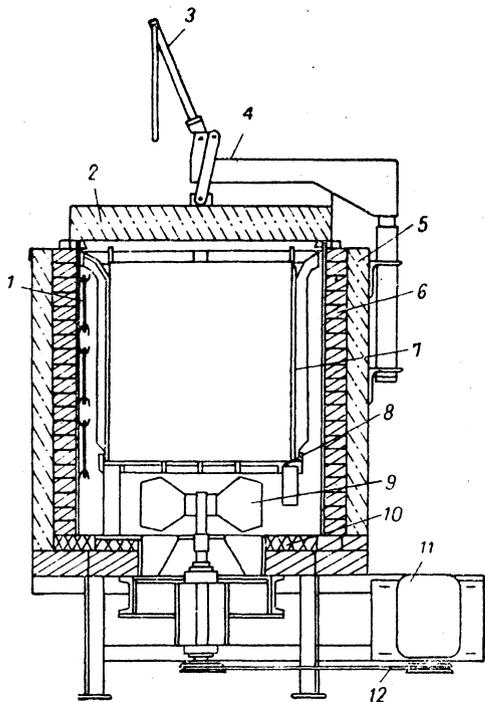


Рис. III-13. Шахтная печь:

1 — электронагревательный элемент; 2 — изолированная крышка; 3 — рычаг для подъема крышки; 4 — кронштейн; 5 — слой изоляции; 6 — слой огнеупорного кирпича; 7 — вентилятор; 8 — решетка; 9 — вентилятор; 10 — слой шамотного кирпича; 11 — электродвигатель; 12 — клиноременная передача.

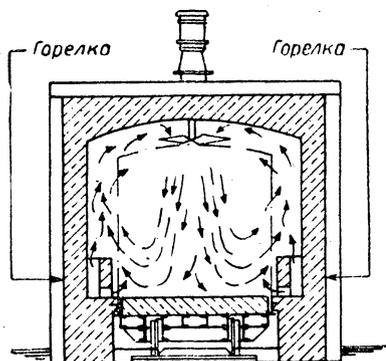


Рис. III-14. Печь с подвижным дном.

(платформа) тележки, изготовленная из огнеупорного материала, служит подом печи. Только верх тележки подвергается действию тепла, нижняя же металлическая конструкция защищена кирпичом пода, песком и изолирующим слоем воды. Охлаждающий воздух циркулирует под тележкой.

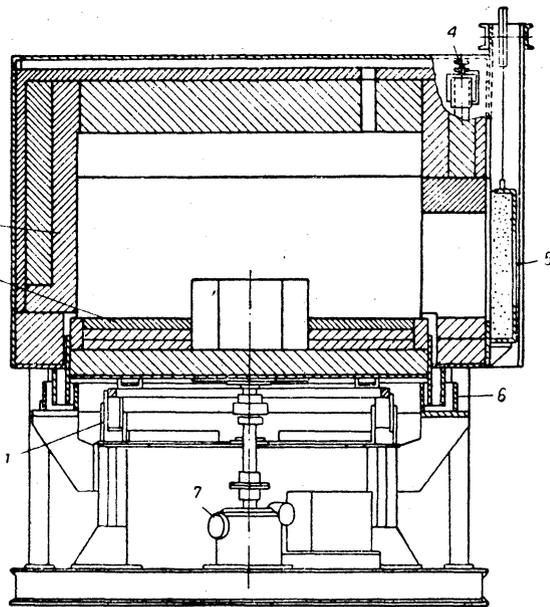


Рис. III-15. Печь с вращающимся подом:

1 — ролики; 2 — вращающийся под; 3 — обкладка; 4 — приспособление для очистки пола; 5 — дверь; 6 — уплотнение; 7 — вариатор числа оборотов.

Греющая камера печи с вращающимся подом выложена огнеупорным кирпичом. Внутри камеры расположен кольцеобразный, также выложенный огнеупорным

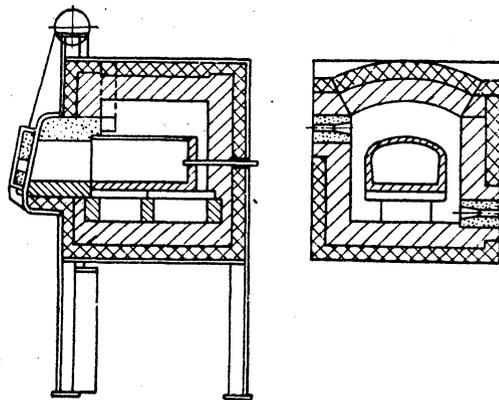


Рис. III-16. Муфельная печь малых размеров.

материалом, вращающийся под. Для предотвращения подсоса воздуха на периферии пода находится песок или циркулирует охлаждающая жидкость. Печи с вращающимся подом могут действовать полунепрерывно.

Стандартные печи обычно изготовляют с прямым нагревом, причем дымовые газы циркулируют непо-

средственно над загруженным материалом. Для отжига и закалки инструментов, спекания металлических порошков и других работ, требующих защиты загруженного материала от окисления специальной атмосферой, часто применяют печи муфельного типа. В них загрузка отделяется от горелок и продуктов сгорания огнеупорным сводом. Теплота передается от горячего газа излучением и конвекцией к своду и излучается от свода к загрузке.

Обжиговые печи часто используют для обработки керамических изделий. В них можно производить сушку, окисление, прокаливание и стеклование. Такие печи снабжены горизонтально расположенными горелками, работающими на газообразном, жидком или твердом топливе. Керамические изделия могут подвергаться в печи действию пламени и дымовых газов, когда это не снижает качества продукта; в противном случае применяют муфельные печи.

Наиболее просты обжиговые печи с нижней тягой. Названы они так по направлению потока дымовых газов при контакте с загруженным материалом. Затем поток газов поднимается вверх вдоль стенок печи и поступает в дымоход. Используют эти печи для обжига кирпича, труб, черепицы и гончарных изделий.

Обжиговые печи с верхней тягой применяют для обжига глиняных или фаянсовых изделий. Разновидностью этих печей являются сушильные печи, используемые для обжига обычного кирпича. Сушильная печь строится из кирпича-сырца, покрывается слоем обожженного кирпича и полностью разбирается после каждого обжига. Другая разновидность печей с верхней тягой — обжиговые клетки, применяемые как временные сооружения для обжига обычного кирпича. Обжиговые клетки строятся без дымоходов и состоят только из боковых стенок со сводчатым пространством для топki.

Стоимость шахтных печей: 3000 долл. при объеме $0,014 \text{ м}^3$, 7000 долл. при объеме $0,425 \text{ м}^3$ и 17 000 долл. при объеме $\sim 2 \text{ м}^3$; стандартные обжиговые печи с электрическим нагревом стоят от 1600 долл. при площади пода $0,14 \text{ м}^2$ до 9000 долл. при площади пода 3 м^2 (цены 1959 г.).

ТУННЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Туннельные установки очень часто представляют собой работающие серийно камерные или полочные аппараты периодического действия. Обрабатываемый твердый материал помещают на полки или вагонетки, которые затем в контакте с горячими газами движутся через туннель. Обычно каждая вагонетка за определенный период занимает последовательно все позиции в туннеле. Процесс протекает полунепрерывно. Когда туннель заполнен, одна вагонетка выходит из разгрузочного конца аппарата, а другая подается от входа. В некоторых случаях вагонетки движутся по рельсам или монорельсу механически и обычно соединяются цепью, прикрепляемой ко дну каждой вагонетки.

Типы туннельных сушилок показаны на рис. III-17. Туннельные аппараты с бесконечной лентой работают непрерывно: слой твердого материала непрерывно поступает на бесконечную ленту конвейера с одного конца установки и непрерывно разгружается с другого.

Воздух (газ) в туннельных аппаратах может двигаться прямооток (рис. III-17, а) или противоток

(рис. III-17, б) по отношению к поступающему материалу. Используется также комбинированное движение воздуха (рис. III-17, с). Кроме того, часто применяют туннельные аппараты с перекрестным током нагретого воздуха. Чтобы сохранять температуру во время процесса постоянной, змеевнки для промежуточного нагрева воздуха в этом случае могут быть установлены в аппарате после каждого изменения направления потока; большие вентиляторы пропеллерного типа нагнетают в аппарат или удаляют из него воздух в нужных точках. Туннельные аппараты можно использовать при любой комбинации движения воздушного потока и необходимой температуры. Для повышения скорости тепло- и массообмена при обработке гранулированного твердого материала, не оказывающего большого сопротивления потоку воздуха, применяют перфорированные или сетчатые конвейерные ленты со сквозной циркуляцией нагретого воздуха или горячего газа.

Твердый материал в туннельных аппаратах обычно нагревается при прямом контакте с горячими газами. При высокотемпературных процессах важное значение может иметь тепловое излучение от стенок и огнеупорной облицовки. В туннельных вакуум-сушилках полунепрерывного действия обогреваемый паром барабан помещается под лентой конвейера, а электрические нагреватели — сверху. В установках с прямым нагревом воздух может нагреваться прямо или косвенно при сжигании мазута, газа, угля или паровыми змеевиками при температурах $< 200^\circ \text{C}$.

Туннельные аппараты применяют для обработки практически всех видов измельченных твердых материалов, а также отдельных предметов в крупнотоннажных производствах. Обычно капиталовложения и стоимость монтажа таких аппаратов выше, чем для соответствующих полочных или камерных установок периодического действия. Расходы на рабочую силу для загрузки и выгрузки материала в случае туннельных аппаратов с вагонетками или полками незначительны по сравнению с аналогичными расходами при периодически действующем оборудовании. Ленточные и сетчатые конвейеры в туннельных установках непрерывного действия дают возможность уменьшить расходы на обслуживание оборудования, но требуют дополнительных капиталовложений на автоматизацию загрузки и выгрузки материала.

Вспомогательное оборудование, рассмотренное ранее для камерных и полочных установок периодического действия (см. стр. 231), применимо также и для туннельных аппаратов. Оценка размеров туннельных аппаратов с вагонетками и полками, а также печей может быть проведена теми же способами, что и для периодически действующего оборудования камерного или полочного типа.

Сушилки со сквозной циркуляцией

В сушилках непрерывного действия со сквозной циркуляцией горячий воздух продувается через пронизываемый слой твердого влажного материала, движущегося на конвейерной ленте через аппарат.

Высокие скорости сушки в этом случае достигаются вследствие большой поверхности контакта фаз и короткого пути перемещения внутренней влаги.

Наиболее часто используют горизонтальные сушилки с сетчатой конвейерной лентой. Слой влажного материала толщиной от 25 до 150 мм расположен на

горизонтально движущемся сетчатом или перфорированном пластинчатом конвейере, сверху и снизу через этот слой продувается нагретый воздух. Сушильные характеристики таких аппаратов приведены в работе Маршалла и Хоугена¹.

Ленточная сушилка (рис. III-18) обычно состоит из нескольких отдельных секций, укомплектованных вентилятором и калориферами и объединенных общим ко-

ское сопротивление слоя твердого материала (без утечки воздуха) составляет примерно 50 мм вод. ст.

Для проведения процесса сушки со сквозной циркуляцией требуется, чтобы влажный материал находился в гранулированном состоянии и горячий воздух легко проникал сквозь слой материала. Многие высушиваемые материалы отвечают этому требованию, некоторые же из них необходимо предварительно под-

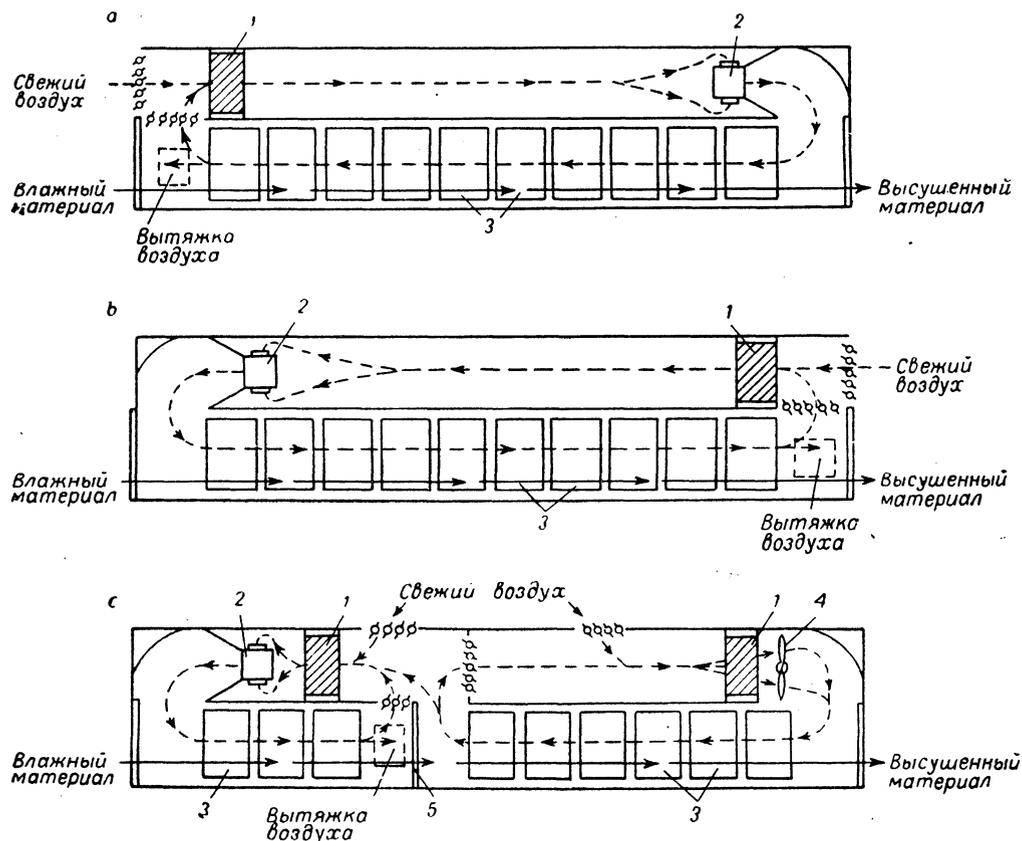


Рис. III-17. Типы туннельных сушилок [Van Arsdel, Food Ind., 14(10), 43(1942)]:

a — противоточная; *b* — проточная; *c* — с центральной вытяжкой.

1 — калорифер; 2 — воздуходувка; 3 — вагонетки; 4 — вентилятор; 5 — передвижная перегородка.

жухом или туннелем, вдоль которого перемещается сетчатая лента конвейера. Воздух, прошедший через слой влажного материала, затем снова подогревается и движется так, что сначала проходит над слоем влажного материала, а затем под слоем высушенного материала (рис. III-19). Часть воздуха непрерывно удаляется из сушилки одним или двумя вентиляторами (на рис. III-18 и III-19 не показаны). Процесс обычно проводится при высокой температуре в первых секциях с последующим ее понижением по мере высушивания материала. В некоторых случаях ленточные сушилки с охлажденным или специально увлажненным воздухом применяют для окончательного кондиционирования продукта. Максимальное гидравличе-

вергнуть специальной обработке для придания им нужной формы. Волокнистые, хлопьевидные и зернистые гранулированные материалы обычно сушат без

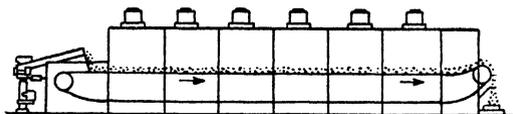


Рис. III-18. Схема ленточной сушилки непрерывного действия со сквозной циркуляцией.

предварительного формирования. Существует несколько способов формирования высушиваемого материала.

1. Относительно сухие материалы (например, осадки с центрифуги) можно гранулировать обычным способом

¹ Marshall, Hoogen, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 38, 91 (1942).

для создания достаточно пористого слоя на сетчатой конвейерной ленте.

2. Пастообразные материалы часто формуют методом экструзии в спагеттиобразные кусочки диаметром ~ 6 мм и длиной несколько сантиметров.

3. Влажные пасты, которые нельзя гранулировать или подвергнуть экструзии, можно предварительно подсушить и отформовать на обогреваемом паром рифленом барабане.

4. Тиксотропные осадки, которые нельзя формовать описанными выше методами, снимают ножом с фильтровальной ткани вращающихся вакуум-фильтров и в измельченном состоянии подвергают сушке со сквозной циркуляцией.

5. Материалы, заметно усаживающиеся во время сушки, пересыпают в течение сушильного цикла (при этом начальная толщина слоя уменьшается в 2—6 раз).

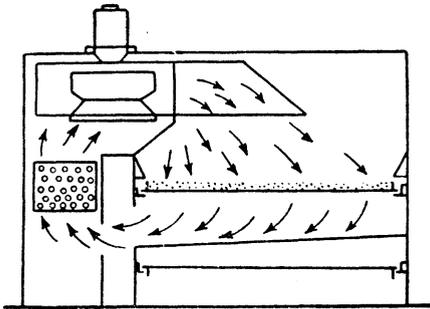


Рис. III-19. Ленточная сушилка непрерывного действия со сквозной циркуляцией (поперечный разрез).

6. Порошкообразные материалы таблетуют или формуют в брикеты (сушку со сквозной циркуляцией в этом случае применяют редко).

Классификация материалов по методам формования дана в табл. III-4.

Обычно в ленточных сушилках со сквозной циркуляцией в качестве сушильного агента используют нагретый паром воздух (можно применять также дымовые газы, но температуры $>320^\circ\text{C}$ нежелательны из-за возникающих при этом проблем смазки движущихся частей аппарата — конвейера, цепей, роликов). Количество рециркулирующего воздуха составляет 60—90%. Конвейеры изготовляют из проволочной сетки или перфорированных стальных пластин. Минимальные практически применяемые размеры отверстий в сетчатой ленте $\sim 0,5$ мм.

Методы расчета. Теоретические уравнения для расчета скорости сушки горячим газом, циркулирующим через слой гранулированного твердого материала, приведены в гл. VII первого тома справочника. Однако практически для расчета непрерывнодействующих сушилок со сквозной циркуляцией необходимо проведение испытаний на пилотных установках. В связи с тем, что нагрузка, а также распределение высушиваемого материала очень редко одинаковы в промышленных и опытных установках, экспериментально найденную продолжительность сушки приходится увеличивать для промышленной установки в 1,5—2 раза.

Характеристика и стоимость. Экспериментальные данные по сушке со сквозной циркуляцией воздуха при-

ТАБЛИЦА III-4

Классификация материалов по методам формования

Методы формования	Материалы
Предварительного формования не требуется	Ацетат целлюлозы, силикагель, древесные опилки, плавиковый шпат, крупа, продукты питания, асбестовое волокно, льняное семя, вискоза
Срезание осадка ножом с фильтровальной ткани	Крахмал, гидрат окиси алюминия
Гранулирование	Каолин, криолит, арсенат свинца, зерна крахмала, ацетат целлюлозы, полупродукты красителей
Экструзия	Карбонат кальция, свинцовые белила, литопон, двуокись титана, карбонат магния, стеарат алюминия, стеарат цинка
Осаждение на рифленом барабане	Литопон, цинковый крон, карбонат кальция, карбонат магния
Образование хлопьев на охлаждаемом барабане	Хлопья мыла
Брикетирование	Кальцинированная сода, зерна крахмала, синтетический каучук

ведены в табл. III-5. Характеристика сушилок дана в табл. III-6.

Годовые расходы на ремонт и эксплуатацию сушилок непрерывного действия со сквозной циркуляцией составляют 5—10% от установочной стоимости. Расход пара на 1 кг испаряемой влаги равен 2,5 кг. Термический к. п. д. зависит от требуемой конечной влажности материала и процента рециркуляции воздуха.

Ширина ленты в секциях длиной 1,5—2,4 м колеблется в пределах от 0,3 до 3,6 м. Каждая секция состоит из металлического кожуха (изолированного со стороны стенок и крышки), калориферов, циркуляционного вентилятора, распределительного воздуховода, больших лотков-ловушек под конвейером и конвейерной сетки.

Приводим приблизительную стоимость сушилок с подвесной сетчатой лентой из нержавеющей стали, включая паровые калориферы, вентиляторы, электродвигатели и вариатор скоростей конвейера (по данным 1960 г.):

Длина ленты м	Стоимость, долл./м ²	
	Ширина ленты 2,4 м	Ширина ленты 3 м
6—9	1500	1300
9—12	1400	1180
12—15	1300	1070
15—18	1180	960

Экспериментальные данные по сушке со сквозной циркуляцией воздуха

Высушиваемый материал	Форма материала	Влажность, кг/кг сухого материала			Температура поступающего воздуха, °С	Толщина слоя материала, мм	Нагрузка, кг продукта/м ²	Скорость воздуха, м/сек	Продолжительность сушки, мин
		начальная	критическая	конечная					
Арсенат свинца	Гранулы	1,23	0,45	0,043	132	50	18	1,17	30
		1,25	0,55	0,054	132	65	22	1,17	40
Асбест	Из экструдера	1,34	0,64	0,024	127	50	18	1,02	60
		1,31	0,60	0,0006	127	75—90	26,8	0,92	70
		0,47	0,11	0,008	138	75	13,5	0,89	9,3
		0,46	0,10	0,0	138	50	6,25	0,86	6,0
Ацетат целлюлозы	Гранулы	0,46	0,075	0,0	138	40	4,5	1,12	4,5
		1,14	0,40	0,09	121	12	1,4	1,27	3
		1,09	0,35	0,0027	121	18	2,68	0,86	12
		1,09	0,30	0,0041	121	25	4,05	0,56	18
Белила свинцовые	С рифленого барабана	1,10	0,45	0,004	121	40	6,1	0,51	30
		0,238	0,07	0,001	82	65	76,5	1,12	50
		0,49	0,17	0,0	93	40	33,5	1,02	45
Гидрат окиси алюминия	Брикеты	0,105	0,06	0,00	180	65	60	0,61	30
		9,60	4,50	1,15	60	40	1,61	1,12	150
		Срезанный с фильтровальной ткани осадок	5,56	2,25	0,42	60	70	4,55	1,12	180
Глина	Гранулы	0,277	0,175	0,0	100	70	46	1,02	32
		0,28	0,18	0,0	100	125	100	1,07	73
Двуокись титана	»	1,02	0,60	0,10	154	40	6,7	1,38	10,5
		1,07	0,65	0,29	154	80	16	0,86	10
		0,28	0,17	0,0009	101	75	43,7	1,07	35
Каолин	С рифленого барабана	0,297	0,20	0,005	101	115	56	1,22	25
		0,443	0,20	0,008	102	70	45	1,02	30
		0,36	0,14	0,0033	121	90—100	40,5	1,53	20
		0,36	0,21	0,0037	121	180	80	1,07	50
Карбонат кальция	С рифленого барабана	0,85	0,30	0,003	138	40	15,9	1,15	20
		0,84	0,35	0,0	138	90	25,6	1,17	30
		1,69	0,98	0,255	138	12	4,88	1,43	15
		1,41	0,45	0,05	138	18	5,75	1,02	20
Карбонат магния	»	2,57	0,87	0,001	140	75	10,9	1,15	29
		2,23	1,44	0,0019	143	75	13,2	0,86	40
Крахмал картофельный	Срезанный с фильтровальной ткани осадок	0,866	0,55	0,069	121	70	26,2	1,02	45
		0,857	0,42	0,082	121	50	17,7	0,94	25
Крахмал маисовый	Срезанный с фильтровальной ткани осадок	0,776	0,48	0,084	71	70	26,3	0,74	90
		0,78	0,56	0,098	106	70	27,2	0,765	40
		0,76	0,30	0,10	71	18	7,65	0,665	25
Криолит	Гранулы	0,456	0,25	0,0026	110	50	34	0,765	40
		0,163	0,07	0,004	93	40	66	1,12	40
Оксид ртутный	Из экструдера	4,51	1,85	0,15	121	40÷6	3,22	0,86	25
		4,49	1,50	0,215	66	40÷6	3,36	0,92	105
		4,50	1,60	0,218	51	40÷6	3,4	0,92	110
		0,36	0,24	0,008	138	40	22,7	0,51	85
Сода (карбонат натрия)	Из экструдера	0,36	0,24	0,008	138	40	22,7	0,51	85
		0,36	0,24	0,008	138	40	22,7	0,51	85
Стеарат алюминия	»	4,20	2,60	0,003	77	75	6,5	1,27	60
		2,74	0,90	0,0026	77	75	8,8	0,56	95
Стеарат кальция	»	2,76	0,90	0,007	77	50	5,85	0,92	70
		2,52	1,00	0,0	77	40	4,36	1,02	40
		4,63	1,50	0,005	88	45	4,1	0,86	60
		0,13	0,066	0,0	149	50	51	1,12	13
Шпат полевой	Шарики	0,13	0,066	0,0	149	50	51	1,12	13

ТАБЛИЦА III-6

Характеристика непрерывнодействующих сушилок со сквозной циркуляцией¹

	Высушиваемый материал							
	неорганический пигмент		гель	органический материал		волокно		
Производительность, кг продукта/ч	1520	1820	655	1260	182		1140	680
					Секция А	Секция В		
Длина сушилки (примерная), м	33	19	40	18	9,2	10,4	19	19
Толщина слоя высушиваемого материала, мм	50	100	65	25	70	125	75	50
Температура воздуха, °С	149	121	100—118	93—116	$t_c = 35$ $t_m = 26$	51—82	121	116
Нагрузка, кг продукта/м ²	27,5	45	7,9	8,8	34,6	52,5	1,55	0,83
Размер отверстий в конвейерной ленте, мм	4—см ²	1,2×4,75—см ³	0,3—см ²	1—см ²	1,7—см ⁴		4,75—см ⁴	3,2—см ⁴
Аппарат для предварительного формования материала или питатель	Экструдер	Рифленый барабан	Гранулятор и вибропитатель	Фильтр	Вибропитатель		Вращающийся питатель	Открытый вращающийся питатель для влажного сырья
Форма и размер частиц	Кусочки размером 6 мм	Кусочки 8×8 мм	Гранулы размером < 12 мм	Срезанный с фильтровальной ткани осадок	Шарики диаметром 3 мм		Длинные волокна	Резаные волокна
Влажность материала, % (на сухой продукт):								
начальная	94,5	55,0	488,0	78,6	42,9		50,0	100,0
конечная	0,25	0,5	1,8	13,6	10,5		8,0	5,5
Продолжительность промышленной сушки, ч	1,20	0,81	1,0	0,26	4,95		0,032	0,043
Скорость сушки, кг влаги/(ч·м ²)	21,6	30,2	38,1	25,4	1,62		17,5	24,2
Скорость воздуха, м/сек	0,86	1,27	1,2	0,92	1,12	0,92—0,97	1,22	1,22
Расход греющего пара на 1 кг испаренной влаги, кг	1,92	2,03	2,24	1,93	7,03		2,06	2,01
Установочная мощность, кВт	45	35,3	90	25,4	38,4		41,3	46,2

¹ По данным Proctor a. Schwartz, Inc.² Сетчатая лента.³ Щели.⁴ Отверстия в пластинчатой ленте.

Если учесть также стоимость регуляторов температуры, пусковых двигателей, формовочного оборудования

Данные по сушке различных продуктов в ленточных вакуум-сушилках приведены в табл. III-7. Эти

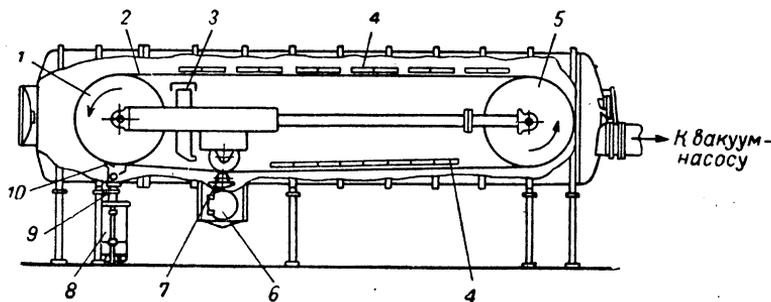


Рис. III-20. Вакуумный дегидрататор:

1 — охлаждаемый барабан; 2 — бесконечная лента; 3 — деаэрактор (воздушник); 4 — тепловые излучатели; 5 — обогреваемый барабан; 6 — дверца для обслуживания питателя; 7 — вращающийся питатель; 8 — сборник продукта; 9 — воздушный кран; 10 — скребок.

и вспомогательных конвейеров для загрузки и разгрузки материала, стоимость сушилки увеличивается на 5—15 тыс. долл.

Ленточные вакуум-сушилки

Ленточный вакуумный дегидрататор, изображенный на рис. III-20, можно рассматривать как непрерывнодействующую вакуум-сушилку.

Сушильная система находится в цилиндрической камере диаметром ~3,6 м и длиной 16 м. Камера рассчитана на полный вакуум и снабжена двумя большими отверстиями для доступа внутрь, двумя сборниками продукта и несколькими смотровыми окнами. Четырехступенчатый паровой эжектор обеспечивает поддержание низкого рабочего остаточного давления внутри камеры. Изготовленная из нержавеющей стали бесконечная лента шириной 1,2 м и общей длиной ~30 м натягивается на двух стальных барабанах диаметром 2,3 и 2,6 м.

Исходная суспензия или раствор непрерывно поступает в дегидрататор и с помощью ролика равномерным слоем распределяется на движущейся конвейерной ленте. Этот слой подогревается электрическими излучательными нагревателями и проходит над обогреваемым паром барабаном, куда подводится основная энергия для испарения влаги. Затем находящийся на ленте материал окончательно нагревается и сушится с помощью дополнительных излучательных нагревателей, смонтированных над лентой. Высушенный продукт удаляется из вакуумной камеры с помощью двух периодических действующих сборников продукта, которые попеременно наполняются и опорожняются. Перед разгрузкой высушенный продукт проходит над охлаждаемым барабаном на разгрузочном конце аппарата. Охлаждение обычно ослабляет сцепление продукта с лентой и, таким образом, облегчает разгрузку. Кроме того, легко окисляющиеся и чувствительные к нагреванию продукты не удаляются из вакуумной камеры до тех пор, пока их температура не будет понижена.

Сушилки подобной конструкции применяют в основном для сушки пищевых продуктов с целью получения ароматных и легкорастворимых порошков, а также фармацевтических препаратов. Исходные раствор или суспензия должны быть сконцентрированы перед проведением процесса. Для получения однородной продукции высокого качества необходим контроль физических характеристик исходного материала.

ТАБЛИЦА III-7

Данные по сушке различных продуктов в ленточных вакуум-сушилках¹

Высушиваемый материал	Содержание твердой фазы в исходном материале, %	Давление (абсолютное) в сушилке, мм рт. ст.	Производительность, кг продукта/ч	Примерная стоимость за 1 кг твердого продукта, центы
Молоко:				
снятое	43	5,0	227	4,4—5
цельное	37,5	5,0	227	4,4—5,5
шоколадное	70	6,0	410	2,2—3,3
Кофе	45—50	6—8	360	3,3
Чай	45—50	7	340	4,4
Пунш фруктовый	62,2	3,0	165	—
Пюре из бананов	40	4,0	182	9,2
Соки:				
апельсиновый	60	1—1,5	182	11
из ягод бузины	16,6	3,5—4,0	90	—
лимонный	49,0	4,0	116	—
малиновый	59,4	3,0	227	4,4
томатный	35	3,5	182	8,8—10
чернославовый	70	6—8	204	4,4
Термочувствительные продукты:				
витамин D ₃	38	10	235	—
дрожжи	26	4,5	90	—
патока свекловичная	77	5,5	204	—
стрептомицин	40	—	—	—
эссенция цитрусная	34,9	5,6	270	—
Яйца:				
белок	10,6	4,0	45	—
белок и желток вместе	28,1	4,0	123	—
желток	45,4	4,0	145	—

¹ По данным Chemetron Corp.

аппараты не могут конкурировать по стоимости с сушилками других типов, за исключением, возможно, распылительных сушилок, вакуум-сушильных шкафов и вакуумных барабанных сушилок.

ПЕЧИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Непрерывнодействующие печи применяют для тех же самых целей, что и описанные выше печи периодического действия. Установки обычно имеют газовый или электрический нагрев и используют для теплопередачи либо прямую циркуляцию топочных газов, либо излучение от стенок муфеля. Печи непрерывного действия часто снабжают дополнительной приставкой для охлаждения материала перед разгрузкой.

Конвейеры в таких печах могут быть изготовлены из параллельных цепей, покрытых матами, планками, плетеной или литой (из сплава) лентой. Для поддержания ленты в натянутом состоянии во время нагревания и охлаждения обычно используют автоматические растягивающие устройства. Продукт загружают непосредственно на конвейер или на специальные встроенные в него опоры. В случае крупных отдельных предметов применяют роликовые конвейеры. Для герметизации концов печи и сохранения в ней специальной атмосферы используют огневые завесы.

В печах с конвейером скребкового типа все механические части вынесены из горячей зоны. Конвейер

обычно устанавливается на роликах. Скребки перемещаются с помощью электродвигателя, сжатого воздуха или гидравлической системы и могут действовать синхронно с устройствами, открывающими дверцы печи (таким образом происходит регулирование продолжительности операции). Допустимая нагрузка на единицу площади в этом случае больше, чем в печах с ленточным конвейером.

Для небольших количеств твердого материала применяют перфорированные полки (или противни) из различных сплавов. Полки перемещаются по туннелю на роликах, по рельсам и иногда по огнеупорным рейкам, причем одна полка проталкивает вперед другую. Загруженный материал может двигаться по одиночной или многоступенчатой камере прямого тока и противотока. При противотоке тепло выходящего из печи твердого материала передается холодному, поступающему на обработку материалу; тепловые потери и расход топлива в этом случае уменьшаются.

В керамических туннельных обжиговых печах обрабатывают большие предметы неправильной формы. Для предотвращения конденсации влаги на продукте и его растрескивания необходимо осуществлять контроль и точное регулирование температуры и влажности в печи. Данные о работе таких печей и методы их расчета можно найти в специальных журналах.¹

¹ Например: The American Ceramic Society Bulletin. — Transactions of the British Ceramic Society.

СИСТЕМЫ С ДВИЖУЩИМСЯ СЛОЕМ

Использование движущегося слоя в процессах взаимодействия систем газ — твердое вещество уменьшает возможность существования застойных зон; кроме того, относительное движение частиц в таком слое создает условия для взаимодействия газа с большей, чем при неподвижном слое, поверхностью твердой фазы. Оборудование с движущимся слоем разделено в этой главе на вращающиеся и гравитационные аппараты, а также аппараты с перемешиванием.

ВРАЩАЮЩИЕСЯ АППАРАТЫ

Вращающийся аппарат представляет собой цилиндр, установленный в подшипниках с незначительным наклоном к горизонту. Отношение длины цилиндра к его диаметру находится в пределах от 4 до >10, причем диаметр может изменяться от 0,3 до >3 м. Исходный твердый материал загружается в аппарат на одном конце и, продвигаясь вперед под действием сил вращения, напора и за счет наклона цилиндра, разгружается в качестве готового продукта с другого конца. Газы, проходящие внутри цилиндра, могут замедлять или ускорять движение твердой фазы, в зависимости от того, как движутся потоки, — противотоком или прямооток.

По способам теплопередачи вращающиеся аппараты могут быть прямого, смешанного, непрямого и специального действия.¹ В аппаратах с прямым нагревом тепло подводится к обрабатываемому материалу или отводится от него при непосредственном взаимодействии потоков газа и твердой фазы, а в аппаратах с непрямым (косвенным) нагревом теплоноситель

отделяется от обрабатываемого твердого материала металлической стенкой или трубой¹.

Ниже подробно будут рассмотрены только те аппараты, в которых осуществляется прямой или непрямым нагрев. К основным конструкциям такого типа относятся обычно вращающиеся сушилки², печи для прокаливания (кальцинаторы) и обжиговые печи. Тепло- и массообменные рабочие характеристики позволяют использовать эти аппараты для проведения процессов сушки, рекуперации растворителей, термического разложения, смешения, спекания, агломерации и химических реакций в твердой фазе.

Вращающаяся сушилка (или охладитель) с прямым нагревом (охлаждением) представляет собой металлический цилиндр (барабан) со скребками³ или без них. Такая сушилка пригодна для проведения процессов при низких или средних температурах, причем рабочая температура ограничивается главным образом механическими характеристиками металла, из которого изготовлен аппарат.

Металлический цилиндр вращающейся обжиговой печи с прямым нагревом выложен внутри изоляционным материалом или огнеупорным кирпичом. Эту печь используют для проведения высокотемпературных процессов.

Паровая трубчатая сушилка с непрямым нагревом представляет собой металлический цилиндр, снабженный одним или более рядами металлических труб, установленных продольно в кожухе. Такую сушилку используют для проведения процессов, допускающих

¹ В СССР различают аппараты контактного и конвективного действия. — Прим. ред.

² Обычно называются барабанными сушилками. — Прим. ред.

³ Имеется в виду внутренняя насадка, обеспечивающая перемешивание материала. — Прим. ред.

¹ Smith, Ind. Eng. Chem., 30, 993 (1938).

применение температур греющего пара или требующих водяного охлаждения (в трубах).

Вращающаяся печь для прокаливания (кальцинатор) с непрямым нагревом представляет собой цилиндрическую металлическую реторту, помещенную внутри электрической или пламенной печи. В основном ее используют для проведения процессов при средних температурах, максимально равных температурам, которые могут выдержать металлические стенки цилиндра (обычно 370—430° С для углеродистой и 540—760° С для нержавеющей стали).

Сушилка «Рото-Лувр» с прямым нагревом¹ является одним из наиболее важных аппаратов специального назначения. Она отличается от обычной вращающейся сушилки тем, что в ней обеспечивается сквозная циркуляция газа через слой твердого материала. Применяют ее для проведения процессов при низких и средних температурах.

Во вращающихся аппаратах как периодического, так и непрерывного действия обрабатывают твердые материалы, которые имеют относительно свободную подвижность (сыпучесть) и могут легко выгружаться. Материалы, которые не обладают хорошей сыпучестью при загрузке, специально обрабатывают, возвращая в цикл часть конечного продукта, перемешанного с исходным материалом в отдельном смесителе до образования однородного гранулированного питания, или поддерживая слой материала в цилиндре (на загрузочном конце) в сыпучем состоянии с помощью формования и перемешивания, проводимых в самом аппарате. Правильно рассчитанная рециркуляция позволяет обрабатывать во вращающихся аппаратах многие виды суспензий и растворов. Вращающиеся обжиговые печи с прямым нагревом и печи для прокаливания с непрямым нагревом без внутренней насадки или других приспособлений, затрудняющих проход материала, часто снабжают подвесными цепями. Обрабатываемый материал налипает на эти цепи, затем, отвердев, постепенно обламывается и продолжает движение по цилиндру к разгрузочному концу. В печах для прокаливания с непрямым нагревом цепи можно использовать также для поддержания чистоты внутренних стенок.

Аппараты с прямым нагревом обычно конструктивно просты и экономичны. Используют их в тех случаях, когда можно допустить прямой контакт твердого материала с дымовыми газами или воздухом. Для проведения процессов в таких аппаратах требуются большие объемы газа, движущегося с высокой скоростью (при экономическом расчете скорость газа очень редко берется меньше 0,5 м/сек). Применение вращающихся аппаратов с прямым нагревом для обработки твердых материалов, содержащих чрезвычайно тонкие частицы, может привести к чрезмерным потерям продукта сходящими газами.

Более сложны и дороги аппараты с непрямым нагревом. В этом случае необходимо только такое количество газа, которое достаточно для удаления вторичного пара или для завершения внутреннего процесса. Эти аппараты могут быть герметизированы и использованы для проведения процессов, требующих специальной газовой атмосферы и исключения действия наружного воздуха. Аппараты с непрямым нагревом (за исключением действующих под вакуумом) редко применяют для обработки термочувствительных материалов, так как температура греющей поверхности должна быть ниже температуры разложения продукта, в ре-

зультате чего потери температурного напора обычно ведут к очень низким скоростям теплопередачи.

Вращающиеся аппараты с прямым нагревом требуют установки точной камеры для достижения высоких температур или паровых caloriferов для более низких температур. Когда загрязнение продукта дымовыми газами в аппаратах с прямым нагревом нежелательно, можно использовать нагреватели воздуха с непрямым газовым или другим нагревом.

Способ питания вращающихся аппаратов зависит от свойств материала, а также от размещения и типа питателя. Если исходный материал поступает сверху, можно применить желоб, протянутый в цилиндр. Для герметизации в тех случаях, когда подача материала самотеком неудобна, обычно используют шнековый питатель. На прямоточных установках с прямым нагревом питающий желоб или конвейер могут охлаждаться холодной водой (через стенку), если они соприкасаются с входящим потоком горячего газа. Это предохраняет от перегрева (и, следовательно, от образования окислы) металлические стенки или термочувствительный исходный материал.

Все типы транспортеров могут быть использованы для рециркуляции в случае смешения продукта с исходным материалом, однако наиболее универсальную применимость имеет лопастной смеситель с двойным кожухом типа глиномешалки (см. рис. III-76). Для предотвращения чрезмерных потерь тепла от горячего сухого рециркулирующего продукта этот транспортер или смеситель нужно изолировать. Необходимо также установить специальную емкость для создания запаса рециркулирующего твердого материала на период пуска аппарата и на время какого-либо неожиданного прекращения выгрузки продукта из цилиндра. Во многих случаях экономическим расчетом найдено, что рециркулировать должно около 50—60% продукта.

По одному из методов питания прямоточного сушильного оборудования с прямым нагревом отходящие газы используются для транспортирования, смешения и предварительной подсушки влажного исходного материала. В этом случае исходный материал вводится в отходящий из сушилки с высокой скоростью газовый поток, смешивается с унесенной из аппарата пылью, отделяется от отходящих газов в циклоне и поступает в загрузочный конец цилиндра. Наличие двух прямоточных ступеней, работающих противотоком, обеспечивает высокий термический к. п. д. установок.

Выгрузка продукта из вращающихся аппаратов производится непосредственно в сборник или фасовочные бункера. Иногда продукт транспортируется на дальнейшую обработку. Пневмотранспорт чаще всего применяется одновременно для двух целей — транспортирования продукта и его охлаждения. Для охлаждения можно использовать также шнеки, виброконвейеры и вращающиеся охладители с прямой или непрямой теплопередачей.

Пыль, унесенная потоком отходящих газов, обычно отделяется в циклоне. При необходимости ее можно возвратить в процесс. В случае дорогих материалов или очень тонких частиц после циклона может быть установлен рукавный фильтр. Если в горячих отходящих газах присутствуют ядовитые газообразные или твердые вещества, то газ, поступающий для насыщения (как в трубчатой паровой сушилке) или рециркуляции в герметичной системе, должен быть пропущен через мокрый скруббер, установленный после циклона или независимо от него. Циклоны и рукавные фильтры

¹ Жалюзийная барабанная сушилка. — Прим. ред.

в сушильных установках часто требуют изоляции и подвода небольшого количества греющего пара.

Вытяжной вентилятор должен располагаться за пылеочистительной системой. Для установок с вращающимися аппаратами гидравлическое сопротивление пылеочистительных устройств составляет 50—90% от общего перепада давлений во всей контактной системе.

Вращающиеся аппараты (кроме выложенных кирпичом), действующие при температурах выше температуры окружающей среды, обычно изолируются с целью уменьшения тепловых потерь. Исклучением являются установки с непрямым нагревом, состоящие из простых металлических конструкций и работающие при высоких температурах; в этом случае тепловые потери через стенки кожуха необходимы для того, чтобы предотвратить перегрев металла. Изоляция особенно необходима для прямоточных установок с прямым нагревом.

Для лучшего действия аппарата скорость подачи материала должна быть тщательно отрегулирована. Так как температура твердого материала трудно поддается измерению и ее изменения обнаруживаются медленно, большинство процессов во вращающихся аппаратах регулируется непрямым способом: измеряются и регулируются температуры входящего и отходящего потоков газа (например, в сушилках и обжиговых печах с прямым нагревом), температура (давление) греющего пара, а также температура и влажность отходящего газа (например, в трубчатых паровых сушилках с непрямым нагревом); непосредственное измерение температуры кожуха производится в печах для прокаливания с непрямым нагревом. Измерения температуры продукта в большинстве случаев производятся с целью вторичного контроля.

На новейших вращающихся аппаратах устанавливаются электрические двигатели. Несмотря на то, что теперь редко случается, чтобы электрические устройства выходили из строя надолго, оборудование, которое приводится в действие электрическим током и работает при температуре металла выше 150°С, следует снабжать вспомогательным двигателем или силовым источником. Нарушение равномерности вращения печи для прокаливания или высокотемпературной сушилки, чрезмерно загруженной твердым материалом, быстро приводит к местному расплавлению стенки цилиндра, обусловленному неравномерностью охлаждения. Эти потери симметрии могут привести к несчастному случаю.

Вращающиеся сушилки с прямым нагревом

Вращающаяся сушилка с прямым нагревом обычно снабжается внутренними лопастями для подъема и сыпания твердого материала в газовом потоке, проходящем через аппарат. Эти лопасти могут быть расположены вдоль всей длины цилиндра. Обычно они немного отводятся через каждые 0,6—2,0 м для того, чтобы обеспечить наиболее равномерное распределение твердой фазы в газовом потоке. Форма лопастей зависит от характеристик твердого материала. Для сыпучих материалов применяют радиально расположенные лопасти с порогом под углом 90°. Для слипающихся материалов используют лопасти из полосового железа, расположенные радиально, без каких-либо порогов. Если во время сушки свойства обрабатываемого материала изменяются, то форма лопастей меняется по длине аппарата. Часто в первой трети сушилки, начиная от загрузочного конца, устанавливают лопасти без порога, в средней ее части — с порогом под углом 45°

и в последней трети цилиндра — с порогом под углом 90°. Спиральные лопасти обычно применяют на первых метрах загрузочного конца аппарата для того, чтобы сообщить ускорение потоку, выходящему из питающего желоба или конвейера, и предотвратить утечку газа в уплотнение. В промышленной практике при проектировании лопастей согласовывают экономичность конструкции, удобство монтажа внутри цилиндра и эффективность распределения материала.

При прямоточном движении газа и твердого материала лопасти на последних метрах разгрузочного конца аппарата можно не устанавливать. Это уменьшит попадание высушенного продукта в отходящий газ. В противоточной сушилке рассыпание влажного продукта тонким слоем на загрузочном конце может служить эффективным средством очистки отходящего газового потока от сухого материала. Для более однородного распределения твердой фазы некоторые сушилки оборудованы зубчатыми лопастями. Иногда

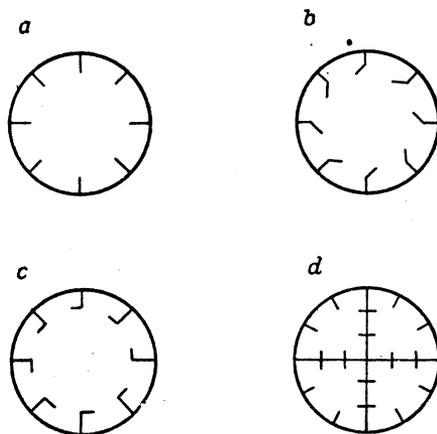


Рис. III-21. Различные внутренние конструктивные элементы вращающихся сушилок с прямым нагревом:

а — радиально расположенные лопасти; б — лопасти с порогом под углом 45°; в — лопасти с порогом под углом 90°; д — перегородки.

используют длинные цепи, прикрепленные к нижней стороне лопастей, чтобы отскабливать и ударами по стенкам цилиндра удалять налипшие куски твердого материала. В обжиговых печах цепи могут в значительной степени способствовать улучшению теплопередачи, однако их применение приводит к удорожанию монтажа аппарата. Налипание твердого материала на лопасти и стенки аппарата более эффективно устраняется при установке снаружи корпуса специальных бил (молотков). В сушилках большого поперечного сечения внутренние лопасти или перегородки применяют для увеличения эффективности распределения материала и уменьшения уноса при истирании. Использование внутренних конструктивных элементов часто увеличивает трудность очистки и обслуживания оборудования. Примеры наиболее простых внутренних насадок показаны на рис. III-21. Детали внутреннего устройства противоточной сушилки с прямым нагревом видны из рис. III-22, прямоточной установки — из рис. III-23.

Противоток газа и твердого материала обеспечивает большую эффективность теплопередачи при данной температуре входящего газа. Прямоток часто используют

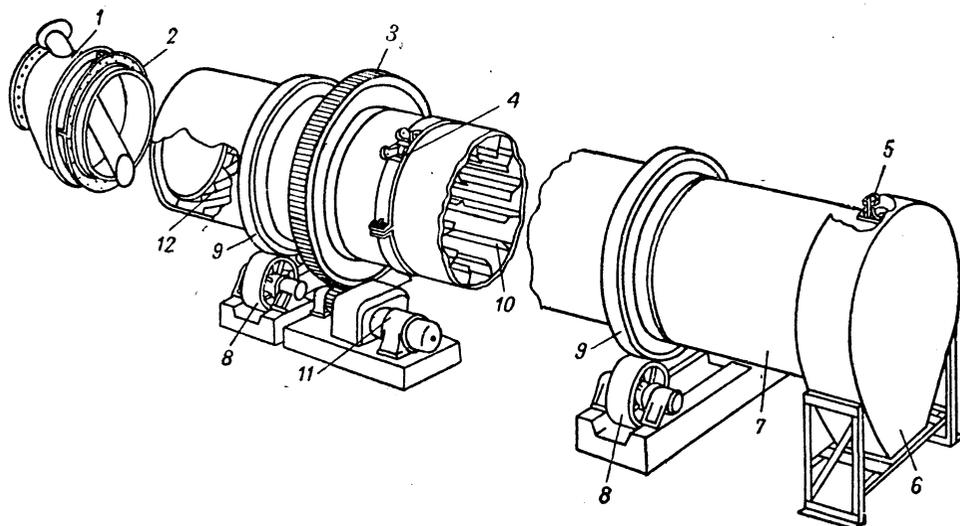


Рис. III-22. Противоточная вращающаяся сушилка с прямым нагревом:

1 — загрузочный конец; 2 — фрикционное уплотнение; 3 — зубчатый венец; 4 — било; 5 — затвор; 6 — разгрузочный конец; 7 — кожух; 8 — роликовые опоры; 9 — бандаж; 10 — подъемные лопасти; 11 — электродвигатель; 12 — спиральные лопасти.

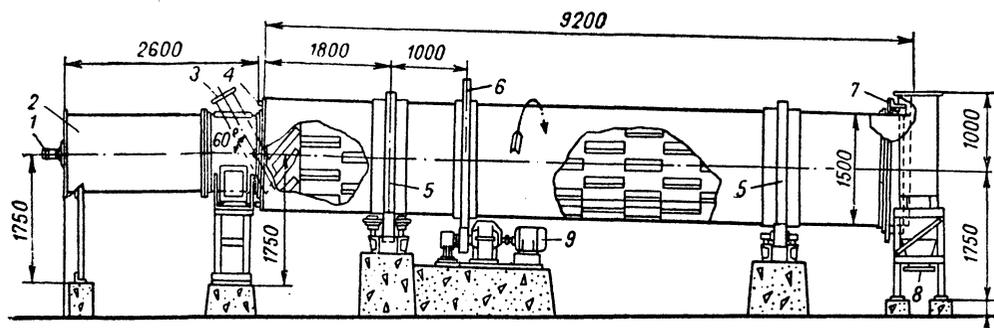


Рис. III-23. Прямоточная вращающаяся сушилка с прямым нагревом:

1 — горелка; 2 — топка; 3 — загрузочный желоб; 4 — уплотнение на входе; 5 — бандаж; 6 — зубчатый венец; 7 — уплотнение на выходе; 8 — разгрузочное отверстие; 9 — электродвигатель.

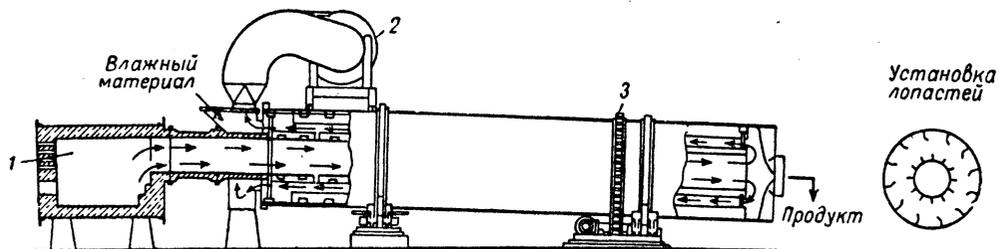


Рис. III-24. Вращающаяся сушилка смешанного типа с двойным кожухом:

1 — топка; 2 — вытяжной вентилятор; 3 — зубчатый венец.

для сушки термочувствительных материалов при более высоких температурах газа-теплоносителя, потому что в этом случае при начальном испарении поверхностной влаги газ быстро охлаждается.

На рис. III-24 изображена сушилка смешанного типа, которая почти всегда применяется при противоточной

ниже атмосферного) препятствует пылению из аппарата в окружающую среду при минимальном подсосе наружного воздуха.

На рис. III-25, *d—f* приведены три основных типа роликовых опорных подшипников, применяемых для всех вращающихся сушилок. В современных сушилках

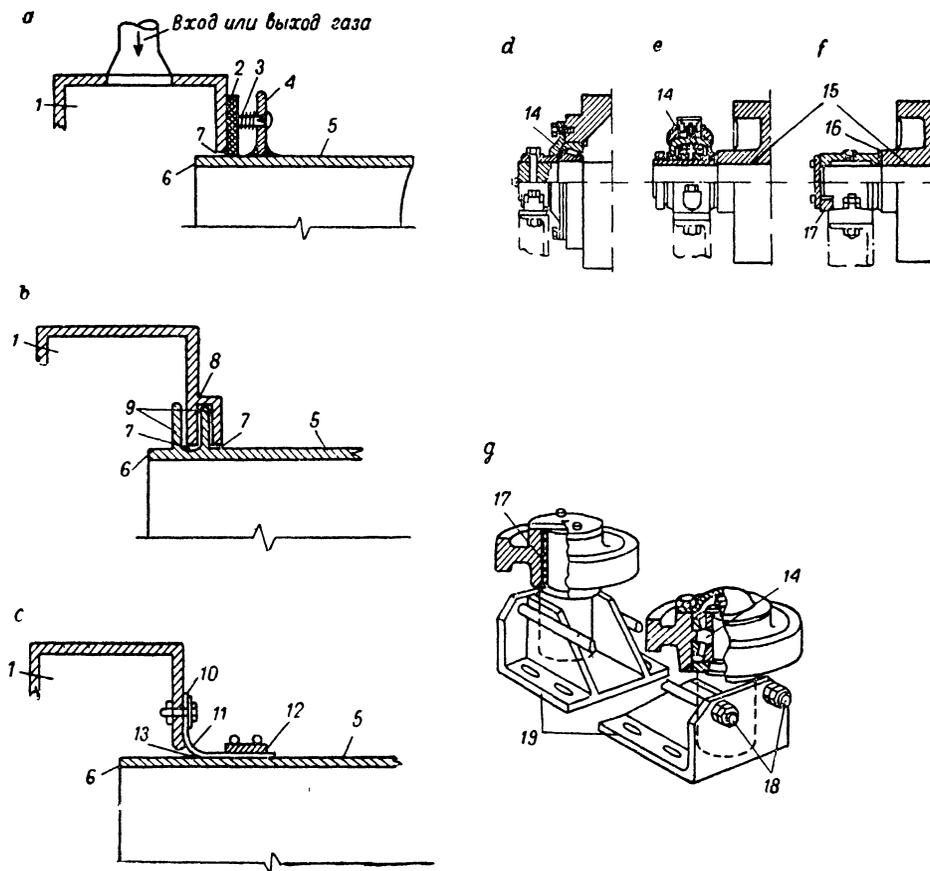


Рис. III-25. Детали устройства барабанной сушилки:

уплотнения: *a* — фрикционного типа (смазываемые или сухие); *b* — лабиринтного типа (трущиеся поверхности отсутствуют); *c* — гибкое; цапфы роликовых подшипников: *d* — с закрепленным валом; *e* — антифрикционный блок с втулкой; *f* — блок с угловым вкладышем; *g* — опорные ролики. 1 — загрузочная или разгрузочная камера; 2 — фрикционный материал; 3 — зазор; 4 — кольцо, приваренное к цилиндру; 5 — вращающийся цилиндр; 6 — конец цилиндра; 7 — пружина; 8 — неподвижные элементы; 9 — вращающиеся элементы; 10 — крепление ткани к корпусу камеры; 11 — ткань или подобный гибкий материал; 12 — металлическое плотно натянутое кольцо для создания уплотнения при трении между тканью и вращающимся цилиндром; 13 — поверхность трения; 14 — роликовый подшипник; 15 — запрессовка; 16 — опорная шайба; 17 — вкладыш; 18 — тяги, 19 — вал опорного ролика и сварные крепления.

сушке с прямым нагревом, так как при этом может быть достигнут наиболее высокий термический к. п. д. Сушка термочувствительных материалов в таких аппаратах не рекомендуется вследствие того, что горячая поверхность внутреннего цилиндра может вызвать перегрев продукта.

Три типа обычных газовых уплотнений показаны на рис. III-25, *a—c*. На вращающихся сушилках с прямым нагревом только немногие газовые уплотнения предназначены для обеспечения полной газовой непроницаемости, но тщательное регулирование внутреннего давления (обычно в пределах от 0,25 до 2,5 мм вод. ст.

наиболее часто используют антифрикционные опорные подшипники. Однако если нагрузка требует подшипников с диаметром вала цапфы больше 125—150 мм, то применяют антифрикционные подшипники с закрепленным валом; они значительно дешевле крупных опорных подшипников, причем полностью герметизованы и непрерывно находятся в смазке. Опорные подшипники с вкладышами применяют реже. Установка опорных роликов изображена на рис. III-25, *g*.

Газы движутся через вращающиеся аппараты с помощью вытяжного вентилятора или комбинации вытяжного вентилятора и воздуходувки. В последнем случае

возможно очень точное регулирование внутреннего давления даже в том случае, когда общее гидравлическое сопротивление системы высоко. Если применяется calorifer с низким гидравлическим сопротивлением, то обычно достаточно одного вытяжного вентилятора, так как основные потери давления газа происходят в вытяжной системе и коллекторах пылеочистительных устройств. Использование только одной воздухоудвки для нагнетания воздуха в цилиндр встречается в практике сушики редко, потому что внутреннее давление при этом выше атмосферного и запыленный горячий воздух будет проникать через уплотнения в окружающую среду.

Методы расчета. Теплопередача во вращающейся сушилке с прямым нагревом лучше всего описывается следующим уравнением:

$$Q_{\text{общ}} = K_V V \Delta t_{\text{ср}} \quad (\text{III-3})$$

где $Q_{\text{общ}}$ — общее количество переданного тепла, *вт*; K_V — объемный коэффициент теплопередачи, *вт/(м³·град)*; V — объем сушилки, *м³*; $\Delta t_{\text{ср}}$ — средняя разность температур между горячим газом и материалом, *град*.

Когда большое количество поверхностной влаги удаляется из высушиваемого материала и температура твердой фазы неизвестна, хорошим приближением к величине $\Delta t_{\text{ср}}$ будет средняя логарифмическая разность между психрометрическими разностями сушильного агента (воздуха) на входе и выходе из сушилки.

Данные для расчета значений K_V приведены в одной из работ Фризмана и Маршалла.¹ Они показали, что величина K_V является сложной функцией скорости подачи высушиваемого материала, скорости воздуха и физических свойств материала, однако для расчета все еще используется уравнение:

$$K_V = \frac{140G^{0,16}}{D} \quad (\text{III-4})$$

где G — массовая скорость воздуха, *кг/(м²·сек)*; D — диаметр сушилки, *м*.

Уравнение (III-4) было выведено на основе данных, полученных при испытании небольшой сушилки, и его применимость к расчету сушилок диаметром >0,3 или 0,6 м сомнительна.

Характеристика прямоточных вращающихся сушилок с прямым нагревом теплым воздухом приведена в табл. III-8. Анализ показывает, что значения K_V изменяются от 240 *ккал/(м³·ч·град)*, или 280 *вт/(м³·град)*, в установке диаметром 1,2 м до 110 *ккал/(м³·ч·град)*, или 130 *вт/(м³·град)*, в установке диаметром 3 м. Подстановка этих данных в уравнение (III-4) приводит к увеличению константы от 140 до 280 и даже до 350. Уравнение для сушилок промышленных размеров диаметром от 1 до 3 м, работающих с заполнением 5—15% от общего объема вращающегося цилиндра, имеет следующий вид:

$$K_V = \frac{280G^{0,16}}{D} \quad (\text{III-5})$$

В большинстве случаев размеры барабанных сушилок с прямым нагревом определяются на основании опытных данных, однако изложенный выше метод вполне пригоден для приближенного расчета. Другие

уравнения для расчета коэффициента теплопередачи во вращающейся сушилке опубликованы Миллером¹ и Спаном².

Если характеристики материала не лимитируют температуру газа, то температура на входе в сушилку обычно связана с применяемым сушильным агентом и равна для пара 120—180°С, а для дымовых газов 540—820°С. Температура отходящего газа в значительной степени зависит от экономических соображений. Ее значение может быть найдено следующим образом:

$$N_r = \frac{t_1 - t_2}{\Delta t_{\text{ср}}} \quad (\text{III-6})$$

где N_r — число единиц переноса (тепловых), рассчитанное по газу; t_1 — температура газа на входе, °С; t_2 — температура отходящего газа с учетом потерь тепла, °С; $\Delta t_{\text{ср}}$ — средняя разность температур, определяемая по уравнению (III-3), *град*.

Эмпирически найдено, что вращающиеся сушилки наиболее экономичны в пределах изменения N_r от 1,5 до 2,5.

Отношение длины сушилки к его диаметру (L/D) на основе промышленной практики наиболее эффективно в пределах от 4 до 10. Если расчетная длина аппарата не попадает в эти пределы, то должно быть вычислено другое значение N_r , для которого подойдут такие значения L/D .

Вращающиеся сушилки обычно действуют при заполнении материалом объема цилиндра на 5—15%. Более низкое заполнение недостаточно для того, чтобы целиком использовать подъемные лопасти, а более высокое создает возможность коротких циркуляций высушиваемого материала в верхней части слоя. При нормальной степени заполнения твердый материал задерживается в сушилке обычно достаточно долго и внутренняя влага полностью удаляется. Влияние степени заполнения на время пребывания материала и равномерность сушики во вращающихся аппаратах изучали Мискелл и Маршалл³.

Время пребывания определяется по скорости подачи высушиваемого материала. Его можно найти, если задержка и скорость питания могут быть измерены. Задержку всегда очень неудобно замерять на больших сушильных установках, однако в период остановки сушилка может быть разгружена и содержимое ее взвешено. Иногда пользуются другими методами. Один из них заключается в том, что к высушиваемому материалу добавляется некоторое количество (~1 кг) инертного, легко обнаруживаемого твердого материала или радиоизотопа и затем проводится анализ выгружаемого продукта. Время, требующееся для обнаружения максимальной концентрации метящего вещества, соответствует среднему времени пребывания материала в сушилке.

Время пребывания τ (в мин) во вращающейся сушилке можно определить приблизительно по следующей зависимости:

$$\tau = \frac{0,23L}{sn^{0,9}D} \pm \frac{1,97BLG}{F} \quad (\text{III-7})$$

где L — длина сушилки, *м*; s — наклон цилиндра, *м/м*; n — число оборотов цилиндра, *об/мин*; D — диаметр

¹ Miller, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 38, 841 (1942).

² Saeman, Chem. Eng. Progr., 50, 467 (1956).

³ Miskell, Marshall, Chem. Eng. Progr., 52, 1 (1956).

⁴ Friedman, Marshall, Chem. Eng. Progr., 45, 482, 573 (1949).

¹ Friedman, Marshall, Chem. Eng. Progr., 45, 482, 573 (1949).

ТАБЛИЦА III-8

Характеристика и стоимость прямооточных вращающихся сушилок с прямым нагревом теплым воздухом¹

Общие условия

Высушиваемый материал — термочувствительный, твердый

Влажность материала, %:

начальная (при 27° С) 25
 конечная (при 66° С) 0,3

Температура воздуха, °С:

начальная 166
 конечная 71

Скорость воздуха, м/сек ~1

Допустимое гидравлическое сопротивление в системе, мм вод. ст. 200

	Размеры (D×L)						
	1,2×7,6	1,4×7,6	1,5×9,2	1,8×10,7	2,1×12,2	2,4×13,7	3,0×16,8
Скорость испарения, кг/ч	136	180	227	318	410	545	860
Расход:							
воздуха, м ³ /сек . .	1,6	1,29	1,66	2,41	3,3	4,31	6,64
пара (при давлении 10 ат), кг/ч .	316	406	520	725	1 000	1 310	2 040
энергии, квт	100	128	158	229	310	405	630
Производительность по высушенному продукту, кг/ч	408	520	635	950	1 270	1 630	2 580
Мощность, квт:							
вытяжного вентилятора	3,68	5,52	5,52	7,36	11,1	18,5	22,2
электродвигателя сушилки	2,22	3,68	5,52	7,36	14,7	18,5	26,8
Число оборотов цилиндра, об/мин	5,5	5	4,5	4	3,5	3	2,5
Масса аппарата, кг . .	7 650	10 900	14 500	19 100	35 800	40 000	59 500
Стоимость установки (1960 г.) ² , тыс. долл.	15,5	17	18	23	37	44	56

¹ По данным General American Transportation Corp.² В стоимости установки учтены воздушные ребристые калориферы, переходные коммуникации, сушилка, электродвигатель, сборник продукта, вытяжной канал и вентилятор. Данные приведены для конструкции из углеродистой стали, включая кожух сушилки, бандажи, привод, уплотнения и питательный конвейер. При изготовлении из нержавеющей стали стоимость установки увеличивается в 1,7 раза.

сушилки, m ; $B=5(D_c)^{-0,5}$ — константа, зависящая от природы материала; D_c — средний размер частицы обрабатываемого материала, mm ; G — массовая скорость воздуха, $kg/(m^2 \cdot сек)$; F — скорость подачи высушиваемого материала, $kg/(m^2 \cdot сек)$. Знак плюс в уравнении (III-7) соответствует противотоку, знак минус — прямооточу.

Количество пыли, образующейся во время сушки, зависит от характера высушиваемого материала, используемой скорости воздуха, времени пребывания его в сушилке, количества лопастей, скорости вращения цилиндра и конструкции затвора на конце сушилки. Точно предсказать его можно только по опытным данным. При массовой скорости воздуха $4880 kg/(m^2 \cdot ч)$ обычно можно с уверенностью применять для сушки материал с размерами частиц $0,4 mm$. Сведения о пылеобразовании некоторых материалов во вращающейся сушилке

с диаметром $0,3$ и длиной $1,8 m$ имеются в литературе¹.

Вращающиеся сушилки работают при окружных скоростях от 9 до $30 m/мин$. Наклон цилиндра варьируется от 0 до $85 mm/m$. В некоторых случаях прямотока могут применяться отрицательные наклоны. Высота радиально расположенных лопастей внутри сушилки с прямым нагревом составляет $1/12$ — $1/8$ диаметра аппарата. Количество лопастей находится в пределах от $6,5D$ до $13D$ (где D — диаметр, m).

Характеристика и стоимость. Стоимость установок, в состав которых входят вращающиеся сушилки с прямым нагревом, использующие в качестве сушильного агента нагретый паром воздух, приведена в табл. III-8.

¹ Friedman, Marshall. Chem. Eng Progr., 45, 482, 573 (1949).

Для проведения высокотемпературных процессов сушилки необходимо обеспечить топочными камерами и горелками. В этом случае стоимость оборудования увеличивается на 4—8 тыс. долл. Общая установочная стоимость вращающихся сушилок (включая приборы, вспомогательное оборудование, помещение и т. д.) на 150—300% больше обычной закупочной цены. Годовые затраты на обслуживание и ремонт составляют 5—10% общей установочной стоимости. Необходимо также учитывать стоимость энергии и горючего.

Общий расход мощности на вентиляторы, вращение цилиндра, питание и выгрузку продукта (в кВт) составляет от $4D^2$ до $7D^2$ (где D — диаметр сушилки, м). Термический к. п. д. вращающейся сушилки с прямым высокотемпературным нагревом находится в пределах 55—75%, а с использованием в качестве теплоносителя нагретого паром воздуха 30—55%.

Вращающиеся обжиговые печи с прямым нагревом

Для проведения высокотемпературных процессов в системе газ — твердое вещество широко используют вращающуюся обжиговую печь с прямым нагревом. Она заменяет обычную вращающуюся сушилку, когда температура стенки превышает температуру, которую может выдержать незащищенный металл кожуха (370—430°С для углеродистой стали). Корпус такой печи частично или по всей длине футеруют огнеупорным кирпичом, чтобы предотвратить перегрев стали и, как результат этого, снижение ее прочности. Иногда применяют два слоя футеровки, причем слой, расположенный ближе к корпусу, кладут из изоляционного кирпича. С наружной стороны барабана изоляция наносится редко. Когда влажный исходный материал соприкасается с футеровкой обжиговой печи на холодном конце, может произойти утечка жидкости через футеровку к металлическому корпусу, что приводит к его повреждению, если жидкость агрессивна.

Питание вводится через верхний конец обжиговой печи различными способами: по наклонным желобам, нависающим шнекам, сливным трубам и т. д. Иногда внутри обжиговой печи устанавливают кольцевые перемычки или заслонки из огнеупорного материала, служащие для того, чтобы создать слой материала большей толщины в одном или нескольких местах аппарата и таким образом изменить характер потока. Горячий продукт выгружается из нижнего конца печи на конвейеры, в охлаждающие емкости или в такие устройства, в которых выделяемое тепло при необходимости может быть регенерировано. К этим охлаждающим и регенерирующим тепло устройствам относятся, например, вращающиеся наклонные цилиндры, виброгрохоты и наклонные медленно движущиеся грохоты.

В некоторых вращающихся обжиговых печах диаметр меняется по длине 2 или 3 раза, что позволяет увеличить емкость печи, уменьшить расход горючего и улучшить качество продукта. Два типа обжиговых печей изображены на рис. III-26.

Современные вращающиеся обжиговые печи представляют собой полностью сварные конструкции. Бандажи и опорные ролики чаще всего изготавливают из ковanej или литой стали. Зубчатый венец имеет простую геликоидальную или цилиндрическую (прямозубую) резьбу; смазка резьбы обычно осуществляется автоматически. Отдельные электродвигатели достигают мощности ~150 кВт.

Наклон обжиговых печей в зависимости от проводимого в них процесса находится в пределах от 20 до

60 мм/м. Скорость вращения печи также различна (для пигмента двуокиси титана 0,9 м/мин, для цемента 13,7 м/мин, а для фосфатов 38 м/мин).

Топочные камеры обычно имеют втяжную переднюю стенку, большие боковые дверцы и могут перемещаться на колесках. Используемые для рекуперации тепла котлы-утилизаторы могут иметь различную конструкцию. Характерными конструктивными особенностями отличается охлаждаемый воздухом разгрузочный конец печей для обжига цемента, доломита и магнезии.

Для введения в печь собранной пыли или, в некоторых случаях, компонентов исходной смеси в какой-либо одной или нескольких промежуточных точках корпуса применяется специальная система. Отверстия в корпусе, удаленные от горячей зоны, могут служить также для введения в печь воздуха, необходимого для горения; в восстановительных обжиговых печах они используются для сжигания окиси углерода и выделяющихся из обрабатываемых материалов летучих веществ.

Сжигание топлива может производиться на том или другом конце печи, в зависимости от того, как должны двигаться газ и твердая фаза — прямооток или противоток. Иногда смешивают твердое топливо с загруженным материалом и сжигают смесь при движении вдоль печи. Горелка может быть установлена непосредственно на выходном конце корпуса, и тогда горение будет происходить внутри печи. В этом случае разгрузочная камера обычно представляет собой неподвижный или подвижный кожух, через который в печь входит труба, подающая топливо. Если пламя не достает до обрабатываемого материала, трубу устанавливают по центру выходного конца корпуса печи; иногда предпочитают удаленное от центра положение (около лотка), между уровнем загрузки и наклонной футеровкой печи. Печь и топочная камера (камера горения) обычно имеют открытые концы, каждый из которых совпадает с затором, закрытым скользящим затвором (рис. III-27). Иногда в сушилках и обжиговых печах предусматривается специальная камера для ввода вторично используемого воздуха (рис. III-28).

Чтобы избежать загрязнения атмосферы, отходящие газы обычно направляют на пыле- и дымоочистку. В качестве оборудования для газоочистки используют циклоны, пылесадительные камеры, скрубберы и электрофильтры. Если извлеченная пыль — ценный материал, ее снова вводят в печь. Применяют также приспособления для регенерации тепла на входе и на выходе из печи, в результате чего производительность аппарата увеличивается (или уменьшается расход топлива). Для этой цели используют котлы-утилизаторы, грохоты, системы змеевиков и цепи.

Загрузочный конец вращающейся обжиговой печи частично закрыт кольцевобразной загрузочной камерой, которая задерживает обратный поток твердой фазы. На разгрузочном конце делают кольцевую перегородку. При низких температурах используют сегментные кольца из сплавов железа. Для высокотемпературных процессов или применяют сегментные стальные кольца, или на концах печи организуют воздушное охлаждение (в последнем случае срок службы печи увеличивается).

Существенное значение для регулирования и экономичности обжиговых печей имеет их герметичность по отношению к наружному воздуху. Уплотнения (воздушные затворы) уменьшают подсос воздуха, а некоторые конструкции полностью препятствуют проникновению наружного воздуха в аппарат. Простейшее

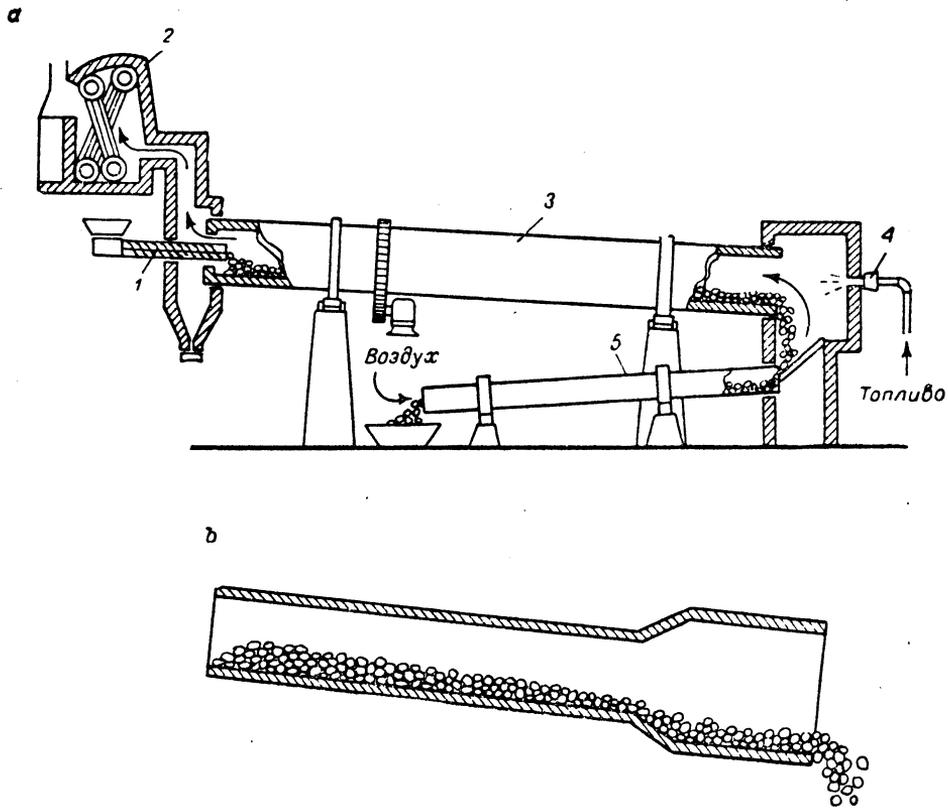


Рис. III-26. Вращающиеся обжиговые печи:
 а — печь с постоянным диаметром цилиндра; б — цилиндр с переменным диаметром,
 1 — питатель; 2 — котел-утилизатор; 3 — печь; 4 — горелка; 5 — охладитель.

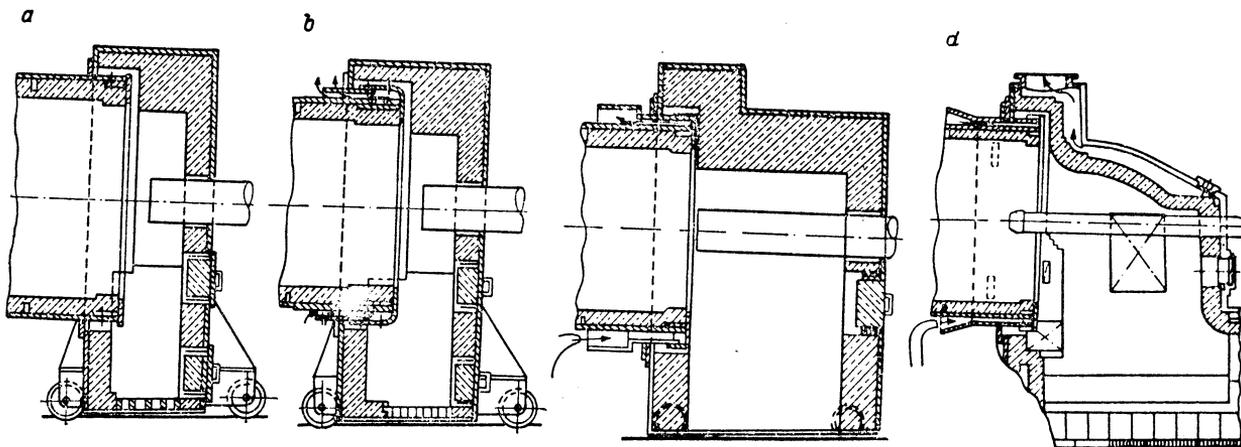


Рис. III-27. Топочные камеры обжиговых печей:
 а — простая топочная камера; б — высокотемпературная топка; в — топка с увеличенным подводом воздуха для горения; д — топка с охлаждением.

воздушное уплотнение представляет собой плавающее кольцо Т-образного сечения, смонтированное на специальной прокладке вокруг загрузочного конца печи, который свободно вдвигается в пространство кожуха печи. Тонкая часть Т-образного кольца входит внутрь пластин запорного кольца. На рис. III-29 показаны

Ускоренная сушка шламов (суспензий) на загрузочном конце вращающихся обжиговых печей, работающих с мокрым циклом, достигается с помощью установки внутри аппарата висящих цепей (рис. III-30). Направляющие спирали поддерживают подвешенные цепи, которые расположены таким образом, что спо-

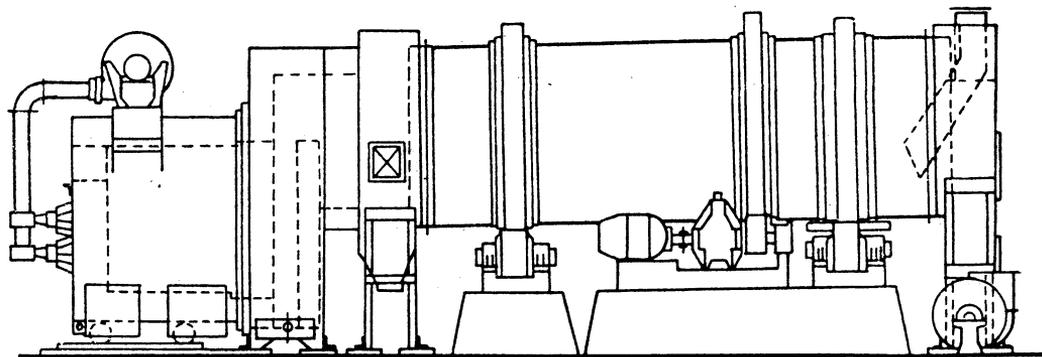


Рис. III-28. Сушилка с топкой и камерой для охлаждения воздуха.

два типа воздушных затворов. Уплотнение плавающего типа на разгрузочном конце состоит из кругового барьера, который держится на поверхности трущейся прокладки и может передвигаться, обеспечивая необ-

соствуют наиболее эффективной сушке. Шлам нагревается тремя способами: прямым соприкосновением с цепями, подвешенными в токе горячих газов, при рассеивании материала по пути их движения и направлением потока горячих газов над слоем шлама, находящегося в промежутках под висящими цепями. При использовании цепей материал часто образует неправильной формы и различных размеров гранулы, которые движутся дальше по печи, улучшая теплопередачу и уменьшая потери за счет уноса пыли.

Методы расчета. Во вращающихся печах материал не распределяется в потоке воздуха, а удерживается в нижней части цилиндра. Взаимодействие газовой и твердой фаз менее эффективно, чем в установках с внутренней насадкой (лопастями). Теплоотдача происходит за счет конвекции из потока газа к футеровке печи и поверхности слоя материала, а также излучением от футеровки вглубь слоя. Для установок, оборудованных отдельной топочной камерой, можно допустить, что при высоких температурах сопротивление теплопередаче конвекцией от газа к футеровке является определяющим и в любой точке слоя температура приближается к температуре стенки. Следовательно, действительная поверхность теплопередачи представляет собой внутреннюю поверхность печи. Для обжиговых печей, работающих в этих условиях, рекомендуется следующая эмпирическая зависимость для определения коэффициента теплопередачи при конвекции (от газа к футеровке):

$$K = 23,8G^{0,67} \quad (\text{III-8})$$

где K — коэффициент теплопередачи, $\text{вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; G — массовая скорость потока воздуха, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})$.

Уравнение (III-8) не учитывает излучения газа при высокой температуре, когда загруженный в печь материал «видит» пламя горелок; следовательно, этот метод расчета K неточен. Анализ теплопередачи во вращающихся обжиговых печах с прямым нагревом дан Джильтбертом¹. Если печь имеет внутренний на-

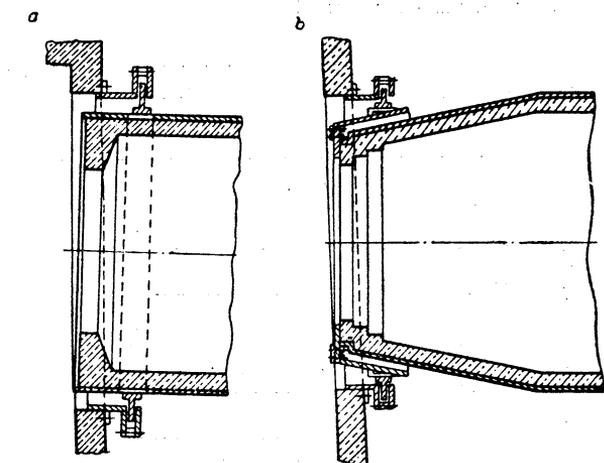


Рис. III-29. Уплотнения обжиговых печей:

a — простое воздушное уплотнение плавающего типа для загрузочного конца печи; *b* — уплотнение плавающего типа для суживающегося загрузочного конца печи с воздушным охлаждением.

ходящее пространство между воздушным затвором и топкой. Плавающее кольцо и закрепленные части этих уплотнений могут снабжаться сменными трущимися поверхностями. Количество просачивающегося через уплотнения воздуха обычно меньше 10%¹. Для дополнительного уменьшения подсоса воздуха применяют специальные уплотнения плавающего типа с подпором инертным газом или дымовыми газами.

¹ По данным Allis-Chalmers Manufacturing Co.

¹ Gilbert, Cement, 5, 417 (1932); 6, 79, 189, 262, 327, 369 (1933); 7, 123 (1934).

грев (пламенем), то главным источником теплопередачи является излучение пламени и горячих газов. Тепло передается непосредственно поверхности твердого материала и стенке, а от последней — продукту (вторичным излучением и частично теплопроводностью).

Обычно при загрузке сухим материалом в обжиговой печи имеются три зоны нагрева, а при загрузке влажным материалом — четыре:

ных по обжиговым печам с неизменяющимся по длине диаметром:

$$G_{\text{п}} = kLD^2/3 \quad (\text{III-9})$$

где $G_{\text{п}}$ — производительность печи, τ продукта/сутки; L — длина печи, м; D — диаметр печи, м; k — коэффициент, зависящий от свойств загруженного материала и других переменных.

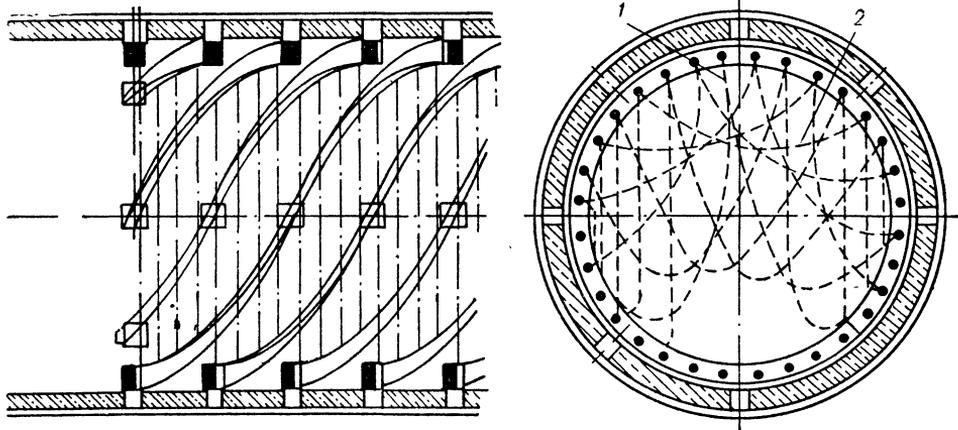


Рис. III-30. Установка цепей в обжиговой печи (запатентовано Allis-Chalmers Manufacturing Co.):

1 — цепь, подвешенная под углом 135°; 2 — цепь, подвешенная под углом 90°.

- 1) зона сушки — влага из материала удаляется на загрузочном конце;
- 2) зона нагрева — загруженный материал нагревается до температуры реакции, т. е. до температуры разложения известняка или температуры «обжига» цемента;
- 3) реакционная зона — загруженный материал обжигается, разлагается, восстанавливается, окисляется и т. д.;
- 4) зона выдержки — обработанный материал перегревается или «выдерживается» при определенной температуре (или, если необходимо, охлаждается) перед выгрузкой.

Скорость теплопередачи в каждой зоне различна.

Метод анализа теплопередачи в цементных печах, описанный Джилбертом, может быть использован для оценки характеристик печей, используемых для обжига других материалов, с достаточно удовлетворительными результатами.

Во вращающихся обжиговых печах температура процесса изменяется по длине аппарата. Изменение температур газа и загруженного материала в печи для обжига цемента (с мокрым циклом) показано графически на рис. III-31. Максимальная температура загрузки находится в пределах 1430—1540°С, а газа — в пределах 1540—1650°С. Общая тепловая нагрузка, рассчитанная на полный объем печи, составляет 25 800—61 500 $\text{вт}/\text{м}^3$, или 22 000—53 000 $\text{ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$.

Существует несколько методов сокращенной оценки производительности печей, но все они имеют ограниченное применение. Гиббс¹ предложил следующее уравнение, выведенное на основе промышленных дан-

Уравнение (III-9) связано с исследованием работы печей для обжига доломита, характеристика которых

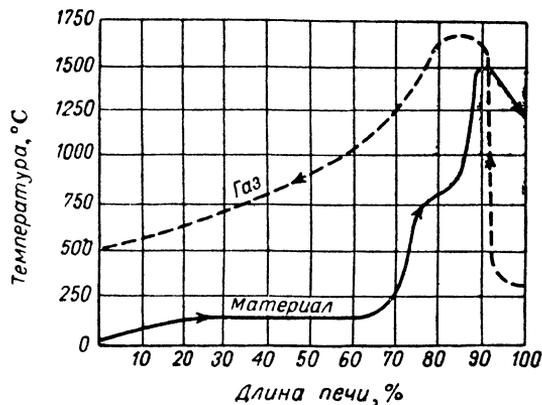


Рис. III-31. Изменение температуры во вращающейся печи для обжига цемента (с мокрым циклом).

дана в табл. III-9. Печь наибольшего размера предназначена для обработки более липкого материала, имеющего склонность покрывать стенки печи и уменьшающего, таким образом, ее емкость. Значения в круглых скобках относятся к печам, работающим при оптимальных условиях. Из этих данных следует, что объем печи, необходимый для выработки 1 т

¹ Gibbs, Rock. Prods., 45 (11), 58 (1942).

Характеристика вращающихся обжиговых печей¹

Размеры (D×L), м	Число опор	Мощность электродвигателя, кВт	Номинальная суточная производительность ³			
			портланд-цемент, т		известковый шлам, т (нетто)	известняк, т (нетто)
			сухой цикл	мокрый цикл		
1,5×24	2	3,7—5,5	24	17	10	16
1,8×21	2	5,5—11	32,4	23	15	24
2,1×21	2	11—14,7	47	34	20	35
1,65×55	4	11—14,7	47,5	42,5	30	45
2,1×36	2	11—18,5	80	58	35	55
2,25×37,5	2	14,7—22	98	70	40	70
1,8×66	4	14,7—22	71,5	64	45	65
2,4×42,5	2	18,5—22	127	92	55	90
2,7×48,5	2	22—37	187	136	80	130
2,55×56,5	2	22—37	192	138	80	135
3,0×45	4	29,4—55	221	162	—	145
3,0×53	2	37—55	255	187	—	155
2,4×91	5	37—55	196	170	110	160
2,25×2,55×97	5	37—55	200	174	115	165
2,25×3,0×2,55×91	5	37—55	200	174	—	—
3,0×3,3×53	2	37—55	280	205	120	180
3,15×56,5	2	37—55	306	220	130	190
3,3×53	2	44—73,6	315	234	—	205
2,55×3,0×2,55×91	5	37—55	238	200	—	—
2,4×3,0×91	5	37—55	244	210	140	200
2,85×81	4	44—73,6	256	220	150	215
2,7×3,15×2,7×100	5	44—73,6	290	256	—	—
3,15×76	4	44—73,6	298	260	175	240
2,85×3,3×2,85×91	5	44—73,6	306	264	—	—
3,0×91	5	55—92	320	280	190	250
2,85×3,3×2,85×114	6	55—92	345	306	—	—
3,3×91	5	55—92	410	357	225	300
3,45×91	4	73,6—110	440	380	240	320
3,15×114	5	73,6—110	460	410	250	325
3,4×110	5	92—130	495	425	275	350
3,45×145	7	110—185	680	595	375	450
3,6×150	8	147—220	780	680	425	500

¹ По данным Allis-Chalmers Manufacturing Co.² Потребляемая мощность различается в зависимости от размеров печи, обрабатываемого материала и метода проведения процесса.³ Здесь приведена наименьшая производительность применительно к нормальному процессу (на уровне моря). Поправки вносятся на высоту над уровнем моря и для различных методов ведения процесса.

8. Двоокись титана TiO₂ получают из ильменита, смешением руды с углем и нагреванием смеси во вращающихся обжиговых печах. Вращающиеся печи используют также в процессе извлечения двоукиси титана из осадка гидратированного титана при ~995°С.

9. При получении гранул для покрытий (облицовки) дробленый кварц или песок с частицами определенного размера подвергают действию различных веществ (буры, кальцинированной соды и т. д.) и прокаливают

обоженного доломита в сутки, находится в пределах от 2 до 3 м³.

ТАБЛИЦА III-9

Характеристика печей для обжига доломита

Размеры			Средняя производительность, т/сутки	Вторичный воздух	Отношение объема к производительности, м ³ /т(сутки)	Значение k в уравнении (III-9) ²
D, м	L, м	V, м ³				
1,8	33,4	88	30 (40)	Горячий	2,93 (2,2)	0,76
2,1	35,0	125	60	»	2,08	1,06
2,4	38,0	178	90	»	1,97	1,12
2,4	38,0	178	80—см ¹	Холодный	2,22	1,00
2,7	76,0	450	210 (230)	Горячий	2,15 (1,96)	1,04

¹ Отмечена разница в производительности одной и той же печи в зависимости от применения горячего или холодного вторичного воздуха.

² Среднее значение k=1,0, значение k при оптимальных условиях равно 1,15.

В других работах Гиббса¹ дана модификация уравнения (III-9), приведены графики, с помощью которых можно определить влияние различных факторов на производительность обжиговых установок, и описаны печи для обжига сухой и влажной известки. Характеристика вращающихся печей для обжига известки приводится также Эзбом². Кроме того, в литературе можно найти описание печей для известкового шлама³. Некоторые данные из промышленной практики обжига цемента и известки приведены в табл. III-10.

Ниже перечислены некоторые другие наиболее важные случаи применения вращающихся обжиговых печей.

1. Вращающиеся печи можно использовать для окисления и удаления серы и мышьяка из различных руд, содержащих золото, серебро, железо и т. д., при различных температурах (от 540 до 1370°С).

2. Серебряные руды успешно хлорируются при обжиге во вращающихся печах (температура 760—820°С).

3. Сульфид бария BaS получают при обжиге смеси барита BaSO₄ и угля при температуре ~1100°С в непрерывнодействующих вращающихся обжиговых печах.

4. Смесь кварца, полевого шпата и сподумена (трифана) прокаливают при 1200°С для получения литий-алюмосиликата.

5. Вермикулит (слоистый материал типа слюды) прокаливают для приобретения им способности расслаиваться. В дальнейшем его можно использовать в качестве изоляционного материала.

6. Процесс восстановления свойств фуллеровой и диатомовой земель проводится при температуре 540—760°С (для других земель температуры прокаливания могут быть более низкими).

7. Окисленные цинковые руды прокаливают для удаления кристаллизационной воды и двоукиси углерода. Сульфидные руды всегда подвергают обжигу перед плавлением.

¹ Gibbs, Chem. & Met. Eng., 50 (6), 117 (1943); 53 (4), 99 (1946); 53 (5), 139 (1946).

² Azbe, Rock. Prods., 49 (2), 90; (7), 80; (8), 90 (1946).

³ Paper Trade J., 121 (10), Tappi, Sec. 91 (Sept. 6, 1945); 122 (18) Tappi, Sec. 189 (May 2, 1946).

при температурах 980—1370° С. Для воздействия на окончательную окраску гранул используют окислительное или восстановительное пламя.

10. Окись алюминия Al_2O_3 образуется при прокаливании боксита или гидрата окиси алюминия при температурах 980—1370° С. Для получения окиси алюминия высокой чистоты боксит вываривают в щелочи для удаления загрязнений; в результате получается гидрат окиси алюминия с размером частиц $\sim 0,075$ мм, который затем прокаливают при 1100° С.

11. Хлорид калия KCl подают во вращающуюся обжиговую печь в виде порошка (размер частиц $\sim 0,15$ мм), содержащего 9% воды, и доводят до температуры плавления (775° С).

12. Естественные минералы, например, магнезит $MgCO_3$, брусит $Mg(OH)_2$ и т. д., дробят до заданного размера и прокаливают при температурах от 780 до 1760° С. Гидрат окиси магнезия, извлекаемый из морской воды или соляного рассола, обрабатывают подобным же образом, за исключением того, что в печь вводят шлам.

13. Сульфат натрия-алюминия в настоящее время успешно прокаливают во вращающихся обжиговых печах. В этом процессе лепешку осадка, снятую с фильтра, до ввода в печь разбивают на куски. Прокаливание производят с целью удаления воды (45%) и серной кислоты (3%) при температуре ~ 540 ° С.

14. Для извлечения ртути из киновари руду дробят на куски (до $\sim 12,5$ мм) и подают в обжиговую печь, где она прокаливается при температуре > 540 ° С. Так как ртуть находится в руде в виде сульфида HgS , то сера окисляется до SO_2 , а ртуть испаряется (при 360° С). Газы проходят через охлаждаемые камеры, в которых ртуть конденсируется и отделяется.

15. Вращающиеся обжиговые печи используют в производстве обожженного гипса (plaster of Paris). Температура реакции низка и должна поддерживаться в узких пределах — от 110 до 130° С. Гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ нагревают до удаления $\frac{3}{4}$ кристаллизационной воды для получения обожженного гипса $(CaSO_4)_2 \cdot H_2O$. При некотором перегреве удаляется вся вода и образуется гипсит $CaSO_4$, который не удовлетворяет качествам целевого продукта.

16. Чтобы получить легкое связующее для бетона, глину обжигают во вращающихся печах при температуре 1100—1370° С. Кажущаяся плотность глины уменьшается на 50—75%.

17. Измельченные железные руды частично восстанавливают во вращающихся печах. При этом образуются агломераты, которые затем загружают в доменную печь.

18. Марганцевую руду $MnCO_3$, обжигают при 1260° С для получения Mn_2O_4 . Если имеется окисная руда, но в тонкоизмельченном состоянии, вращающуюся печь используют только для спекания.

19. Для удаления избытка летучих веществ, нефтяной кокс прокаливают при температурах 1200—1300° С. Это очень чувствительный материал, и контролировать температуру процесса затруднительно.

Если необходимо увеличить производительность существующей обжиговой установки, то можно рекомендовать следующие изменения режима ее работы:

- 1) увеличить объем загружаемого в печь материала;
- 2) повысить температуру и количество дымовых газов;
- 3) уменьшить избыток воздуха, необходимого для горения;
- 4) увеличить скорость вращения печи;

5) установить кольцевые переключки в промежуточной и разгрузочной секциях печи;

6) увеличить емкость питателя и разгрузочного механизма;

7) уменьшить начальную влажность обрабатываемого материала;

8) повысить температуру исходного материала;

9) установить цепи, лопасти или другие внутренние элементы на загрузочном конце печи;

10) ввести предварительный подогрев воздуха, необходимого для горения;

11) уменьшить подсос холодного воздуха внутрь горячего конца печи;

12) усилить тягу, увеличив высоту дымовой трубы или использовав поддув;

13) установить приборы для контроля и регулирования печи в условиях максимальной производительности.

Время прохождения материала по вращающейся обжиговой печи τ (в мин), из которого может быть рассчитана задержка, можно определить по уравнению¹:

$$\tau = \frac{0,19L}{nsD} \quad (\text{III-10})$$

где L — длина печи, м; n — число оборотов корпуса, об/мин; s — наклон печи, м/м; D — внутренний диаметр печи, м.

Уравнения для определения τ в случае использования внутренних переключек и разгрузочного порога приведены Байярдом².

Общая мощность, требуемая для приведения во вращение обжиговой печи, может быть рассчитана по следующим формулам³:

для вращающейся обжиговой печи или кальцинатора без внутренней насадки

$$N = 0,736 \cdot 10^{-6} n [136y (\sin B) w + 1,4D_6W + 0,74W] \quad (\text{III-11})$$

для вращающейся сушилки или секции обжиговой печи с лопастями

$$N = 0,736 \cdot 10^{-6} n (34,4Dw + 1,4DW + 0,74W) \quad (\text{III-12})$$

Здесь N — требуемая мощность, кВт; n — число оборотов корпуса, об/мин; y — расстояние между осевой линией печи и центром тяжести слоя материала, м; B — угол естественного откоса материала; W — общая вращающаяся нагрузка (оборудование + материал), кг; w — действительная нагрузка (материал), кг; D_6 — диаметр бандажа, м; D — диаметр корпуса печи, м. При приближенном расчете можно принять $D_6 = (D + 0,6)$ м.

Для вращения печей используют электродвигатели с высоким пусковым моментом и числом оборотов в 1,33 раза большим, чем максимально необходимое при проведении процесса. Для печей с переменным по длине диаметром установочная мощность рассчитывается отдельно для каждого диаметра и затем суммируется. Вспомогательные двигатели должны обеспечивать вращение печи в случае аварии. В этих целях применяют бензиновые двигатели или дизели.

Термический к. п. д. вращающихся обжиговых печей. При определении термического к. п. д. важнейшим фактором является длина печи. Аппараты с высоким отношением длины к диаметру имеют и более высокий к. п. д. Использование цепей в печи и оборудования

¹ US Bur. Mines Tech. Paper, 384, 1927.

² Bayard, Chem. a. Met. Eng., 52 (3), 100—102 (1945).

³ Bartlett—Snow—Pacific Co.

ТАБЛИЦА III-11

Характеристика и примерная стоимость вращающихся обжиговых печей¹

Размеры (D×L), м	Число опорных бандажей	Масса печи (без футеровки), т	Общая стоимость, тыс. долл.	Мощность электродвигателя, кВт	Масса футеровки (опеупорный кирпич толщиной 150 мм), т
2,4×24	2	95	96,35	14,7	59
2,4×42,5	2	140	118,15	22,1	104
2,4×61	3	222	175,3	29,4	149
2,4×91	5	294	219,45	44,2	224
2,7×76	4	326	248,8	44,2	212
2,7×91	5	368	278,1	76,3	254
3,0×30	2	150	122,65	29,4	94,5
3,0×45,5	2	215	168,0	36,8	142
3,0×76	4	358	267,4	55,2	237
3,0×91	5	415	300,35	76,3	284
3,0×107	5	463	331,1	92	331
3,15×53	2	276	215,2	44,2	175
3,15×76	4	409	303,6	55,2	250
3,15×107	5	510	369,6	76,3	350
3,3×48,5	2	278	218,5	44,2	168
3,3×76	4	430	321,5	76,3	262
3,3×91	5	494	368,5	92	314
3,3×107	5	620	446,4	92	367
3,3×122	5	670	477,6	110	420
3,45×48,5	2	300	230,3	55,2	175
3,3×76	4	430	321,5	76,3	262
3,3×91	5	494	368,5	92	314
3,3×107	5	620	446,4	92	367
3,3×122	5	670	477,6	110	420
3,45×48,5	2	300	230,3	55,2	175
3,45×76	4	480	350,9	92	274
3,45×107	5	650	465,3	110	384
3,45×129	6	725	512,8	147	463
3,65×76	4	500	366,5	92	287
3,65×99	5	710	507,5	110	372
3,65×122	5	740	511,7	147	455
3,65×137	6	1020	675,3	147	515
3,95×152	7	1240	819,4	184	915 — см. ³
4,25×122	5	1175	762,2	294	790 — см. ³
5,0×183	7	2370	1467,3	442	1430 — см. ³

¹ По данным Traylor Engineering a. Manufacturing Div., Fuller Co.

² В стоимости учтены двигатели, горелки и приборы без футеровки.

³ Толщина огнеупорного кирпича 230 мм.

для регенерации тепла отходящих газов и обработанного материала существенно увеличивает термический к. п. д. установки. Значения к. п. д. для обжиговых печей находятся в пределах от 45 до >80%. В условиях противотока дымовых газов и загруженного материала внутри печи очень большой длины термический к. п. д. имеет высокое значение. Однако технико-экономические показатели могут быть такими, что при меньших капиталовложениях можно получить такой же к. п. д. в более короткой печи с котлом-утилизатором, обогреваемым горячими газами. Тепло горячего продукта может быть использовано для подогрева воздуха, необходимого для горения.

Сегрегация частиц по размерам. Если скопление твердых частиц, недостаточно однородных по размеру, вращается внутри печи, то вся масса принимает форму полумесяца (рис. III-32). Наиболее мелкие частицы остаются на дне, соприкасаясь с горячей футеровкой. Крупные частицы образуют верхний слой перемешиваемой массы. Открывая кирпичная кладка поглощает тепло из газа и, заняв нижнее положение, отдает его мелким частицам за счет теплопроводности. Тонкие частицы эффективно нагреваются при непосредственной теплопередаче от твердого вещества к твердому. Наиболее крупные частицы нагреваются при прямом излучении газа и футеровки и соответствующим образом обжигаются. Частицы промежуточных размеров при

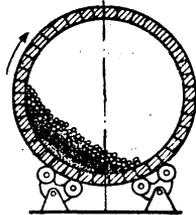


Рис. III-32. Сегрегация частиц по размерам во вращающейся обжиговой печи.

полном обороте печи занимают положение прослойки между слоями наиболее крупных и тонких частиц и защищаются от нагрева благодаря великолепным изолирующим свойствам этих слоев, избегая, по всей вероятности, полного прокаливания. Сегрегация частиц по размерам отсутствует в том случае, когда материал перед загрузкой в печь подвергается классификации или рассева, так что на обработку одновременно подаются только те частицы, размеры которых меняются в узких пределах.

Вращающиеся обжиговые печи обычно работают при заполнении корпуса материалом на 3—12%. Нормальным считается заполнение на 7%.

Стоимость. Характеристика и стоимость (на 1960 г.) типовых установок приведены в табл. III-11. Установочная стоимость может составить 300—500% продажной цены. Расходы на обслуживание составляют в среднем 5—10% в год от общей установочной стоимости.

Вращающиеся паровые трубчатые сушилки с непрямым нагревом

Наиболее простым типом вращающихся сушилок с непрямым нагревом является, вероятно, трубчатая сушилка, обогреваемая паром (рис. III-33). Трубки расположены по всей длине цилиндра, укреплены внутри него одним, двумя или тремя концентрическими рядами и вращаются вместе с корпусом сушилки. Конденсат из трубок может стекать в разгрузочный трубопровод под действием силы тяжести или с помощью байонетного соединения. Трубки с соединениями байонетного типа применяют в тех случаях, когда установка используется как водяной трубчатый холодильник

ник. В случае обработки липкого (слипающегося) материала желательнее устанавливать один ряд трубок внутри сушилки. Иногда трубки экранируют у разгрузочного конца сушилки для того, чтобы предотвратить забивание их высушиваемым материалом. Для улучшения перемешивания в аппарате используют подъемные лопасти.

Влажный материал подают в сушилку по разгрузочному желобу или с помощью шнекового питателя. Разгрузка продукта происходит через периферийные отверстия в корпусе сушилки. Эти отверстия служат также для продувки аппарата воздухом (удаляются

пары влаги или другие выделяющиеся при проведении процесса газы). Практически во всех случаях газ и твердый материал движутся противотоком. Чтобы подержать внутри сушилки определенную толщину слоя материала (обычно при 10—20%-ном заполнении), разгрузочные отверстия снабжают подвижными желобами, вводимыми в сушилку радиально. С помощью этих устройств можно также при необходимости полностью разгрузить сушилку.

Паропроводы для давлений >10 ат изготавливают из чугуна. Для более высоких давлений используют сварную листовую сталь с болтовым креплением. Трубки жестко крепятся к передней стенке пароподводящего устройства (распределительной головки) и поддерживаются на другом конце в специально пригнанной кольцеобразной пластине. Набивку сальника подводящего паропровода обычно изготавливают из асбеста с графитом. Обычные вращающиеся уплотнения подобны

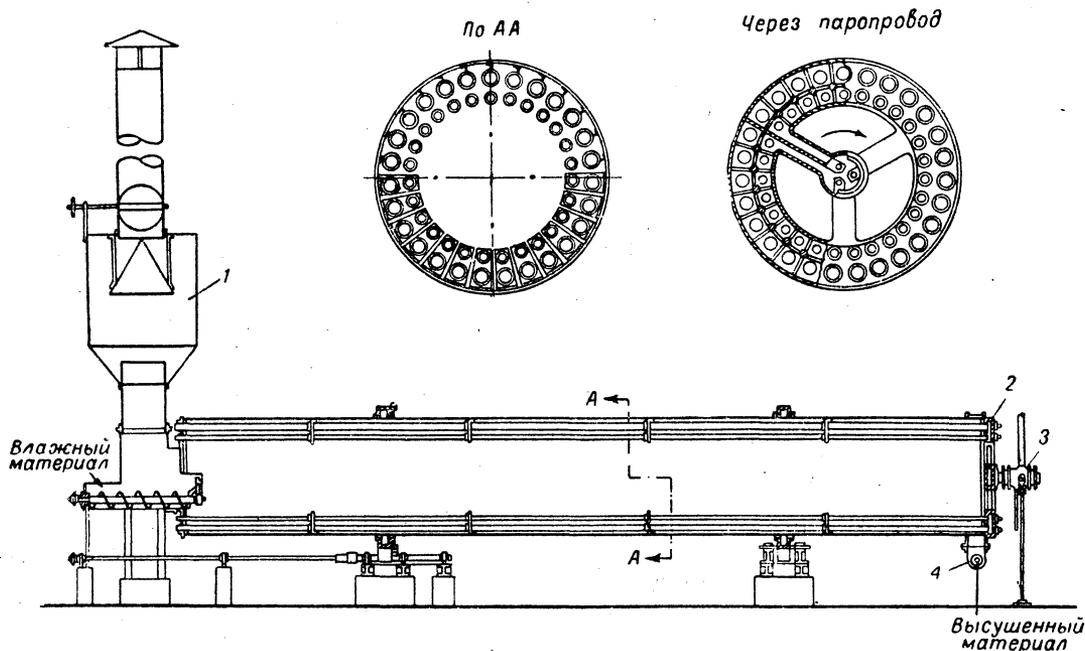


Рис. III-33. Вращающаяся паровая трубчатая сушилка с непрямым нагревом:

1 — пылеотделитель; 2 — распределительная головка; 3 — сальник подводящего паропровода; 4 — разгрузочный конвейер.

Греющий пар поступает в трубки через вращающуюся распределительную головку (рис. III-34) со стороны паропровода. Конденсат непрерывно удаляется самотеком через соединительное устройство в приемник конденсата. Несконденсировавшиеся газы непрерывно выводятся из другого конца труб через воздушные краны типа «Сарко», которые смонтированы на вспомогательном кольцевом паропроводе, вращающемся вместе с корпусом сушилки.

Вторичный пар (испаренная из материала влага) удаляется с загрузочного конца сушилки, проходит пылеосадительную камеру или скруббер и через дымовую трубу с естественной тягой выбрасывается в атмосферу. Если для обычного процесса сушки применяется греющий пар с давлением 3,5—10 ат, то тяга так регулируется шибером, чтобы поступало необходимое количество наружного воздуха для удаления влаги из сушилки; входящий воздух имеет температуру 65—95°С и степень насыщения влагой 80—90%. Таким образом, скорость газа в корпусе и пылеунос минимальны. Когда аппарат используется для регенерации растворителя или других процессов, требующих создания герметичности в системе, поток газа рециркулирует, проходя газовый холодильник (скруббер) и воздухоподогреватель.

изображенным на рис. III-25. Для небольших количеств наружного воздуха в тех случаях, когда сушилка работает при незначительном разрежении, в уплотнениях имеется припуск.

Паровые трубчатые сушилки используют для непрерывного нагревания (охлаждения) гранулированного или порошкообразного твердого материала, который нельзя подвергать действию обычной атмосферы или дымовых газов. Эти аппараты особенно подходят для обработки тонкоизмельченных пылящих материалов, так как, чтобы очистить цилиндр, требуются низкие скорости газа. Из всех вращающихся аппаратов с непрямым нагревом у паровых трубчатых сушилок наиболее низкая стоимость теплопередающей поверхности. Налипание материала на трубки устраняется или уменьшается благодаря использованию рециркуляции, а также применению молотков, ударяющих по корпусу, и других приспособлений, описанных ранее. Одной из основных причин снижения эффективности процессов, проводимых в этих сушилках, является отложение слипающихся твердых частиц на трубках. Такие аппараты пригодны для сушки, рекуперации растворителей и проведения химических реакций. В последнее время паровые трубчатые сушилки нашли широкое применение в производстве кальцинированной соды вместо более

дорогих вращающихся кальцинаторов с прямым нагревом.

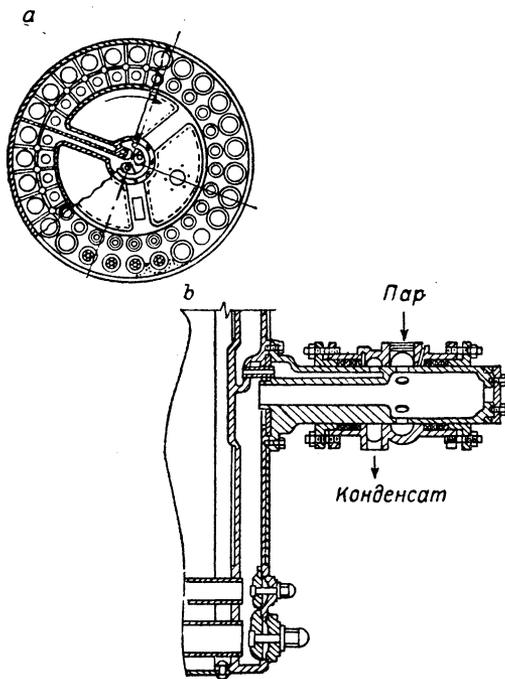


Рис. III-34. Вращающаяся распределительная головка стандартной паровой трубчатой сушилки (запатентовано General American Transportation Corp.):

a — поперечное сечение парового распределительного устройства; *b* — продольное сечение распределительной головки и паропровода.

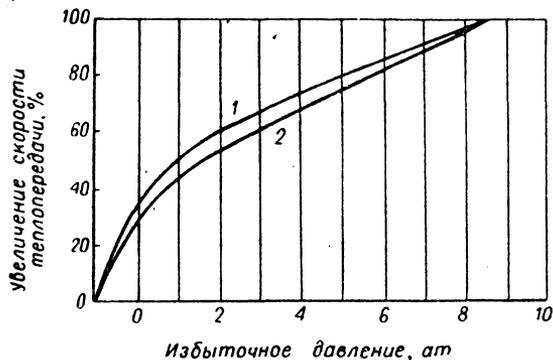


Рис. III-35. Влияние давления пара на увеличение скорости теплопередачи во вращающейся паровой трубчатой сушилке с непрямым нагревом:

1 — древесная мука; 2 — песок.

Специальные конструкции трубчатых сушилок снабжены сальниковыми или бессальниковыми уплотнениями на вращающихся частях и центральным трубопроводом, который проходит через подводящее пар устройство. Этот трубопровод используется для разгрузки

твердой фазы, а также для продувки потока газа, очищающего аппарат. Твердая фаза удаляется из сушилки специальными спирально расположенными лопастями и сбрасывается в разгрузочный конвейер. Такие установки работают под избыточным давлением внутри аппарата (равным ~ 75 мм вод. ст.), недопускающим подсоса воздуха.

Методы расчета. Коэффициенты теплопередачи K в паровых трубчатых сушилках находятся в пределах 25—80 $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, или 30—90 $\text{вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$. Значения K увеличиваются с повышением температуры греющего пара, так как возрастает количество тепла, передаваемое излучением. В установках, работающих с насыщенным водяным паром при температурах 150—180° С, приток тепла достигает 1800—3600 $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, или 2000—4000 $\text{вт}/\text{м}^2$, для трудновысушиваемых и органических твердых веществ и 5400 $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, или ~ 6300 $\text{вт}/\text{м}^2$, для тонкоизмельченных неорганических материалов. Влияние давления греющего пара на увеличение скорости теплопередачи (в пределах до $p_{\text{изб}} = 8,8$ ат) показано на рис. III-35. Время прохождения материала по сушилке приблизительно можно определить по формуле (III-10).

Характеристика и стоимость. В табл. III-12 приведены данные по нескольким стандартным паровым тру-

ТАБЛИЦА III-12

Характеристика и примерная стоимость вращающихся паровых трубчатых сушилок с непрямым нагревом¹

Размеры, $(D \times L)$, м	Число трубок	Наружный диаметр трубок, мм	Поверхность, м^2	Свободная поверхность, м^2	Число оборотов корпуса, об/мин	Мощность электродвигателя, кВт	Масса, т	Примерная стоимость, тыс. долл.
0,96 × 4,56	14	114	21,4	0,6	6	2,2	5,4	11,8
0,96 × 6,1	14	114	29,2	0,6	6	2,2	5,9	
0,96 × 7,64	14	114	36,6	0,6	6	3,7	6,4	
0,96 × 9,15	14	114	44,6	0,6	6	3,7	6,9	
0,96 × 10,7	14	114	52,0	0,6	6	3,7	7,4	14,0
1,47 × 6,1	18	114; 63,5	58,0	1,2	4,4	3,7	10,2	17,4
1,47 × 7,64	18	114; 63,5	73,4	1,2	4,4	3,7	11,1	
1,47 × 9,15	18	114; 63,5	88,5	1,2	5	5,5	12,1	
1,47 × 10,7	18	114; 63,5	104	1,2	5	5,5	13,0	
1,47 × 12,2	18	114; 63,5	119	1,2	5	5,5	14,1	
1,47 × 13,7	18	114; 63,5	135	1,2	5,5	7,4	15,0	21,3
1,92 × 7,64	27	114; 76,2	118	2,2	4	5,5	19,2	24,6
1,92 × 9,15	27	114; 76,2	143	2,2	4	5,5	20,5	
1,92 × 10,7	27	114; 76,2	167	2,2	4	7,4	22,1	
1,92 × 12,2	27	114; 76,2	192	2,2	4	7,4	23,7	
1,92 × 13,7	27	114; 76,2	216	2,2	4	11,1	25,3	
1,92 × 15,3	27	114; 76,2	242	2,2	4	11,1	27,4	
1,92 × 16,8	27	114; 76,2	266	2,2	4	14,7	29,2	
1,92 × 18,3	27	114; 76,2	290	2,2	4	14,7	30,6	33,8
2,44 × 12,2	90	114	393	3,7	3	11,1	50,0	50,7
2,44 × 17,0	90	114	492	3,7	3	14,7	56,2	
2,44 × 18,3	90	114	590	3,7	3	14,7	63,5	
2,44 × 21,4	90	114	690	3,7	3	22,2	70,0	
2,44 × 24,4	90	114	785	3,7	3	29,6	75,0	64,3

¹ По данным General American Transportation Corp.

чатым сушилкам. Цены (1960 г.) указаны для аппаратов, изготовленных из обыкновенной углеродистой стали; для конструкций из нержавеющей стали табличное значение цены нужно увеличить в 2,1 раза. Стоимость монтажа составляет от 150 до 300% продажной цены. Расходы на ремонт и обслуживание составляют в среднем 5—10% от общей и установочной стоимости.

Термический к. п. д. установки находится в пределах 70—90% при условии хорошей изоляции корпуса сушилки.

Данные о работе вращающихся паровых трубчатых сушилок с непрямым нагревом для трех групп обрабатываемых материалов приведены в табл. III-13.

пературах более высоких, чем во вращающихся аппаратах, обогреваемых паром. Такие печи пригодны для проведения процессов (в условиях герметизации) в окислительной, инертной или восстановительной атмосфере и требуют минимального количества газа для очистки корпуса продувкой.

Кальцинаторы с непрямым нагревом широко применяются в промышленности для проведения следующих процессов:

- 1) активирование древесного угля;
- 2) восстановление содержащих высшие окислы минералов до низших окислов;
- 3) сушка осажденных фторидов в атмосфере фтористого водорода;

ТАБЛИЦА III-13

Данные о работе вращающихся паровых трубчатых сушилок с непрямым нагревом¹

		Группа обрабатываемых материалов		
		Органические, с высокой влажностью; зерно для винокуренных и пивоваренных заводов; цитрусовая пульпа	Снятые с фильтра осадки пигментов; бланфикс; углекислый барий; осажденный мел	Тонкоизмельченные, неорганические; водные суспензии слюды, двуокиси кремния; флотационные концентраты
Исходный материал	влажный	Гранулированный и сырой, но не липкий, или шлам	Паста, суспензия или шлам	Рыхлый, хрупкий и крошащийся
Продукт		Смесь гранул	Твердые шарики	Порошок с небольшим количеством комков
Нормальная влажность, % (на сухой продукт):				
в исходном материале		233	100	54
в продукте		11	0,15	0,5
Температура, °C				
исходного материала		40—50	10—20	10—20
продукта		75—85	105—135	95—110
Количество испаряющейся влаги, кг/кг продукта		2	1	0,53
Тепловая нагрузка, ккал/кг продукта		1250	664	346
Давление (избыточное) греющего пара, ат		8,8	8,8	8,8
Требуемая греющая поверхность, м ² /кг продукта		0,34	0,41	0,072
Расход греющего пара, кг/кг продукта		3,33	1,72	0,85

¹ По данным General American Transportation Corp.

Печи для прокаливания (кальцинаторы) с непрямым нагревом

Печи для прокаливания с непрямым нагревом периодического или непрерывного действия используются для термической обработки и сушки материалов при тем-

- 4) прокаливание силикагеля;
- 5) сушка и удаление серы из порошков кобальта, меди и никеля;
- 6) восстановление окисей металлов;
- 7) окисление и «сжигание» органических примесей;
- 8) осушка литейной земли.

Установка обычно состоит из цилиндрической реторты, вращающейся внутри неподвижной цилиндрической печи, выложенной огнеупорным кирпичом. Печь устроена так, что сгорание топлива происходит внутри кольцеобразного зазора между ретортой и корпусом печи. Цилиндр реторты проходит через всю печь, а оба конца реторты выходят за пределы неподвижного корпуса печи. На этих концах расположены бандажи и зубчатый венец с приводом. Материал можно непрерывно подавать в аппарат с одного конца и непрерывно разгружать с другого. Подачу и разгрузку твердой фазы обычно производят шнековыми или другими питателями с принудительным движением материала.

В некоторых случаях желательно охладить продукт перед выгрузкой. Для этой цели разгрузочный конец

должны проходить через слой обрабатываемого материала и очищать стенки от налипшей твердой фазы. В этом случае нет необходимости использовать подъемные полосы (внутреннюю насадку), так как перемещение материала также происходит за счет движения цепей.

Для точного регулирования задержки (т. е. количества материала, находящегося внутри цилиндра) можно использовать непрерывные спиральные перегородки.

В современных установках применяется нагрев электрическим током, а также газом или нефтью. Для обеспечения равномерного нагрева горелки располагают под цилиндром реторты. Процесс регулируется обычно по температуре цилиндра, измеряемой радиационными пирометрами или другими приборами. Когда

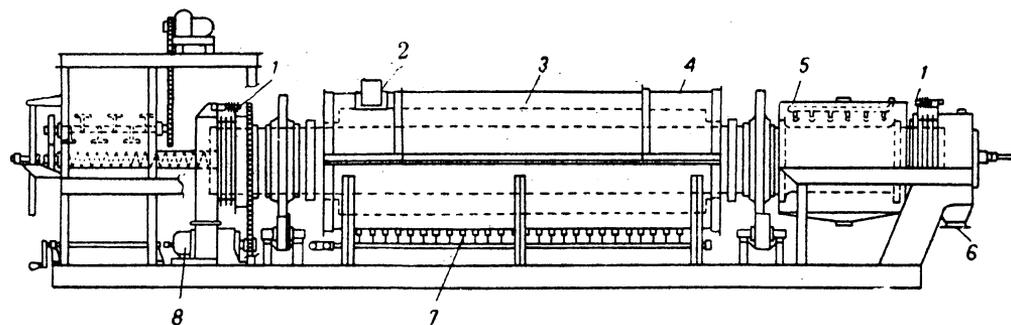


Рис. III-36. Вращающийся кальцинатор непрямого нагрева с газовой топкой, дополнительным оросительным водяным холодильником и питателем:

1 — уплотнения (по типу кузнечных мехов); 2 — соединение с дымоходом; 3 — футеровка; 4 — печь; 5 — водяной оросительный холодильник; 6 — разгрузочный желоб; 7 — горелки; 8 — электродвигатель.

цилиндра снабжается дополнительной наставкой, наружная сторона которой охлаждается струями воды. В прямоточных кальцинаторах горячие газы удаляются из нагреваемой части цилиндра через специальную вытяжную трубу. Для того чтобы предотвратить возможную конденсацию потока газа вблизи охлаждаемых поверхностей цилиндра, эту трубу устанавливают по центру охлаждаемой секции. Часто применяется отдельный холодильник, изолированный от кальцинатора воздушным затвором. Типовой кальцинатор непрерывного действия с дополнительным оросительным холодильником показан на рис. III-36.

Рабочие температуры в печах для прокаливания с непрямым нагревом ограничены по конструктивным соображениям и обычно составляют $\sim 425^\circ\text{C}$ для углеродистой и $\sim 650^\circ\text{C}$ для нержавеющей стали. Использование специальных сплавов позволяет увеличить рабочую температуру до 1100°C .

Чтобы предотвратить скольжение твердого материала по гладкой внутренней поверхности цилиндра, часто приваривают к внутренним стенкам продольные металлические полосы для подъема материала. Эти полосы обычно не заставляют материал рассыпаться сплошной завесой по всему сечению (как в аппаратах с прямым нагревом), а только предотвращают скольжение и действуют так, что слой материала переворачивается и при этом постоянно обновляется поверхность для тепло- и массопереноса. Для предупреждения налипания материала на внутреннюю поверхность цилиндра иногда используют тяжелые цепи. Чтобы цепи могли поворачиваться, не запутываясь звеньями, их укрепляют на обоих концах аппарата шарнирно. Цепи

внутри цилиндра необходимо поддерживать специальную газовую атмосферу, применяют вращающиеся газовые уплотнения с одной или более кольцевыми камерами, находящимися под давлением. Уплотнение диафрагменного типа, действующее по принципу кузнечных мехов и не допускающее утечки, можно использовать при избыточных давлениях порядка 50 мм вод. ст.

ТАБЛИЦА III-14

Характеристика и примерная стоимость вращающихся печей для прокаливания с непрямым нагревом¹

Диаметр, м	Длина цилиндра, м		Мощность электродвигателя ² , кВт	Масса (без футеровки), т	Примерная стоимость, тыс. долл.	
	общая	нагреваемой части			цилиндр из углеродистой стали	цилиндр из нержавеющей стали
1,2	11,5	9,5	3,7	11,3	19	28
1,5	13,5	11,2	5,5	22,7	27	40
1,8	13,8	11,4	7,4	25,0	30	48
2,1	18,3	16,0	18,5	38,6	40	65

¹ По данным Bartlett — Snow — Pacific Co.

² При числе оборотов цилиндра 2 об/мин и степени его заполнения материалом плотностью 1600 кг/м^3 , равной 10%.

Методы расчета. В кальцинаторах с непрямым нагревом теплопередача происходит главным образом излучением от стенок цилиндра к слою твердого материала. Термический к. п. д. находится в пределах от 35 до 65%. Определяющими факторами процесса теплопередачи являются коэффициенты теплопроводности и излучения металлической стенки и слоя твердого материала. Если эти характеристики известны, то размеры

включается в том, что сгоревшие и частично охлажденные дымовые газы до удаления в атмосферу используются для передачи тепла конвекцией непосредственно твердой фазе. При анализе работы различных установок найдено, что от 15 до 25% тепла передается при непрямом нагреве через металлическую стенку и от 75 до 85% непосредственно конвекцией от газа к твердой фазе.

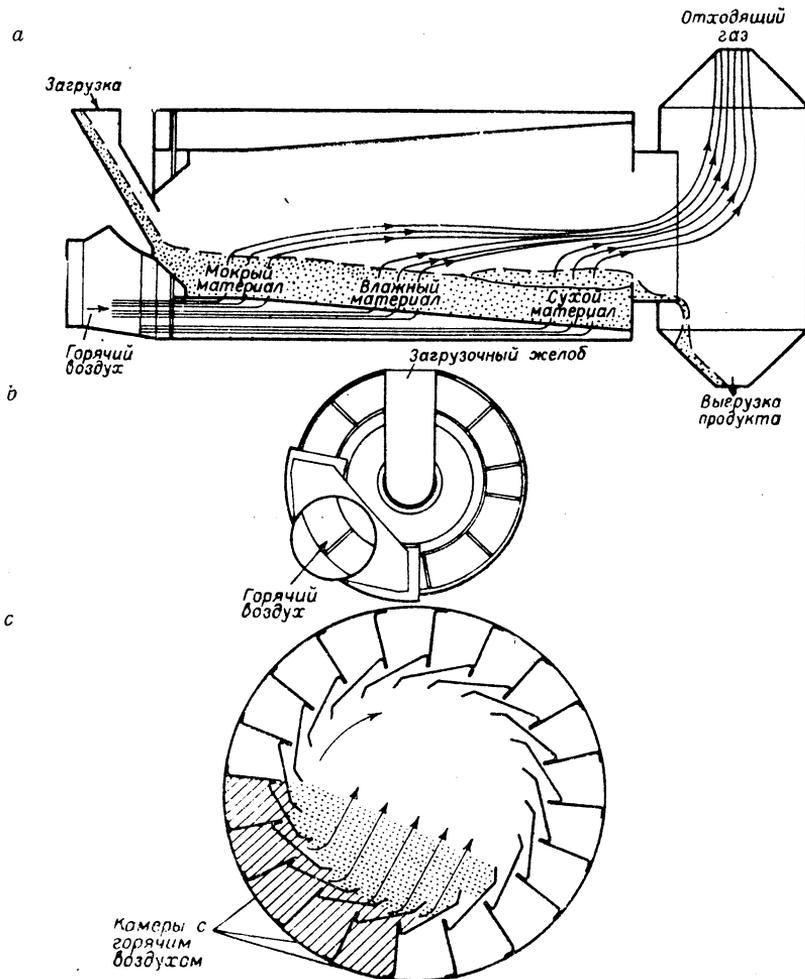


Рис. III-37. Сушилка «Рого-Лувр»:

a — движение потоков воздуха и материала через сушилку; *b* — загрузочный конец сушилки; *c* — движение воздуха через жалюзи и материал.

оборудования могут быть определены довольно точно с помощью уравнения Стефана — Больцмана. Кажущийся коэффициент теплопередачи находится в пределах от $15 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, или $17 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, при низкотемпературных процессах до $73 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, или $85 \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, при высокотемпературных процессах. Для сравнения следует отметить, что сушилки с непрямым нагревом (как на рис. III-24) имеют чрезвычайно высокие значения термического к. п. д. — часто 80% для установок с двойным кожухом и до 85% для установок с изолированной топкой. Причина этого за-

Характеристика и стоимость. Примерная стоимость (1960 г.), а также некоторые характеристики непрерывно действующих вращающихся кальцинаторов приведены в табл. III-14. Продажная цена аппарата включает стоимость цилиндра, уплотнений, топки, электродвигателя, питателя, разгрузочного устройства, горелок и т. д. Установочная стоимость может достигать 200—300% от продажной цены.

Небольшие реторты периодического действия, нагреваемые электрическим током или дымовыми газами, широко используют для проведения химических

процессов, включая термообработку измельченных твердых материалов. Для промышленных установок изготовляют реторты диаметром 220—1170 мм и длиной 880—1760 мм. Непрерывнодействующие реторты с внутренними спиралями применяют также для термической обработки металлов. В этих процессах осуществляется точное регулирование задержки материала в печи. Диаметры стандартных реторт равны 290, 440 и 585 мм при эффективной длине до 3 м.

Сушилка «Рото-Лувр» с прямым нагревом

Одним из наиболее важных типов вращающегося оборудования является сушилка «Рото-Лувр» (воздушная барабанная сушилка жалюзийного типа), показанная на рис. III-37. Горячий (или охлаждающий) воздух продувается через жалюзи во вращающийся цилиндр и проходит через слой твердого материала, который непрерывно движется через вращающийся цилиндр. Постоянное перемещение (переворачивание) слоя обеспечивает равномерность контакта воздуха с твердой фазой и, следовательно, равномерность тепло- и массопередачи. Расположенный за жалюзи кольцевой проход разделен перегородками, так что воздух входит в цилиндр только под слой материала. Число одновременно перекрытых материалом жалюзи составляет ~30%. Так как воздух циркулирует через слой материала, то степень заполнения обычно равна 13—15% (или более). Диаметр сушилок 0,75—3,5 м, длина 2,5—10 м. Наиболее крупная действующая установка способна испарять 5450 кг воды/ч. Для сушики могут быть использованы горячие газы с температурой от 120 до 540°С. Так как поток газа проходит через слой твердого материала, аппарат имеет высокое гидравлическое сопротивление (от 75 до 500 мм вод. ст.). Напоры нагнетательного и вытяжного вентиляторов в большинстве случаев обеспечивают сохранение статического напора внутри аппарата независимо от атмосферного давления. Иногда происходит избыточный подсос воздуха или нагнетание горячих газов и пыли в окружающую среду. Один вентилятор обычно работает при определенных (заданных) условиях, а с помощью другого вентилятора, управляемого регулятором давления, осуществляется автоматический контроль тяги.

Сушилки «Рото-Лувр» применяют для обработки крупнозернистых гранулированных твердых материалов. Так как в этих сушилках нет необходимости осуществлять равномерное распределение (рассеивание) частиц для лучшего их контактирования с сушильным агентом, то поломки от ударов кристаллами или крупными частицами случаются гораздо реже, чем во вращающихся аппаратах с прямым нагревом при наличии лопастей.

В связи с тем, что газ движется через постоянно перемещающийся слой твердого материала, тепло- и массоперенос (по крайней мере, от газа к поверхности материала) чрезвычайно эффективны. Следовательно, размеры сушилки, необходимые для обеспечения заданной производительности, меньше, чем в случае применения обычного вращающегося аппарата с прямым нагревом и внутренней насадкой. Однако разница в продажных ценах тех и других аппаратов частично балансируется более сложной конструкцией сушилок «Рото-Лувр». Производительность сушилки «Рото-Лувр» примерно в 1,5 раза больше производительности обычной барабанной сушилки таких же размеров, работающей при одинаковых условиях. Из-за перекрестного тока теплообмена средняя разность температур

для сушилки «Рото-Лувр» не является простой функцией концевых разностей температур.

Опубликованных данных, которые позволили бы определять размеры сушилок «Рото-Лувр» без проведения опытов на пилотных установках, пока не имеется. Поэтому для каждой установки могут потребоваться специальные расчеты (по особому заказу), которые нельзя учесть в стандартной продажной цене.

ТАБЛИЦА III-15

Данные о работе промышленных сушилок «Рото-Лувр»¹

	Высушиваемый материал		
	сульфат аммония	литейная земля	металлургический кокс
Диаметр сушилки, м	0,75	1,93	3,1
Длина сушилки, м	3,0	7,3	9,1
Влажность материала, % (на влажный продукт):			
исходного	2,0	6,0	18,0
высушенного	0,1	0,5	0,5
Производительность (по высушенному материалу), кг/ч	1130	14 500	17 200
Скорость испарения влаги, кг/ч	22,6	965	3 660
Теплоноситель или горючее	Пар	Газ	Нефть
Расход теплоносителя или горючего	115 кг/ч	131 м ³ /ч	435 л/ч
Расход тепла, ккал/кг испаренной влаги	2440	1 210	1 185
Общая требуемая мощность, квт	2,9	30	57

¹ Lapple, Clark, Dybdal., Chem. Eng., 62, 11, 177 (1955).

В табл. III-15 приведены данные для трех наиболее характерных случаев применения сушилок «Рото-Лувр». Термический к. п. д. находится в пределах 30—70%.

АППАРАТЫ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Аппарат с перемешиванием, используемый для проведения процессов взаимодействия твердой и газовой фаз, характеризуется как сосуд, в корпусе которого имеет место установившийся процесс, причем перемешивание и движение твердой фазы производится с помощью механической мешалки. В промышленности используется большое количество различных типов такого оборудования, однако в этом разделе будут рассмотрены только три из них, наиболее характерные и широко применяемые для проведения химических процессов: вакуумные сушилки с перемешиванием, полочные турбосушки и подовые печи¹.

Вакуумные сушилки представляют собой горизонтальный цилиндрический сосуд (с рубашкой и непрямым нагревом), внутри которого расположена механическая мешалка ленточного типа.

¹ В отечественной практике такие печи обычно называются полочными. — Прим. ред.

Полочная турбосушилка состоит из вертикального многоугольного корпуса, содержащего ряд кольцеобразных вращающихся полок. Твердые частицы поступают в верхнюю часть аппарата, перемешиваются и перемещаются с одной полки на другую, расположенную ниже. Теплопередача в таких аппаратах обычно происходит непосредственно от газа к твердым частицам.

Подовые печи конструируются с одним или несколькими подами-полками. Кожух устанавливается верти-

вращающиеся аппараты. Основные их преимущества по сравнению с рассмотренными выше вращающимися аппаратами следующие: 1) не нужно устанавливать вращающиеся уплотнения большого диаметра на входе и на выходе, так как кожух неподвижен и утечка газа по существу исключается (вращающиеся уплотнения необходимы только в местах выхода вала механического перемешивающего устройства); 2) при использовании механических мешалок для перемешивания твердой фазы возникают срезающие усилия, которые спо-

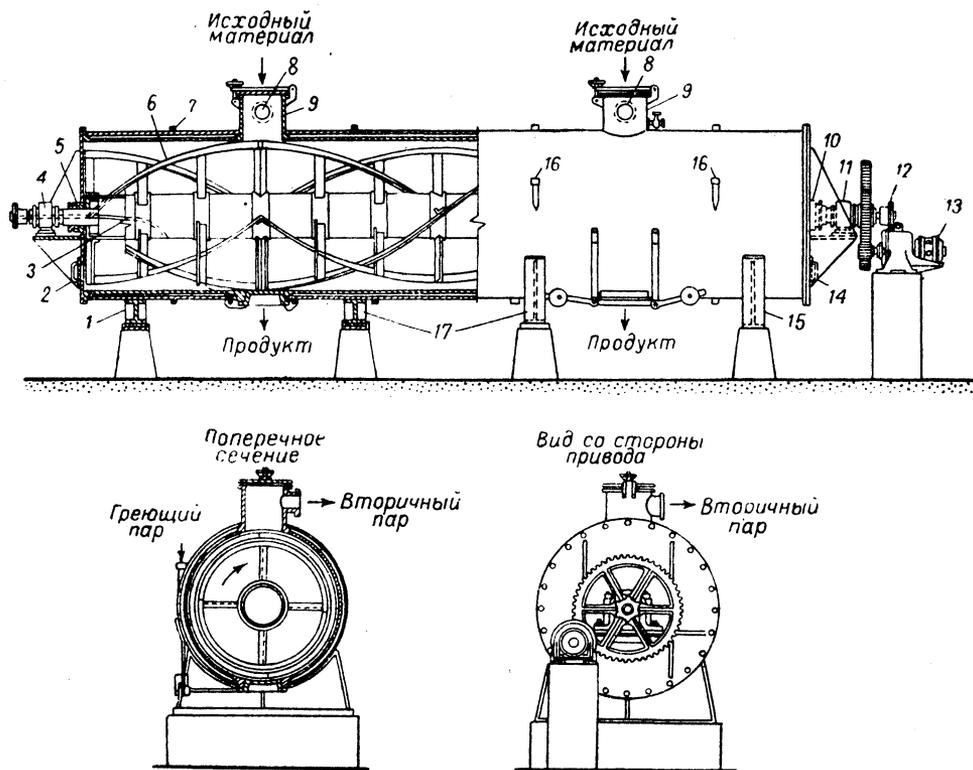


Рис. III-38. Типовая вакуум-сушилка с перемешиванием:

1, 17 — опорные устройства, 2, 14 — смотровое или очистное отверстие; 3 — труба для конденсата; 4, 11 — подшипники; 5, 10 — сальники; 6 — двойная спиральная мешалка; 7 — воздушник; 8 — штуцер для отвода испаряющейся влаги (вторичного пара); 9 — колпак для загрузки влажного материала и отвода испаряющейся влаги; 12 — вращающаяся головка для подвода греющего пара; 13 — электродвигатель; 15 — неподвижная опора; 16 — трубы для ввода греющего пара в рубашку.

кально и имеет цилиндрическую форму. Перемешивание и перемещение обрабатываемого материала с одного пода на другой, расположенный ниже, в многополочных установках производится с помощью горизонтальных вращающихся на центральном валу гребков-мешалок. Теплопередача обычно происходит непосредственно от газа к твердой фазе за счет конвекции и излучения от стенок. Подовые печи используются для проведения высокотемпературных процессов и футеруются огнеупорным кирпичом.

Аппараты с перемешиванием применимы для обработки твердых материалов, которые могут относительно свободно двигаться и выгружаются в гранулированном виде. Материалы, которые не обладают текучестью при загрузке, можно обрабатывать методами с рециркуляцией, описанным на стр. 243. В общем, аппараты с перемешиванием имеют такое же применение, как и

собствуют разрушению крупных кусков и агломератов. Происходящее иногда в таких аппаратах образование шариков и гранул из слипающихся материалов можно предотвратить с помощью специально сконструированных перемешивающих устройств.

Вакуум-сушилки с перемешиванием

Промышленные вакуум-сушилки с перемешиванием представляют собой аппараты периодического действия. Проектирование непрерывнодействующего оборудования требует разработки питателей и разгрузочных устройств для твердой фазы, которые смогут непрерывно перемещать отдельные твердые частицы в аппарат с избыточным давлением порядка 1,0 ат без подсоса воздуха внутрь его. Так называемое непрерывнодействующее

оборудование, имеющееся в настоящее время, действует непрерывно на стадии сушки, но требует двух или более периодически действующих емкостей, чтобы обеспечить воздушные затворы; выгрузка продукта также остается периодической.

Наиболее простая вакуум-сушилка состоит из неподвижного цилиндрического кожуха, установленного горизонтально, и смонтированной в нем мешалки, лопасти которой закреплены на центральном вращающемся валу. Тепло подается с циркулирующей горячей водой, паром или высококипящим органическим теплоносителем в рубашку, окружающую кожух, а в больших установках — еще и через полый центральный вал. Перемешивающее устройство представляет собой одиночную прерывную или двойную непрерывную спираль. Край лопастей должны быть расположены как можно ближе к стенкам (обычно оставляется зазор от 3 до 6 мм). Новые установки иногда снабжают скребками, гибко закрепленными на лопастях мешалки. Сушилка загружается через отверстие, расположенное в верхней ее части, а разгружается через одну или более насадок в дне аппарата. Разрежение в аппарате создается и поддерживается любым стандартным методом, например, паровым эжектором, вакуум-насосом и т. д.

Вакуум-сушилка другого типа состоит из вращающегося горизонтального цилиндрического кожуха (барабана), снабженного иногда рубашкой. Разрежение в установке создается через полые цапфы с соответствующей набивкой сальников. Вращающиеся сальники должны также использоваться для впуска и удаления греющего агента из рубашки. Внутри барабана могут быть приварены продольные полосы, помогающие перемешивать твердую фазу.

В последние годы были предложены двухконусная вращающаяся вакуум-сушилка. Хотя она действует так же, как и предыдущая сушилка, однако наклонные стенки конусов позволяют более быстро производить разгрузку, когда аппарат находится в неподвижном положении. Для подвода продукта к разгрузочным отверстиям при цилиндрической форме корпуса требуется вращение. Так как в результате циркулирующая пыль забивает разгрузочные насадки, то необходимо часто освобождать их и предотвращать потери в атмосферу при загрузке.

Типовая вакуум-сушилка с перемешиванием показана на рис. III-38, двухконусная вакуум-сушилка — на рис. III-39.

Вакуум при сушке или другом технологическом процессе используется в следующих случаях: 1) когда должна поддерживаться низкая температура твердого материала, так как перегрев может привести к повреждению продукта или изменению его природы; 2) когда при контакте воздуха с нагретым продуктом может происходить окисление или возникают взрывоопасные условия; 3) когда требуется регенерация растворителя и 4) когда материал должен быть высушен до чрезвычайно низкого уровня влажности.

При обработке или сушке материала в вакууме стремятся создать большую температурную движущую силу между греющим агентом и продуктом. Для достижения этой цели при достаточно низкой температуре в рубашке необходимо понизить внутреннее рабочее давление так, чтобы удаляемая жидкость закипала при более низком давлении вторичного пара. Однако это не всегда экономично, потому что при понижении внутреннего давления до очень низкого уровня выделяется большой объем вторичного пара. Необходимо принимать компромиссное решение, выбирая рабочее давление с учетом подсоса газов, условий конденсации, раз-

меров паропровода и насосной системы. Очень незначительное число промышленных вакуум-сушилок работает при разрежении ниже 10 мм рт. ст.

Методы расчета. Скорость теплопередачи от греющего агента через стенку сушилки к твердому материалу можно выразить с помощью уравнения:

$$Q = KF \Delta t_{cp} \quad (\text{III-13})$$

где Q — тепловой поток, $вт$; K — общий коэффициент теплопередачи, $вт/(м^2 \cdot град)$; F — общая поверхность рубашки, $м^2$; Δt_{cp} — средняя логарифмическая движущая сила процесса от греющего агента к твердому материалу, $град$.

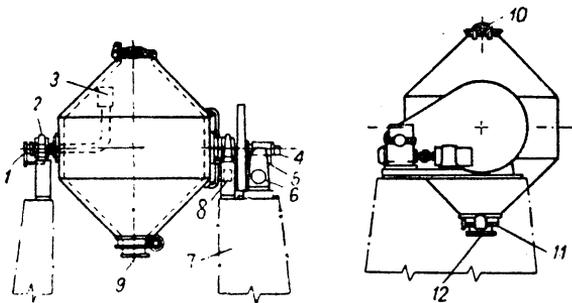


Рис. III-39. Вращающаяся двухконусная вакуумная сушилка:

1 — соединение с вакуумной линией; 2 — пыленепроницаемое уплотнение роликовых подшипников; 3 — фильтр для пыли; 4 — подача греющего пара или горячей воды; 5 — отвод конденсата или горячей воды; 6 — электродвигатель с вариатором скоростей; 7 — бетонное основание; 8 — выключатель; 9 — разгрузочное отверстие; 10 — загрузочное отверстие; 11 — вакуум-непроницаемый разгрузочный клапан; 12 — рукавный фильтр.

Величина K почти исключительно зависит от коэффициентов теплоотдачи к внутренней стенке рубашки и к твердой фазе. Если стенки сушилки чистые, значение K обычно находится в пределах 24—177 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$, или 27—195 $вт/(м^2 \cdot град)$. Коэффициент теплопередачи ниже 4,9—9,7 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$, или 5,7—11,3 $вт/(м^2 \cdot град)$, наблюдаются, когда стенки сушилки покрыты слоем материала. Для приближенного расчета (без проведения испытаний) приемлемые значения K при обычной сушке (без доведения продукта до абсолютной сухости) составляют 48 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$, или 57 $вт/(м^2 \cdot град)$, для сушилки с вращающейся мешалкой и 29 $ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$, или 33,8 $вт/(м^2 \cdot град)$, для вращающихся установок.

Вакуум-сушилки обычно заполняют материалом на 50—65%. Число оборотов n перемешивающего устройства находится в пределах 3—8 $об/мин$. Увеличение n незначительно улучшает теплопередачу, но приводит к большому расходу мощности. Мощность N , расходная для приведения в движение мешалки, может быть рассчитана (в $квт$) по эмпирической формуле:

$$N = 1,6LD$$

где L — длина корпуса сушилки, $м$; D — длина корпуса, $м$.

Характеристика и стоимость. Характеристика типовых вакуум-сушилок с перемешиванием приведена в табл. III-16. Характеристика и стоимость (1960 г.) сушилок с мешалками даны в табл. III-17, двухконусных сушилок — в табл. III-18.

ТАБЛИЦА III-16

Характеристика вакуум-сушилок с перемешиванием

Высушиваемый материал	Размеры (D × L), м	Начальная влажность, %	Давление греющего пара, ат	Число оборотов мешалки, об/мин	Масса продукта (при периодической сушке), кг	Конечная влажность, %	Давление (абсолютное) в аппарате, мм рт. ст	Продолжительность сушки, ч	Скорость испарения, кг воды/(ч·м ²)
Ацетат целлюлозы	1,5 × 91	87,5	0,985	5,25	610	8	675—685	7	1,46
Краситель сернистый черный	1,5 × 91	50	2,1	4	3180	1	685	6	4,4
Крахмал	1,5 × 91	45—48	1,05	4	3600	12	660—685	4,75	5,85

ТАБЛИЦА III-17

Характеристика и стоимость стандартных вакуум-сушилок с мешалками¹

Размеры (D × L), м	Греющая поверхность, м ²	Рабочая емкость, м ³	Число оборотов мешалки, об/мин	Масса, т	Стоимость аппарата, ² тыс. долл.	
					из углеродистой стали	из нержавеющей стали
0,45 × 1,05	1,87	0,085	7,5	0,54	5,5	7
0,91 × 4,5	15,3	1,5	7,5	5,4	14	21
1,2 × 6,1	29,2	3,56	6,0	11,3	22	34
1,5 × 7,6	48,0	6,92	6,0	15,8	30	47
1,5 × 9,1	57,6	8,32	6,0	19,0	34	54

¹ По данным F. J. Stokes Corp.

² В стоимости учтены корпус, мешалка, электродвигатели и рубашка для греющего пара ($P_{изб} = 2,1 + 3,5 \text{ ат}$); сюда не входят стоимость вспомогательного оборудования (коллекторов пыли, конденсаторов и вакуум-насосов).

ТАБЛИЦА III-18

Характеристика и стоимость стандартных двухконусных вращающихся вакуум-сушилок¹

Рабочая емкость, м ³	Общий объем, м ³	Мощность электродвигателя, квт	Масса, т	Стоимость аппарата, ² тыс. долл.	
				из углеродистой стали	из нержавеющей стали
0,085	0,13	0,37	0,8	4,0	5,2
0,28	0,43	0,55	1,1	4,6	6
0,71	1,09	2,2	1,4	5,2	7
2,12	3,26	5,5	3,5	9,5	15
2,83	4,66	7,4	5,2	—	—
4,25	6,5	11,0	5,75	15	25

¹ По данным F. J. Stokes Corp.

² В стоимости учтены сушилка, электродвигатели и подставка для монтажа на бетонном фундаменте. Мощность рассчитана для 65%-го заполнения общего объема материалом, плотность которого ~800 кг/м³.

Полочные турбосушилки

Полочная турбосушилка (рис. III-40) представляет собой аппарат непрерывного действия, состоящий из ряда вращающихся в изолированном кожухе кольцевых

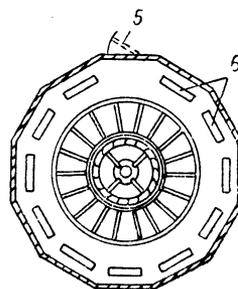
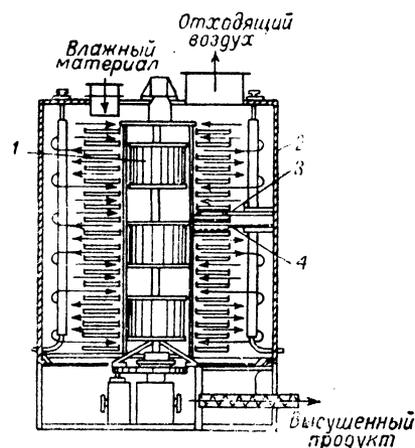


Рис. III-40. Сушилка с вращающимися полками:

1 — турбовоздуходувка; 2 — изолированный кожух; 3 — скребок; 4 — приспособление для выравнивания слоя; 5 — дверца люка; 6 — нагреватель (калорифер).

полок, в центре которых помещены турбовоздуходувки (турбодвигатели) для циркуляции воздуха на полках. Мокрый материал загружается в турбосушилку сверху и попадает на верхнюю полку, которая

вращается под загрузочным отверстием. Сделав один оборот, материал сталкивается через радиальные прорезы на расположенную ниже полку, где специальное приспособление разравнивает его в слой равномерной толщины. То же самое происходит на всех полках через каждый оборот. С последней полки материал разгружается через отверстие в дне сушилки.

Для доступа внутрь аппарата стальной каркас кожуха изготовляют из съемных изолированных панелей. Все подшипники и узлы, требующие смазки, вынесены наружу. Двигатели размещены под кожухом. Части аппарата, соприкасающиеся с продуктом, обычно делают из стали или специальных сплавов. Полки могут быть изготовлены из любого листового материала, например из эмалированной стали, асбестоцементных пластин или стеклопластика.

Воздух движется над находящимся на полках материалом с помощью турбовоздуходувки. Скорость циркуляции воздуха с помощью каждой турбовоздуходувки можно варьировать изменением наклона лопастей. На последней ступени сушки, когда скорость процесса лимитируется внутренней диффузией или обрабатываемый материал — мягкий и порошкообразный, скорость циркуляции воздуха сравнительно более низкая, чем на начальной ступени, когда процесс характеризуется высокой скоростью испарения влаги. Большей частью поток воздуха в сушилке направлен вверх, противотоком к материалу. В отдельных случаях условия сушки требуют прямого движения воздуха и материала или одновременно противотока и прямотока с вытяжкой отходящих газов на некотором уровне между подачей и разгрузкой твердой фазы. Отдельный вентилятор, подающий холодный воздух, устанавливают, если продукт перед выгрузкой должен быть охлажден.

Достоинством вертикальной конструкции полочной турбосушки является эффект тяги, которого часто вполне достаточно для того, чтобы аппарат работал с естественной тягой. Давление во всех точках внутри сушилки поддерживается близким к атмосферному.

Часто поверхность крышки используется в качестве затвора (для понижения скорости отходящих газов и осаждения пыли в сушилку). Калориферы размещают в пространстве между полками и корпусом сушилки, где они не соприкасаются непосредственно с обрабатываемым материалом. В случае промежуточного подогрева воздуха тепловая эффективность может составлять ~ 3500 кдж/кг испаренной влаги. В качестве греющего агента обычно применяют насыщенный водяной пар. Высокая стоимость электронагрева ограничивает его применение относительно небольшими установками. Для материалов, имеющих тенденцию загрязнять внутренние греющие поверхности, применяют наружную систему нагрева.

В полочных турбосушилках обрабатывают разнообразные материалы — от густых суспензий (с вязкостью 100 000 *снз* и выше) до тонких порошков. Эти аппараты непригодны для сушки волокнистых, пластобразных и клейких материалов. Тонкие суспензии можно обрабатывать, используя рециркуляцию высушенного продукта. Лепешку с фильтрпресса перед разгрузкой в турбосушку необходимо гранулировать. Тиксотропные материалы подают в такую сушилку непосредственно с барабанного фильтра в виде срезанного ножом осадка. Пасты можно выдавливать (из экструдера) прямо на верхнюю полку турбосушки и обдуть потоком горячего воздуха, чтобы материал мог свободно перемещаться после одного оборота сушилки.

Выпускаются полочные турбосушки различных размеров — от компактных аппаратов с $D=1,8$ м и $H=1,8$ м до крупных, расположенных на открытом воздухе установок с $D=10$ м и $H=20$ м. Поверхность полок турбосушки изменяется от 5,5 до 1750 m^2 , а число полок — от 12 (в небольших аппаратах) до 53 (в крупных установках). Рабочие температуры в стандартных полочных турбосушилках достигают 340° С.

Методы расчета. Механизм тепло- и массопередачи в полочных турбосушилках такой же, как и в полочных сушилках периодического действия, за исключением того, что постоянное переворачивание и перемешивание твердых частиц значительно увеличивает скорость сушки. Расчет должен основываться на данных, полученных на ранее действующих или пилотных установках. Кажущийся коэффициент теплопередачи находится в пределах 28,4—56,8 $вт/(m^2 \cdot град)$ для сухого твердого материала и 67,5—112 $вт/(m^2 \cdot град)$ для влажного материала.

Полочные турбосушки можно успешно применять для сушки и охлаждения гипохлорита кальция, кристаллов мочевины, хлопьев хлористого кальция и кристаллов хлористого натрия.

Замкнутая циркуляционная система Висмонта (рис. III-41) состоит из полочной турбосушки с внут-

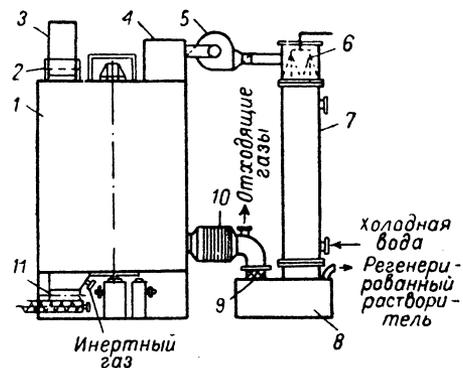


Рис. III-41. Установка для непрерывной сушки с рекуперацией растворителя:

- 1 — полочная турбосушка; 2 — питатель;
- 3 — бункер для высушиваемого материала;
- 4 — бор; 5 — рециркуляционный вентилятор;
- 6 — распылительные головки; 7 — конденсатор;
- 8 — сборник; 9 — брызгоуловитель; 10 — калорифер; 11 — уплотнение.

ренными калориферами для промежуточного нагрева (или без них), рециркуляционного вентилятора, конденсатора со сборником и брызгоуловителем, а также калорифера для предварительного нагрева. Этот метод используется для непрерывной сушки без утечки дыма, паров или пыли в атмосферу.

Характеристика и стоимость. Данные о работе полочной турбосушки по замкнутой циркуляционной схеме приведены в табл. III-19. Продажная цена обычно находится в пределах от 9 тыс. долл. за сушилку небольших размеров ($\sim 5,5$ m^2) до 140 тыс. долл. за крупную сушилку (~ 920 m^2) из углеродистой стали. Нержавеющая сталь и алюминий незначительно удорожают изготовление.

ТАБЛИЦА III-19

Продолжение

Данные о работе полочной турбосушилки по замкнутой циркуляционной схеме ¹

	Высушиваемый материал		
	клеящее вещество на основе целлюлозы	антибиотик (осадок с фильтра)	параформальдегид
Производительность по высушенному продукту, кг/ч	125	545	135
Состав летучих веществ	Метанол и вода	Бутанол	Пары формальдегида и вода
Влажность материала, % (на влажный продукт) ² :			
начальная	60	50	35
конечная	2	0,5	4
Скорость испарения, кг/ч	176	545	68
Система нагрева	Внешняя	Внутренняя	Внешняя
Греющий агент		Водяной пар	
Сушильный агент		Инертный газ	
Температура в сушилке, °С	77	104	66
Расход тепла, кдж/кг продукта	3840	2230	2910
Требуемая мощность, кВт:			
сушилки	3,7	5,9	1,5
циркуляционного вентилятора	3,7	14,7	2,2
Конструкционные материалы	Полки из пластика, остальное (внутри сушилки) из нержавеющей стали	Полки из специальных пластиков	Нержавеющая сталь
Высота сушилки, м	5,8	7,0	3,7
Диаметр сушилки, м	4,5	4,5	2,7
Система рекуперации	Кожухотрубный конденсатор	Кожухотрубный конденсатор	Конденсатор смешения
Охлаждающий агент в конденсаторе	Рассол и вода из градирни	Охлажденная вода	Охлажденная вода

	Высушиваемый материал		
	клеящее вещество на основе целлюлозы	антибиотик (осадок с фильтра)	параформальдегид
Место установки	На открытом воздухе		
Примерная стоимость (1960 г.), тыс. долл. ³	65	67	25
Монтаж сушилки	Монтируется на месте	Монтируется на месте	Установка упакована

¹ По данным Wyssmont Co.
² Имеется в виду содержание летучих в исходном материале и продукте. — Прим. ред.
³ В стоимости учтены сушилка, электродвигатели, калорифер, пыленепроницаемый затвор, рециркуляционный вентилятор, конденсатор, уплотнения, питатель, разгрузочный затвор и приборы поставляются за дополнительную оплату, составляющую 15—50% табличной стоимости в зависимости от нагрузки на конденсатор, выбора охлаждающего агента и конструкционного материала для вспомогательного оборудования. С учетом монтажа (на фундаменте) стоимость сушильной установки увеличивается на ~ 20%.

Подовые печи

Специальной конструкцией печи с круглым подом является так называемая печь Маннгейма (рис. III-42), в которой серная кислота реагирует с хлористым натрием. Установка имеет огнеупорный под (диаметром до 5,5 м) со сводом из карборунда SiC. Горячий поток

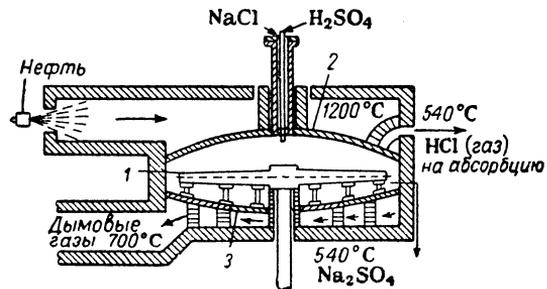


Рис. III-42. Печь для получения соляной кислоты:
 1 — вращающиеся гребки; 2 — карборундовый свод; 3 — под печи.

газов циркулирует вокруг муфеля. Основная часть тепла передается через свод и излучается на продукт, расположенный на поду. Смешанные исходные материалы непрерывно поступают в печь к центру пода, где механически перемешиваются. Загрузка постепенно перемещается к периферии, причем при взаимодействии компонентов смеси образуется газообразный хлористый водород, который удаляется через отдельный газоход в абсорбционную систему. Сернистый натрий

разгружается с периферии пода при температуре $\sim 540^\circ\text{C}$. Для нагревания используются топочные газы ($\sim 1200^\circ\text{C}$).

Многополочные печи

Многополочные печи применяют для обработки руд. Известны различные их конструкции: печи Мак-Дугала, Веджа, Никольса и др. Обычно многополочная печь (рис. III-43) состоит из нескольких кольцеобразных по-

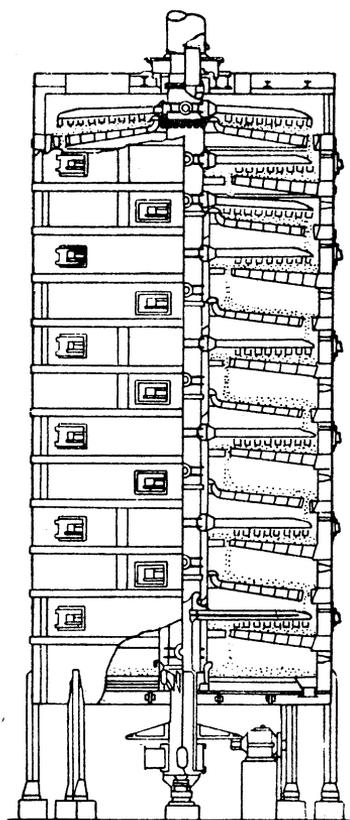


Рис. III-43. Многополочная обжиговая печь.

лок (подов), смонтированных одна над другой. На каждой полке движется укрепленные на центральном валу гребки — механические мешалки. Питание подают в центр верхней полки. Гребки перемещают загруженный материал к периферии, откуда он падает на следующую полку. Продукт выгружается из нижней части печи. Внутри полый центральный вал охлаждается циркулирующим под напором воздухом. На некоторых полках монтируются горелки, и циркулирующий воздух используется для горения.

В многополочных печах обычно обрабатывают гранулированные материалы, движущиеся противотоком газу. Диаметр промышленных печей 1,8—6,8 м, число полок (подов) 4—16, общая поверхность полок 6,5—370 м². Такие печи применяют (табл. III-20) для обжига руд, сушки и прокаливания извести, магнезита, известковых

ТАБЛИЦА III-20

Данные о многополочных печах¹

Продукт	Производительность, т/сутки		Диаметр печи, м	Число полок	Характерные особенности установки
	по исходному материалу	по продукту			
Известь из устричных раковин	240	120	6,8	12	Стенки печи из шамота ($\delta = 115$ мм) с изоляцией ($\delta_{из} = 228$ мм для рабочей температуры 840°C). Печь горит на полках с 4 по 10 включительно
Магнезия из гидроокиси магнезия	100 (суспензия с 50% гидроокиси магнезия)	50	6,8	10	
Ртуть из киновари (руды)	225	(95% извлечения)	5,5	8	Печь горит на полках с 3 по 7 включительно. Время пребывания ~ 1 ч. Используется жидкое топливо. Форсунки работают при низком давлении. Весь воздух (первичный и вторичный) вводится через форсунки. Тяга регулируется вентиляторами, направляющими поток холодного газа сверху вниз из конденсаторов ртути

¹ По данным Pacific Foundry & Metallurgy Co.

шламов, регенерации обесцвечивающих земель и сжигания сульфидов для получения SO_2 .

Наиболее важные материалы, для получения или обработки которых используют многополочные печи:

- 1) известь из дробленого известняка, устричных или морских раковин, доломитного известняка;
- 2) олово и цинк (обжиг сульфидов);
- 3) ртуть из киновари (испарение);
- 4) золото и серебро (хлорирующий обжиг золотых и серебряных руд; при этом удаляется мышьяк);
- 5) серная кислота из пиритов;

- 6) красящие пигменты (обжиг окислов металлов);
- 7) огнеупорные глины (прокаливание для уменьшения усадки);
- 8) литейная земля (регенерация отработанной земли удалением углерода);
- 9) фуллерова земля (регенерация прокаливанием);
- 10) сточные воды.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ АППАРАТЫ

Твердая фаза, частицы которой в виде гранул, шариков или брикетов при нормальной насыпной плотности движутся сверху вниз под действием силы тяжести через аппарат в контакте с газами, часто определяется как движущийся слой. Аппараты, в которых обрабатываются движущиеся под действием силы тяжести материалы (в так называемом гравитационном слое), называются гравитационными.

Гравитационный аппарат имеет неподвижный вертикальный (обычно цилиндрический) корпус с отверстиями для ввода сверху и вывода снизу твердого материала. Газовый поток проходит через слой твердого материала прямооток или противоток (в некоторых случаях осуществляется перекрестный ток газа и материала). Скорость газового потока снизу вверх должна быть меньше, чем требуется для приведения слоя твердых частиц во взвешенное состояние.

Ниже будут рассмотрены следующие типы гравитационных аппаратов: 1) шахтные печи; 2) установки каталитического крекинга; 3) сушилки и охладители для гранулированных материалов; 4) жалюзийные сушилки «Мульти-Лувр»; 5) аппараты с фонтанирующим слоем.

Одним из важнейших преимуществ техники движущегося под действием силы тяжести слоя является его пригодность для полного и тесного противоточного контактирования твердой и газовой фаз. Это обеспечивает наиболее эффективную тепло- и массопередачу. Контактное взаимодействие в слое, движущемся под действием силы тяжести, позволяет также использовать твердую фазу в качестве греющего агента.

Аппараты с движущимся под действием силы тяжести слоем применяют для обработки крупнозернистых, гранулированных, свободно движущихся твердых материалов, количество мелочи и пыли в которых невелико. Твердые частицы должны обладать такими свойствами в отношении размеров и поверхностных характеристик, чтобы не слипаться друг с другом, не зависать сводом и не сегрегироваться во время прохождения через аппарат.

Присутствие значительных количеств мелочи или пыли может затруднить движение газа вокруг крупных частиц и увеличить, таким образом, гидравлическое сопротивление. Мелкие частицы могут также сегрегироваться вблизи верхней или нижней стороны слоя и, кроме того, на тех поверхностях, где скорость газа мала. Высокая эффективность взаимодействия газовой и твердой фаз в слое, движущемся в поле силы тяжести, обуславливается равномерностью распределения газа, проходящего через слой твердых частиц, причем выбор питания и его подготовка являются важнейшими факторами для успешного проведения процесса. В качестве метода предварительной обработки исходного материала часто используется формование — гранулирование и брикетирование.

Гравитационные аппараты пригодны для проведения процессов при низких, средних и высоких температурах. В последнем случае корпус аппарата должен быть

полностью выложен (или облицован) огнеупорным кирпичом. Оборудование для извлечения пыли в процессах этого типа используется минимально, так как слой обычно сам выполняет роль коллектора пыли, и при удачном применении в слое не будет больших количеств пыли.

Применение слоя, движущегося под действием силы тяжести, обеспечивает потенциально большое число ступеней взаимодействия твердой и газовой фаз и дает возможность легко контролировать процесс по температуре газа на входе и выходе из аппарата.

Поддержание равномерной скорости движения твердой фазы в направлении сверху вниз по сечению слоя является одной из наиболее ответственных задач при проведении процесса. По этой причине гравитационному слою на практике придают большую высоту при сравнительно узком сечении. В аппарате с большим поперечным сечением разгрузка производится через коническое днище и центральное выходное отверстие с помощью нескольких ступеней (так называемых «крышных дырок» из центра слоя). Поток из центра движется быстро, поэтому по сторонам остаются застойные зоны. Успешное решение этой проблемы обеспечивается применением многочисленных выходных отверстий в центре и по периферии, разгрузочных столов, вращающихся гребков, широких подвижных колосниковых решеток и многовинтовых разгрузчиков. Вставка в нижнюю секцию аппарата (в форме перевернутого конуса) перегородок, расставленных с промежутками так, что сток материала в центре замедляется, также

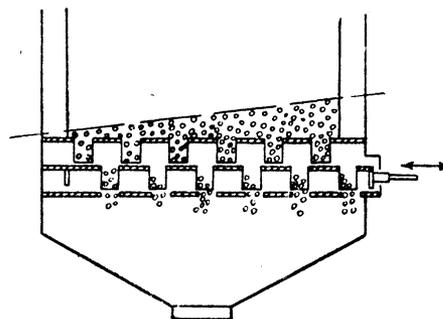


Рис. III-44. Механизм разгрузки твердой фазы в реакторе с гравитационным слоем.

представляет хороший способ повышения равномерности движения твердых частиц. На рис. III-44 изображен подвижный лоток с большим количеством отверстий, используемый для отбора точного количества твердой фазы из нижней части реактора со слоем, движущимся под действием силы тяжести. Отдельные карманы заполняются материалом при движении лотка в одну сторону и опорожняются при его движении в другую сторону. Такой способ разгрузки пригоден прежде всего для тонких неабразивных материалов. На рис. III-45 приведена конструкция из перфорированных пластин, использующая преимущественно характеристики текучести и угол естественного откоса твердой фазы для контроля скорости разгрузки. Другая конструкция такого типа отличается от первой применением группы наклонных труб, разгружаемых в обычных сборник и помещенных так, чтобы извлекать твердый материал в геометрически определенных точках основания реактора.

Выход газа из твердой фазы также может представлять собой важную проблему при работе реактора с движущимся под действием силы тяжести слоем. Один метод, при котором отверстия для подачи твердого материала выходят в свободное пространство ап-

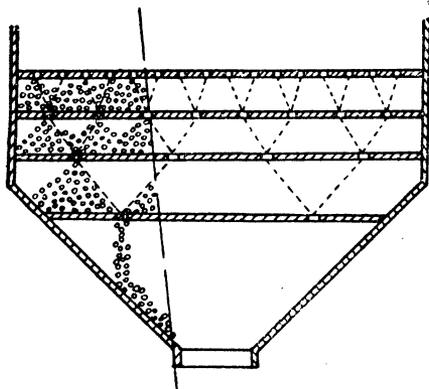


Рис. III-45. Механизм разгрузки твердой фазы в реакторе с перфорированными полками.

парата выше отверстия для выхода газа, показан на рис. III-9. Другой метод характеризуется применением перевернутых V-образных каналов, помещенных в верхней части слоя твердого материала. Газ и вторичный

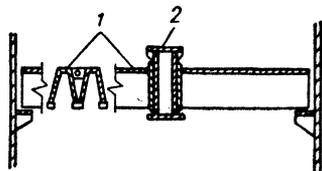


Рис. III-46. Верхняя полка для удаления паров из каталитического реактора с движущимся под действием силы тяжести слоем:

1 — каналы парового коллектора;
2 — паровой коллектор.

пар собираются и удаляются из верхней части каналов, а поток твердой фазы обтекает их сверху (рис. III-46). Таким же образом можно вводить газ в слой.

Шахтные печи

Из всех шахтных печей наиболее давно и широко применяют доменные печи для выплавки чугуна. Кроме того, шахтные печи используют для получения газообразных продуктов, химикалий из брикетированных реагентов и фосфора из фосфорита. Известняк прежде обжигали исключительно в печах такого типа, в настоящее же время в этих целях часто используют вращающиеся обжиговые барабаны или полочные печи.

Шахтная печь представляет собой вертикальный, выложенный огнеупорным кирпичом цилиндр, в котором опускается или поддерживается в неподвижном состоянии (неподвижный слой) колонна твердого материала и движется вверх поток горячего газа. Топливо может быть использовано тремя способами:

1) твердое топливо добавляется в смеси с реагирующей твердой фазой или отдельно от нее;

2) топливо сжигается в отдельной топочной камере, и горячие газы вдуваются в печь на некотором уровне колонны материала;

3) топливо вводится в шахту и сжигается на ее дне.

В первом случае тепло образуется и непосредственно поглощается внутри слоя, во втором горячие газы служат для переноса тепла внутрь печи (теплопередача происходит за счет конвекции и излучения горячими газами). Третий случай является модификацией двух предшествующих, но ближе подходит к первому, так

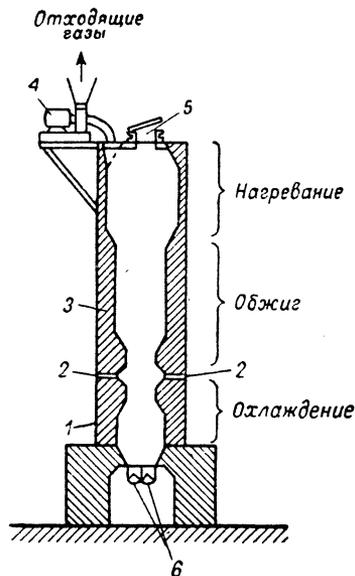


Рис. III-47. Шахтная печь для обжига известняка:

1 — холодильник; 2 — горелка; 3 — печь;
4 — вентилятор; 5 — загрузочное отверстие; 6 — разгрузочные отверстия.

как образование тепла происходит при прямом контакте с более низкими частями слоя. Тепло отходящих газов применяется для предварительного нагрева поступающей в печь твердой фазы и воздуха для горения. В качестве топлива могут быть использованы газ, нефть или порошкообразный уголь, вводимый в топку через сопла.

Для загрузки печи применяют ковшовые элеваторы, скипы-подъемники и подъемные краны. Время пребывания и скорость опускания материала контролируются согласованным действием разгрузочного механизма. Разгрузка твердой фазы может быть периодической (ручной, через разгрузочную задвижку) или непрерывной. Газы подаются воздуходувкой или протягиваются из воздуховода вытяжным вентилятором. В обычных условиях скорости опускания твердого материала и продувания потока газа постоянны (так называемое «устойчивое состояние»).

Использование шахтных печей для обжига известняка описано Эзбом¹. Печь для проведения такого процесса изображена на рис. III-47. Производитель-

¹ A z b e, Rock. Prods., (Aug. — Nov. 1945); (Jan. 1946).

ность современных установок достигает 14 650—19 500 кг/(м²·сутки) при высоте печи 9—24 м. Например, один агрегат шахтной обжиговой установки загружается кусками известняка размером 125 мм. Площадь поперечного сечения печи составляет 5,1 м², высота 11,4 м. Тяга равна 125 мм вод. ст., что эквивалентно 10,7 мм напора на 1 м высоты. Скорость горения газа равна 22,2 м³/(м²·мин). В каждой печи за сутки обжигается ~80 т известняка, что соответствует 14 200 кг/сутки на 1 м² поверхности печи, или 1240 кг/сутки на 1 м³ активного объема печи. Количество тепла, необходимое для обжига известняка (1,785 кг СаСО₃/кг СаО)¹:

	Q, ккал/кг СаО
Нагрев известняка до 900° С	480
Теплота диссоциации известняка	670
Нагрев извести до 1315° С	97
Общее количество тепла, затраченное на получение извести в обжиговой печи	1247
Тепло, отнятое от извести в холодильнике	309

Размер и форма частиц загружаемого материала определяют суммарную поверхность, на которую может переноситься тепло, а также глубину проникания (т. е. глубину, на которую должно пройти тепло, чтобы достичь центра каждой частицы). Кроме того, размер и форма частиц обуславливают характер беспорядочной засыпки материала в печи и объем пустот для прохода газа. Так, если размер частиц уменьшается, величина их поверхности увеличивается, а глубина проникания тепла уменьшается. Оба эти фактора должны положительно сказываться на характеристике печи, однако при малом размере частиц нагрузка колонны обладает большим гидравлическим сопротивлением для прохода газа, в результате чего увеличивается мощность, необходимая для поддержания напора газового потока.

В узкой фракции рассеянного материала процент пустот (обычно 37%)² не зависит от размера частиц. В нерассеянном материале размер частиц колеблется в широких пределах, а также объем пустот уменьшается; в результате происходят нарушения режима движения газа. Так как время, необходимое для проникания тепла в слой, изменяется в зависимости от размеров частиц, небольшие частицы перегреваются, в то время как ядра крупных частиц не успевают прокалиться. При обжиге известняка крупные куски (размером 100—200 мм) предпочтительно обрабатывают в шахтных печах, тогда как частицы размером <75 мм обжигаются во вращающихся калцинаторах.

Общая поверхность частиц, определенная по их размерам и форме, отличается от так называемой «эффективной» (активной) поверхности, действительно подвергающейся действию газового потока. На практике считают, что примерно 10—15% общей поверхности эффективно в отношении теплопередачи при обработке нерассеянных частиц.

Частицы неправильной формы имеют большую величину поверхности, чем частицы правильной формы (увеличение достигает 25%). Зависимость активной поверхности от размера частиц дана на рис. III-48. Кри-

вая А соответствует прокаленной поверхности при допущении 50%-го объема пустот и частиц кубической формы. Семейство кривых В относится к обычно применяемым на практике нерассеянным частицам неправильной формы.

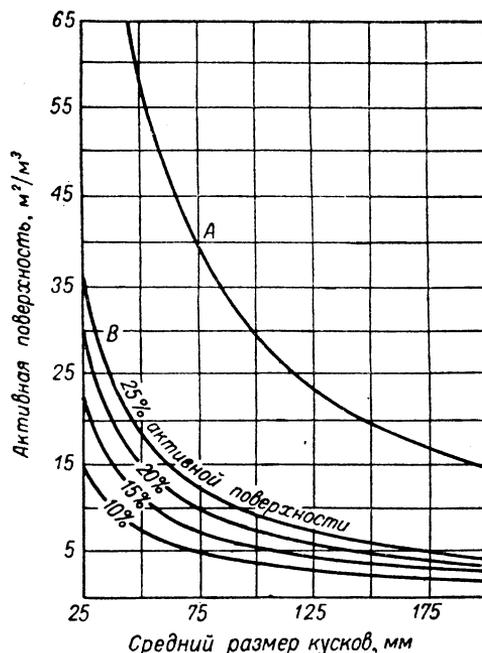


Рис. III-48. Зависимость активной поверхности от размеров частиц [A z b e, Rock. Prods., 48, 81 (Sept. 1945)].

Законы, которым подчиняется движение потока через слой насадки, приведенные в гл. II первого тома

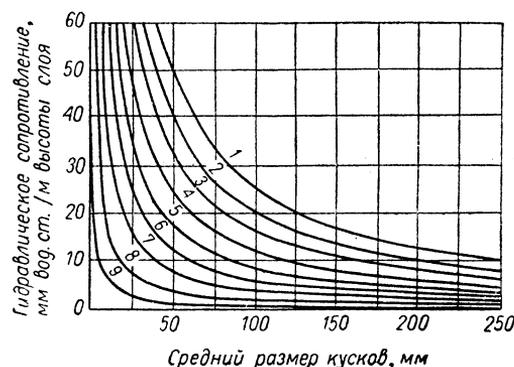


Рис. III-49. Зависимость коэффициента трения в газе от размеров частиц при обжиге известняка [A z b e, Rock. Prods., 48, 81 (Sept. 1945)]:

удельный расход газа, м³/(мин · м² сечения слоя): 1—30; 2—27; 3—24; 4—21; 5—18; 6—15; 7—12; 8—9; 9—6.

справочника, применимы и к шахтным печам. Так как гидравлическое сопротивление слоя обусловлено размерами и формой промежуточных пустот, горизонтальной и вертикальной неоднородностью слоя, изменением

¹ A z b e, Rock. Prods. 48 (10), 102 (1945).

² В отечественной литературе принят термин «порозность слоя», обозначающий долю пустот в слое. Считается также, что для большинства случаев $\epsilon_0 \approx 0,4$, т. е. 40%. — Прим. ред.

состава газа во время прохождения через аппарат и другими рабочими факторами, для правильного расчета необходимы опытные данные по обрабатываемому материалу.

Зависимость коэффициента трения в газе от размера частиц при обжиге известняка приведена на рис. III-49. Эти данные были получены на действующей обжиговой установке.

Сведения о теплопередаче и математической обработке данных в случае движения потока газа через слой насадки можно найти в гл. III первого тома справочника или специальной литературе¹.

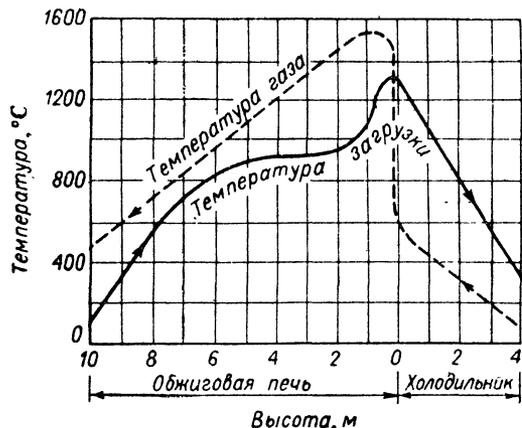


Рис. III-50. Примерное распределение температур твердого материала и газа в шахтной печи для обжига известняка.

Приближенное распределение температур твердого материала и газа в шахтной печи для обжига известняка показано на рис. III-50. В промышленной практике избыток воздуха для сгорания обычно не превышает 20%. Термический к. п. д. хорошо оснащенной и работающей в установившемся режиме обжиговой печи достигает 80%.

Установки каталитического крекинга

Установка каталитического крекинга системы «Термофор» применяется для получения высококачественного бензина (увеличиваются выходы дистиллята легких фракций и уменьшаются выходы топливных остатков). Установка представляет собой один из многих типов используемых при нефтеочистке реакторов со слоем, движущимся под действием силы тяжести. Детальное описание этой установки и проводимого в ней процесса можно найти в литературе².

Первая промышленная установка каталитического крекинга системы «Термофор» была введена в действие в 1943 г. В 1950 г. запущена аналогичная установка, в схему которой введен мощный реактор, расположенный над обжиговой печью, а вместо ковшевого элеватора для подъема катализатора используется эрлифт (рис. III-51). Исходный материал нагре-

вается фракционными потоками, соединенными с рециркулирующими потоками, и затем загружается в реактор как смесь пара и жидкости. В каталитической секции регенерированный катализатор медленно движется под действием силы тяжести вниз по колену затвора из напорного бака в реактор. Запирающий поток греющего пара или дымового газа движется противотоком снизу вверх, позволяя увеличить давление от атмосферного в напорном баке до $p_{\text{наб}} = 1,05 \text{ ат}$ в реакторе. Поток катализатора в реакторе медленно движется вниз через реакционный слой постоянной толщины, проходит мимо коллекторов вторичного пара, через зону очистки и самотеком поступает в обжиговую печь, где контактирует с движущимся противотоком топочным газом, имеющим низкое содержание кислорода в верхней части печи. По мере движения катализатора сверху вниз по печи температура его поднимается за счет сгорания кокса, а затем снижается при соприкосновении с потоком входящего воздуха. Из нижней части печи, где потоки воздуха и катализатора движутся противотоком и выделяется топочный газ, катализатор поступает в холодильник. За счет образования пара в холодильниках удаляется избыточное тепло сгорания кокса, и

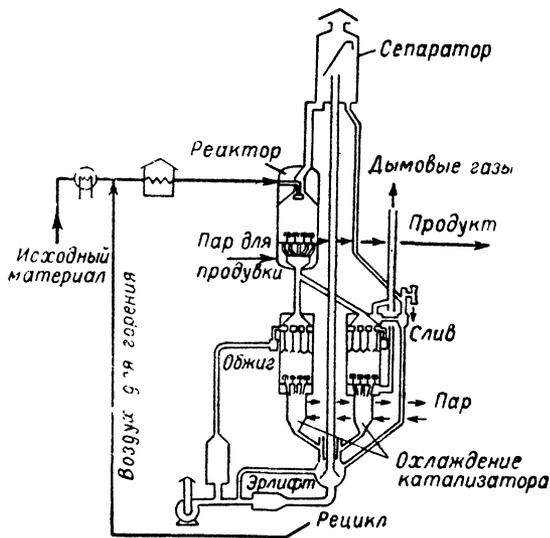


Рис. III-51. Установка каталитического крекинга с эрлифтом (система «Термофор»).

охлажденный до необходимой температуры катализатор возвращается в реактор. Регенерированный катализатор перетекает в коллектор подъемника, куда поступает воздух под низким давлением ($p_{\text{наб}} = 0,14 \div 0,21 \text{ ат}$), и перемещается в напорный бак. Здесь катализатор отделяется от воздуха и затем, заканчивая цикл, движется в трубу затвора. Обычно в таких установках применяется синтетический катализатор в гранулах.

Установки имеют различные размеры, соответствующие производительности по исходному материалу от 270 до 5100 т/сутки и скорости сгорания углерода от 725 до 13660 кг/ч. Типовые рабочие условия в реакторе: объемная скорость 1—2,5 ед. объема/(ч·ед. объема), объемное соотношение катализатор : нефть равно 2—5, средняя температура составляет 450—510° С.

¹ Wilkie, Hougen, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 41, 445 (1945). — Hurt, Ind. Eng. Chem., 35, 522 (1943). — Furnas, US Bur. Mines Bull., 309, 1929.

² Petrol Refiner, 37, 9 (1958).

Охладители и сушилки для гранулированных материалов

Слой, движущийся под действием силы тяжести, применяют для охлаждения и сушки экструдированных кусочков и брикетов, получаемых в результате проведения процессов увеличения размеров частиц.

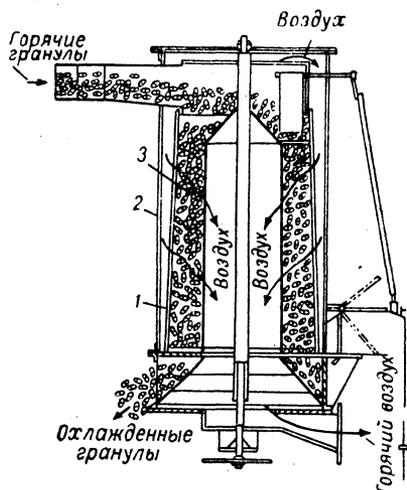


Рис. III-52. Вращающийся холодильник для гранулированного материала:

1 — перфорированный цилиндр; 2 — наружный кожух; 3 — сетка.

Вращающийся холодильник (рис. III-52) снабжен неподвижным стальным кожухом, под углом к которому присоединен цилиндр для подачи воздуха (газа) и

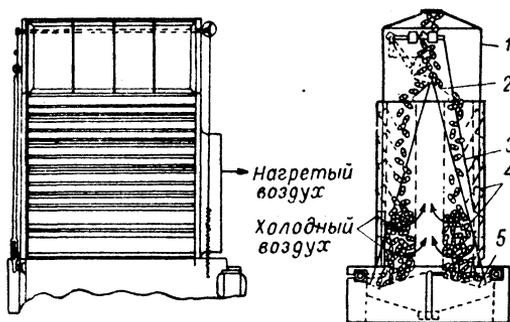


Рис. III-53. Вертикальный жалюзийный холодильник для гравитационного слоя:

1 — бункер; 2 — клапан из нержавеющей стали; 3 — цепь; 4 — жалюзи; 5 — устройство для регулируемой разгрузки.

твердой фазы (обычно пневмотранспортом). Цилиндр имеет отверстия для подвода дополнительного количества воздуха, обеспечивающего оптимальную циркуляцию. Кожух окружает вращающуюся кабину, которая представляет собой внутренний сетчатый цилиндр с наружным перфорированным корпусом. Воздух, входящий в кожух установки, циркулирует (перекрестным

током) сквозь слой гранул и удаляется через центр колонны. Обычно вращающееся разгрузочное отверстие и воздушный затвор размещаются под перфорированным корпусом. Регулировка разгрузки производится автоматически.

В другой конструкции холодильника с перекрестным током используется прямоугольный кожух, разделенный на три вертикальных секции (рис. III-53). Твердый материал движется сверху вниз в две наружные секции, в то время как воздух (в качестве охлаждающего или сушильного агента) поступает в аппарат через жалюзи в наружных стенках, проходит сквозь слой твердого материала и выходит через центральную секцию. Твердый материал разгружается в нижней части установки. Установки этого типа применяют также для сушки различных гранулированных материалов, пшеницы и других видов зерновых продуктов. Сушилки со слоем, движущимся под действием силы тяжести, более других пригодны для сушки гранулированных термочувствительных продуктов. При этом требуется продолжительная выдержка во время периода падающей скорости сушки.

Сушилки «Мульти-Лувр»

Жалюзийная сушилка «Мульти-Лувр» (рис. III-54) относится к числу гравитационных аппаратов, но значительно отличается от всех ранее описанных аппаратов такого типа. Всушиваемый твердый материал

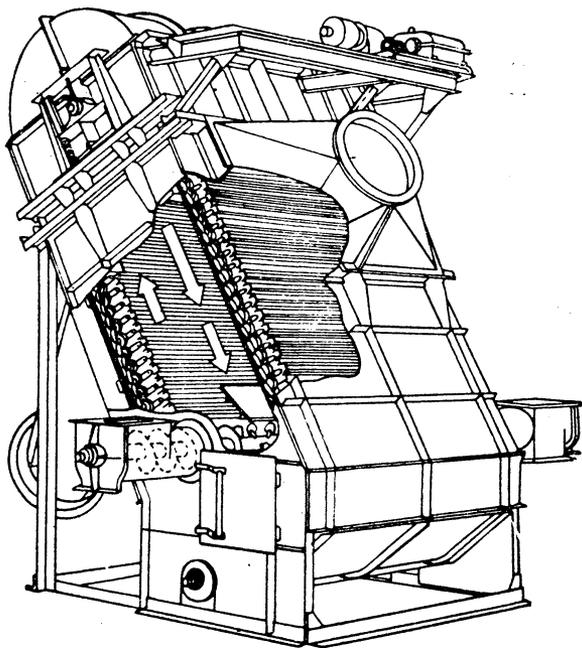


Рис. III-54. Жалюзийная сушилка «Мульти-Лувр».

подается шнеком внутрь аппарата с одной его стороны. Частицы материала поднимаются в верхнюю часть корпуса жалюзийным конвейером. В верхней точке материал сваливается и попадает в разреженный поток с наружной стороны поднимающихся жалюзи; частицы улавливаются лотком конвейера и медленно

Аппараты с фонтанирующим слоем

движутся дальше в сушилку, где подъем и падение повторяются. Газ вводится с обратной стороны конвейера и проходит сквозь заполненные материалом жалюзи, а также через слой твердых частиц, находящихся в свободном падении. С помощью соответствующих перегородок воздух может быть введен при двух или трех различных температурах, чтобы процесс шел по типу проточной сушилки, а ступень охлаждения может быть обеспечена при следующей сушке. Воздух может нагреваться любым удобным способом — паром или прямым сжиганием угля, нефти или газа.

Жалюзийные сушилки применяют для гранулированных свободно движущихся твердых материалов. Пыль, присутствующая в исходном материале, подвергается, вероятно, классификации в сушилке и удаляется с потоком отходящего газа. Для извлечения пыли используют циклоны, рукавные фильтры или проводят мокрую газоочистку в скрубберах.

Сушилки «Мульти-Лувр» очень удобны для быстрой непрерывной сушки гранулированных материалов с удалением большей части поверхностной влаги.

ТАБЛИЦА III-21

Данные о промышленных сушилках «Мульти-Лувр»¹

	Высушиваемый материал	
	соевая мука	битумный уголь (максимальный диаметр частиц 1С мм)
Ширина сушилки, м	1,8	3,6
Расстояние между центрами цепи, м	4,25	7,35
Влажность материала, % (на влажный продукт):		
начальная	18,0	7,0
конечная	10,7	2,0
Производительность (по высушенному продукту), кг/ч	6400	125 000
Скорость испарения, кг влаги/ч	570	6 700
Теплоноситель или топливо	Пар	Уголь
Расход теплоносителя или топлива, кг/ч	1120	1 375
Расход тепла, кДж/кг испаренной влаги	4000	5 600
Общая мощность, кВт	21,7	100

¹ Lapple, Clark, Dydal, Chem. Eng., 62, 11, 177 (1955).

Данные по сушке двух типичных материалов в сушилках «Мульти-Лувр» приведены в табл. III-21. Одним из первых и важнейших материалов, сушку которых производили в таких аппаратах, был уголь. Кроме угля, в сушилках «Мульти-Лувр» обрабатывали керамические материалы и гранулированные пластики. Имеется небольшое количество опубликованных данных о производительности этих сушилок, однако вследствие того, что циркуляция воздуха идет перекрестным током, методы, позволяющие определять размеры установки без проведения пилотных испытаний, отсутствуют,

Схема фонтанирующего слоя дана на рис. III-55. Смещение и взаимодействие в системе газ — твердое вещество достигается сначала в фонтанирующей струе, текущей снизу вверх через центр свободно насыпанного слоя твердых частиц. Затем частицы оседают, кружа кольцами, как в обычном слое, движущемся под действием силы тяжести противотоком к газу. Механизм движения потоков газа и твердой фазы в фонтанирующем слое был впервые описан в 1955 г.¹ Сушку изучал Кауан². Теоретическое уравнение для определения минимальной скорости, необходимой для начала фонтанирования, вывели Мадонна и Лама³.

Поток газа в фонтанирующем слое частично попадает в фонтанирующую струю, а частично циркулирует по круговым траекториям. Приблизительно 30% газа, входящего в систему, немедленно рассеивается в циркулирующие сверху вниз потоки. У верха слоя циркулирующие потоки достигают 66% от общего объема газа. Количество газа, циркулирующего по круговым траекториям, в любой точке слоя равно количеству газа, который должен проходить через свободно насыпанный слой твердых частиц при том же гидравлическом сопротивлении. Движение твердых частиц в циркуляционных потоках происходит сверху вниз и несколько внутрь. Как только фонтанирующий поток поднимает слой, в него входит все большее и большее количество теряющих скорость частиц и газ, переходящий в циркуляционные потоки. Объем твердых частиц, перемещенных фонтанирующей струей, составляет ~6% общего слоя.

На основе экспериментального изучения процесса получено эмпирическое уравнение для определения минимальной скорости потока, необходимой для фонтанирования, в колоннах диаметром от 75 до 300 мм:

$$u = \frac{D_c}{D} \left(\frac{D_0}{D} \right)^{0,33} \left[\frac{2gL(\rho_{тв} - \rho_r)}{\rho_r} \right]^{0,5} \quad (\text{III-14})$$

где u — скорость потока газа через слой, м/сек; D_c — диаметр частиц, м; D — диаметр колонны (или слоя), м; D_0 — диаметр входного отверстия для газа, м; L — высота слоя, м; $\rho_{тв}$ — плотность твердой фазы, кг/м³; ρ_r — плотность газа, кг/м³; g — ускорение силы тяжести, м/сек².

Диаметр входной трубы, скорость воздуха, диаметр слоя и его высота находятся в следующих условиях взаимной зависимости.

1. При данном диаметре слоя более высокие слои могут фонтанировать, когда размер входного отверстия для газа уменьшается (например, если в качестве газа, вызывающего фонтанирование, использовать воздух, то при слое, имеющем диаметр 300 мм и состоящем из пшеницы с размером зерен 3,2—6,4 мм, фонтанировать может слой высотой 500 или 2500 мм, когда

¹ Mathur, Gishler, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 2, 157 (1955).

² Cowan, Eng. J., 41, 5, 60 (1958).

³ Madonna, Lama, Am. Inst. Chem. Engrs J., 4, 4, 497 (1958).

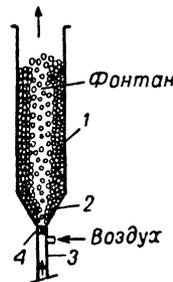


Рис. III-55. Схема фонтанирующего слоя: 1 — корпус; 2 — конус; 3 — воздушная труба; 4 — решетка.

диаметр подводящей воздух трубы равен соответственно 61 или 20 мм).

2. С увеличением диаметра слоя увеличивается также его высота, при которой начинается фонтанирование (если использовать отношение диаметров слоя и подводящей газ трубы $D/D_0=12$ для воздушного фонтанирования, то при диаметре слоя $D=230$ мм фонтанирование происходит при высоте слоя $L=1650$ мм, тогда как при $D=300$ мм оно начинается при $L=2400$ мм).

3. Как следует из уравнения (III-14), скорость газа, необходимая для фонтанирования, увеличивается с высотой слоя и диаметром трубы, подводящей газ, и уменьшается, когда увеличивается диаметр слоя.

Данные о минимальной скорости воздуха, требуемой для фонтанирования слоя диаметром 150 мм, приведены в табл. III-22.

Изучая сушку древесных стружек, Кауан показал, что объемный коэффициент теплопередачи, который может быть получен в фонтанирующем слое, по крайней мере в 2 раза превышает коэффициент теплопередачи для вращающихся сушилок с прямым нагревом.

Масур сушил пшеницу непрерывно в фонтанирующем слое диаметром 300 мм после фонтанирующего холодильника диаметром 230 мм. При температуре входящего воздуха 180°C скорость сушки составила ~ 45 кг влаги/ч, а производительность 270 кг пшеницы/ч. Влажность материала в этом случае понизилась с 26 до 4%. Испарение происходило также в холодильнике за счет ошугимого тепла пшеницы. Максимальная температура сушки в слое была равна 50°C . Общий термический к.п.д. системы составил $\sim 65\%$.

Некоторые особенности техники фонтанирующего слоя описаны в патентной литературе¹. Фонтанирующий слой применим для свободно движущегося гранулированного твердого материала, слишком крупного для обработки во взвешенном состоянии, но еще слишком мелкого, чтобы обеспечить эффективное взаимо-

действие с газом в обычном слое, движущемся под действием силы тяжести.

ТАБЛИЦА III-22

Фонтанирующий режим движения различных материалов в стеклянной колонне диаметром 150 мм¹

Диаметр трубки, подводящей воздух, равен 9,5 мм.

Материал	Размеры частиц, мм	Истинная плотность, кг/м ³	Максимальная высота фонтанирующего слоя, мм	Минимальная скорость фонтанирования, м/сек
Бруцит	0,6	2500	700	0,14
Бобы lima	12,7×19	1330	290	1,13
Глина сланцевая	1	2060	910	0,31
Горох	6,3	1380	300	1,35
Гравий	$\sim 3,5$ $\sim 1,75$	2660 2620	635 1160	1,1 0,83
Зерна кофе	7,6×11,5	632	500	0,815
Мелкий песок	$\sim 0,6$	2220	685	0,19
Овес	3×10	—	480	0,615
Пшеница	3,2×6,35	1370	760	0,9
Семена:				
горчицы	2,2	1210	865	0,65
подсолнечника	8×12	—	380	0,78
рапса	1,75	1100	760	0,5

¹ Mathur, Gishler, Am. Inst. Chem. Engrs J., 1, 2, 157 (1955).

Кауан нашел, что при сушке ацетата целлюлозы в фонтанирующем слое размеры твердых частиц значительно уменьшаются. Это указывает на ограниченность применения этого способа для обработки некоторых хрупких материалов.

СИСТЕМЫ СО ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ

ОСОБЕННОСТИ УСТАНОВОК СО ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ

Рассмотрим слой гранулированных частиц, через который снизу вверх медленно движется поток газа. С повышением скорости газа увеличивается гидравлическое сопротивление слоя (сопротивление трения), которое приближенно можно выразить с помощью зависимости Кармана — Козени для неподвижного слоя. В результате увеличения скорости наступает момент, когда перепад давления становится равным весу слоя (на единицу площади его поперечного сечения) плюс трение слоя о стенки аппарата. При достижении этой точки могут произойти следующие явления: 1) слой расширится и газ сможет проходить в образовавшиеся между частицами промежутки, причем перепад давления не будет превышать веса слоя (приходящегося на единицу площади поперечного сечения); 2) весь слой поднимется потоком газа как поршень. Это явление наблюдается, если частицы материала не обладают текучестью и поэтому могут образовать свод между стенками аппарата. В большинстве случаев такой свод разрушается и материал падает вниз в виде комков или агрегатов частиц. Если комки падают так, что при этом

образуется открытый устойчивый канал достаточного размера, то большая часть газа устремится в этот канал, и хотя слой расширен, его структура будет далеко не однородной.

При дальнейшем увеличении скорости газа поры и каналы в слое становятся все шире и шире, а расстояния между частицами постепенно увеличиваются. Для материалов с большой текучестью порозность в конце концов становится такой большой, что состояние плотного слоя уже не может быть устойчивым и частицы местами начинают колебаться или циркулировать; это положение соответствует точке, в которой начинается взвешенное состояние и образуется устойчивый взвешенный слой. Дальнейшее повышение скорости приводит к общей циркуляции слоя, часто сопровождающейся сквозным прорывом восходящих потоков газа по каналам, содержащим относительно небольшое количество частиц (обычно в виде комков, движущихся сверху вниз).

Весь твердой фазы в потоке газа, описанную выше как плотнофазный взвешенный слой, Вильгельм и Кваку¹ назвали агрегативным взвешенным слоем

¹ Wilhelm, Kwauk, Chem. Eng. Progr., 44, 201 (1945).

¹ US Pat. 2786280.

(aggregative fluidization). Однако термины «взвешенный слой» или «взвешенное состояние» относятся ко многим системам газ — твердое или жидкость — твердое, находящимся под действием сил тяжести или вязкого трения.

Зенц и Отмер¹ представили графически (рис. III-56) все такие системы газ — твердое, в которых газ движется в направлении, противоположном направлению силы тяжести. Плотnofазный взвешенный слой отличается от большинства систем, описанных этими авторами, тем, что он находится в состоянии невесомости

крупных кусков, или грубоизмельченных частиц к слою мелких обеспечивает большую устойчивость процесса.

Скорость восходящего потока газа обычно колеблется между 0,15 и 3 м/сек. Эта скорость рассчитывается по движению потока в пустом аппарате и часто называется поверхностной скоростью (superficial velocity).

Великолепное описание плотnofазного слоя, взвешенного потоком газа, дано Морзе².

Примерами промышленного использования техники взвешенного слоя могут служить процессы газификации угля по Винклеру³ и крекинга нефти⁴. Обширную

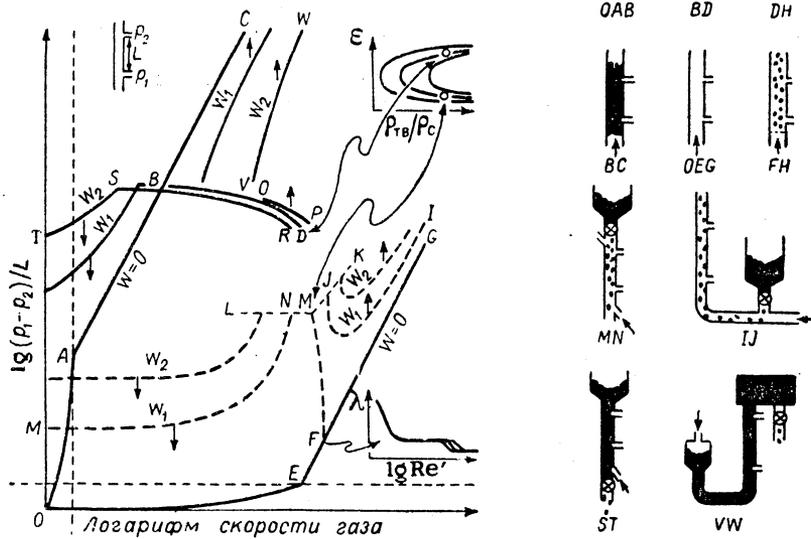


Рис. III-56. Фазовая диаграмма системы газ — твердое вещество в области восходящего потока газа.

W — массовая скорость твердой фазы, кг/(ч·м²); ϵ — доля пустот (порозность); ρ_{TB} — плотность частиц, кг/м³; ρ_c — плотность среды, кг/м³; λ — коэффициент трения; Re' — модифицированный критерий Рейнольдса.

или близком к нему. В дальнейшем термины «взвешенное состояние» или «взвешенный слой» будут относиться к плотnofазному слою, взвешенному потоком газа.

Размер частиц твердого материала, которые можно привести во взвешенное состояние, находится в пределах от <0,001 до ~65 мм. Обычно считают, что частицы с размерами 0,2—0,01 мм лучше всего подходят для образования однородного взвешенного слоя (с наименьшим количеством крупных пузырей газа). Крупные частицы вызывают неустойчивость слоя и сильные колебания его высоты. Мелкие частицы (<0,01 мм), даже сильно высушенные, действуют как влажные, образуя агломераты, а также трещины в слое, и приводят к фонтанированию. Добавка тонкоизмельченных частиц к слою, состоящему из грубых,

библиографию по взвешенному слою можно найти у Лева⁴, Зенца и Отмера⁵.

Применение метода взвешенного слоя почти во всех случаях требует разработки общей схемы оборудования, а не ее отдельных участков.

На рис. III-57 показано расположение всех частей установки, используемой в тех случаях, когда расход твердой фазы невелик (обычно в некаталитических процессах со взвешенным слоем или же в каталитических процессах, но только в тех случаях, когда деактивация катализатора совсем отсутствует или очень мала). На рис. III-58 изображена схема установки

¹ Morse, Ind. Eng. Chem., 41, 1117 (1949).

² Newman, Ind. Eng. Chem., 40, 559 (1948).

³ Gohr, Fluidization, New York, 1956, p. 102.

⁴ Leva, Fluidization, New York, 1959 (русский перевод: Лева, Псевдооживление, Гостехиздат, 1961).

⁵ Zenz, Othmer, Fluidization and Fluid Particle Systems, New York, 1960.

¹ Zenz, Othmer, Fluidization and Fluid Particle Systems, New York, 1960.

для каталитического процесса (например, крекинга нефти), где через реактор и регенератор катализатора проходят большие количества твердой фазы, находящиеся обычно во взвешенном состоянии. Важнейшими частями установки со взвешенным слоем являются: 1) реактор; 2) питатель для твердой фазы и расходомер для газа (жидкости); 3) разгрузочное устройство для твердой фазы; 4) пылеочистительное устройство для отходящих газов; 5) контрольно-измерительные приборы.

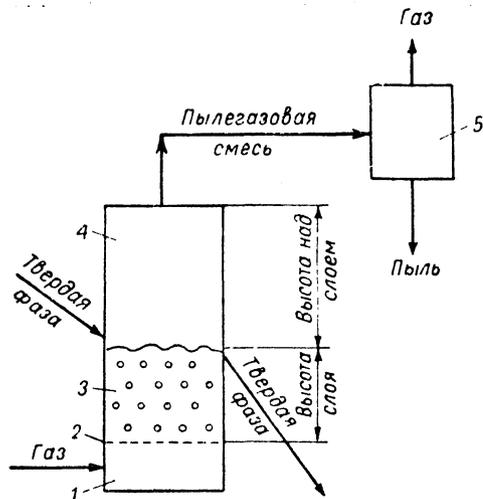


Рис. III-57. Схема проведения некаталитического процесса во взвешенном слое.

1 — распределительная камера; 2 — газораспределитель или поддерживающая решетка; 3 — взвешенный слой; 4 — свободное пространство над слоем; 5 — пылеотделитель.

Реактор. При переходе во взвешенное состояние слой твердых частиц превращается в расширенную взвешенную массу, имеющую сходство с кипящей жидкостью. Эта масса имеет нулевой угол естественного откоса, свой собственный уровень и принимает форму аппарата, в котором находится. Точно так же, как в аппарате, предназначенном для кипения жидкости, должно быть предусмотрено свободное пространство для вертикального расширения слоя твердых частиц и для загрузки материала. Обычно аппарат имеет форму вертикального цилиндра. Общая площадь поперечного сечения определяется по объемному расходу газа и допустимой или требуемой для приведения во взвешенное состояние скорости газа (при рабочих условиях). В некоторых случаях аппарат рассчитывается на минимальный допустимый расход газа, в других — на максимальный. Минимальную скорость лучше всего определять экспериментально, используя оборудование, в котором можно проводить визуальные наблюдения над действующим слоем. Скорость, требуемая для поддержания полной однородности слоя (чтобы крупные или легкие частицы не выделялись из приведенной во взвешенное состояние части), значительно отличается от минимальной скорости¹, необходимой для приведе-

ния слоя во взвешенное состояние. Максимальная скорость обычно определяется по уносу или загрузке твердого материала и находится в связи с размерами свободного пространства аппарата (поперечным сечением и высотой).

Высота слоя зависит от нескольких факторов:

- 1) пространственно-временного выхода;
 - 2) продолжительности контакта с газом;
 - 3) отношения L/D , требуемого для обеспечения многоступенчатости процесса;
 - 4) объема, необходимого для установки внутренних теплообменников;
 - 5) времени пребывания твердой фазы в аппарате.
- Обычно высота слоя в аппарате составляет не меньше 300 мм и не больше 15 м.

Как упоминалось ранее, реактор обычно представляет собой вертикальный цилиндр, однако в действительности ограничения формы не существует. Характерные особенности конструкции меняются в зависимости от рабочих условий, имеющегося в распоряжении объема и назначения. Отсутствие движущихся частей является большим преимуществом аппарата со взвешенным слоем.

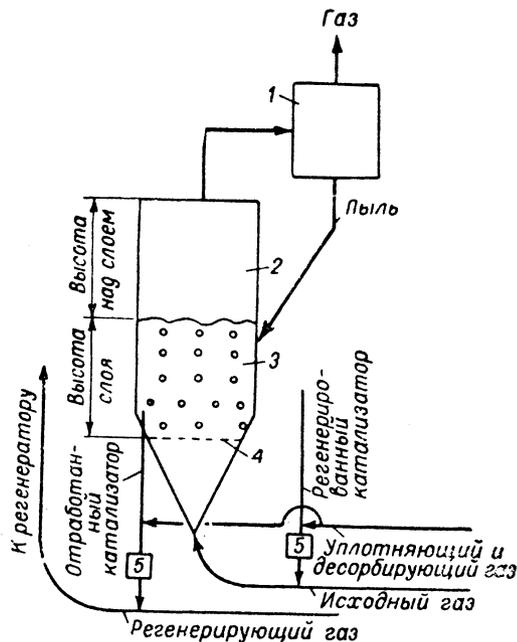


Рис. III-58. Схема проведения каталитического процесса во взвешенном слое:

1 — пылеотделитель; 2 — свободное пространство над слоем; 3 — взвешенный слой; 4 — газораспределитель; 5 — регулирующие вентили для твердой фазы.

Многие установки со взвешенным слоем работают при повышенной температуре. Наиболее экономичен стальной аппарат, футерованный огнеупорным материалом. Огнеупорный материал служит для двух важных целей: 1) изолирует металлический корпус от действия высокой температуры и 2) защищает металлический корпус от абразивного действия слоя, особенно при «выплескивании» частиц в верхнюю часть слоя в результате разрушения газовых пузырей. В зависимости от условий работы применяются различные

¹ В отечественной литературе минимальной скорости соответствует термин «первая критическая скорость» $w_{кр I}$, максимальной скорости — «вторая критическая скорость» $w_{кр II}$, или скорость уноса. — Прим. ред.

огнеупорные материалы для футеровки аппарата. Так, например, для умеренных температур, встречающихся при каталитическом крекинге нефти, может применяться армированный ганнит. Это позволяет также конструировать более крупные установки, чем допустимо при использовании для покрытия реактора керамических куполов.

Если по условиям проведения требуется более надежная футеровка, то у стены корпуса сначала укладывают слой изоляционного кирпича, а для его защиты — слой огнеупорного кирпича. Промышленный опыт показал, что такая футеровка успешно противостоит абразивному действию слоя в течение многих лет. Наиболее значительный износ огнеупорной футеровки вызывается крупными частицами при высоких скоростях газа (обычно наиболее резко износ выражен вблизи рабочего уровня взвешенного слоя).

Протечка газа за обмуровку и вызываемая этим коррозия корпуса наблюдаются на многих установках. При расчете и укладке огнеупора следует заботиться об уменьшении образования трещин в обмуровке. Даже небольшая утечка твердых частиц и газа может быстро вытравить большие проходы в мягком изоляционном кирпиче. Необходимо обращать внимание на герметичность газовых патрубков, которые часто крепятся к корпусу и выступают в огнеупорную кладку, а также смотровых и других отверстий в корпусе и обмуровке.

Во многих случаях холодные участки корпуса реактора служат причиной конденсации паров и большой скорости коррозии. Необходима соответствующая изоляция, чтобы содержать корпус и вспомогательные устройства при температуре более высокой, чем точка росы реакционных газов.

Сильное движение частиц во взвешенном слое требует установки прочного фундамента и надежных опор для реактора. Даже относительно малое перемещение корпуса по отношению к обмуровке реактора сокращает срок службы огнеупора.

Свободное пространство или высоту аппарата над слоем часто выбирают произвольно или на основе эксперимента. Установлено, что унос твердых частиц газами снижается, если расстояние (по вертикали) между верхней частью плотной фазы взвешенного слоя и выходным штуцером газового потока увеличивается. Лабораторные опыты показали, что разделение находящихся в газовом потоке твердых частиц по размерам уменьшается, когда высота свободного пространства над слоем или поверхность его поперечного сечения увеличиваются. Однако на некотором расстоянии (от нескольких сантиметров до нескольких метров) распределение твердой фазы по размерам частиц в разбавленной взвеси над взвешенным слоем будет такое же, как и в самом слое. При прогрессивно увеличивающемся расстоянии над слоем размер загруженных частиц становится меньше и масса твердой фазы в единице объема газа также уменьшается. Делались попытки обосновать величину уноса или правильность выбора высоты свободного пространства и его поперечного сечения, но до сих пор не получено общей корреляции, которой можно с уверенностью воспользоваться. Зенц и Отмер¹ предлагают метод расчета, однако еще следует доказать его пригодность путем сравнения с опытными данными, полученными в системе газ — твердое. Для корреляции и интерполяции этих данных пригодна зависимость $\lg E$ от $\lg (v^2/gZ)$, где E — унос, $кг/м^3$ газа;

g — ускорение силы тяжести, $м/сек^2$; Z — высота свободного пространства, $м$; v — скорость газа, $м/сек$; v^2/gZ — критерий Фруда. Чтобы получить надежные данные об уносе, необходимо помнить, что во взвешенном слое может происходить классификация частиц и точно так же, как и в жидкостной суспензии, большое влияние может оказывать флокуляция. Поэтому должны проводиться возможно более продолжительные опыты при одинаковых условиях (температуре, давлении, распределении частиц по размерам, составе газа и его скорости) с ожидаемыми в крупных установках.

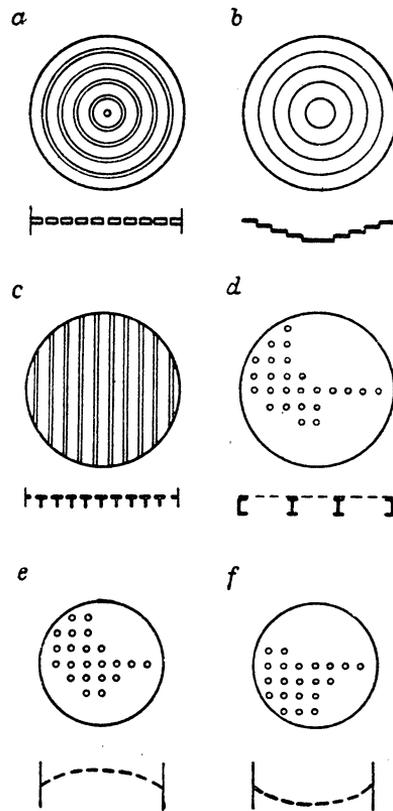


Рис. III-59. Распределительные устройства для газов, содержащих твердую фазу.

Конструкция устройства для распределения газа имеет большое влияние на организацию процесса во взвешенном слое. Распределители применяются в основном для двух случаев: 1) когда в поступающем газе содержатся твердые частицы и 2) когда поступает чистый газ. Обычно распределитель ставится для того, чтобы предотвратить обратный поток твердой фазы при нормальном процессе, иногда — во время остановки. Для обеспечения равномерного распределения необходимо ограничить приток газа (или газа и твердой фазы) таким образом, чтобы перепад давления не превышал 0,14 ат.

В случаях, когда через распределитель проходят газ и твердая фаза (например, в установках каталитического крекинга), применяется большое число конструкций: концентрические кольца (с отверстиями

¹ Zenz, Othmer, Fluidization and Fluid Particle Systems, New York, 1960.

между ними), расположенные в одной плоскости (рис. III-59, а), концентрические кольца, расположенные по конусу (рис. III-59, б), решетки из полос Т-образного или другого профиля (рис. III-59, с), плоские перфорированные металлические пластины, поддерживаемые или усиленные конструктивными элементами (рис. III-59, д), выпуклые или вогнутые перфорированные пластины (рис. III-59, е, ф). Последние две конструкции наиболее экономичны. Опыты показали, что выпуклая распределительная решетка лучше, чем вогнутая, так как при такой форме увеличивается поток газа (обычно большее количество газа проходит через центральную часть поперечного сечения). По прочности распределитель должен выдерживать различное давление движущегося через него потока. Кроме того, во время остановки слой (или часть его) поддерживается распределительной решеткой. Во время пуска может развиваться значительное давление на распределитель снизу вверх, когда осевшие твердые частицы (под решеткой) выносятся в реактор.

Когда исходный газ чистый или содержит только малые количества тонких твердых частиц, можно применять более сложные конструкции распределителей газа, чтобы добиться снижения капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Это наиболее четко выявляется, когда подается холодный не вызывающий коррозии газ. В этом случае распределительная камера, решетка и поддерживающие ее детали могут быть изготовлены из низкоуглеродистой стали, при использовании расчетных коэффициентов для нормальной температуры. Первая промышленная печь для обжига руды во взвешенном слое¹, введенная в эксплуатацию в 1947 г., была сконструирована из листовой низкоуглеродистой стали, покрытой литым огнеупором для изоляции стали от обжигаемого слоя. Литой огнеупор используется также для изготовления конусов, в которые помещены огнеупорные шары (конуса действуют как шаровые клапаны) для равномерного распределения газового потока. Шары изнашиваются неравномерно и растрескиваются.

Когда установка выключена (перекрывает вентиль, регулирующий подачу воздуха), обратный поток твердой фазы незначителен из-за образования свода (зависания материала). Если же остановка произошла из-за выключения двигателя центробежного вентилятора, то более высокое давление в реакторе должно снизиться и поток газа (содержащего твердые частицы) изменит направление на обратное и пойдет через суженные отверстия газораспределителя. На рис. III-60 показаны две конструкции входного отверстия для газа, которые успешно применяются для предотвращения обратного потока твердой фазы. Для достижения лучших результатов, независимо от устройства, путь газовому потоку преграждается и давление его снижается при проходе снизу вверх через слой.

Некоторые установки построены и успешно работают с газовыми распределителями щелевого типа, изготовленными из термостойкой стали. При этом требуется, чтобы и распределительная камера была выполнена также из термостойкого материала, благодаря чему исключается проблема коррозии, вызываемой конденсацией кислот и паров воды на холодном металле газораспределителя.

Когда подается горячий газ (например, в сушилки или под нижний газораспределитель в многослойных

установках), обычно применяют керамические сводчатые или термостойкие металлические решетки.

Самоукрепляющиеся (независимые) керамические своды успешно применяют уже свыше 10 лет в качестве газораспределителей при температурах $\sim 1100^\circ\text{C}$. Некоторые своды снабжают насадками из легированной стали для регулирования распределения воздуха. Однако керамическая арка имеет те же особенности, что и прессованное дноще, расположенное выпуклостью вниз: или отверстия в центре должны быть мельче, так чтобы сумма перепадов давления в распределителе и слое была постоянна по всему поперечному сечению, или верхняя часть арки должна быть выровнена так, чтобы толщина слоя в центре и по краям была одинакова, что особенно важно при использовании тонких слоев.

В некоторых случаях использовать распределительную камеру под решеткой невозможно (например, при введении в реактор воспламеняющейся или взрывоопасной смеси газов). Одним из решений вопроса является подвод общего газопровода ко множеству отдельных входных отверстий, расположенных в днище реактора. Таким образом можно поддерживать скорость газа в отверстиях выше скорости воспламенения или уменьшить объем газа в каждой трубе до создания концентрации, безопасной для взрыва. Другое решение заключается в обеспечении раздельных входных отверстий для различных газов в расчете на их смешение во взвешенном слое.

Большое внимание должно быть уделено влиянию равномерности распределения газового потока на рост пузырей в слое, на степень отработки катализатора, на выход и т. д. Отсюда следует, что наилучшим устройством для равномерного распределения газового потока была бы пористая мембрана. Этот тип газового распределителя редко используется в промышленной практике, так как требует абсолютно чистого газа. Практически пределы размеров отверстий зависят от размеров твердых частиц, конструкционного материала и типа газораспределителя. Если используется легко обрабатываемый материал, то процессы штамповки, сверления и сварки обходятся недорого и можно делать большое количество отверстий. Применение фура или барботажных колпачков обеспечивает горизонтальное распределение газа, так что при меньшем числе

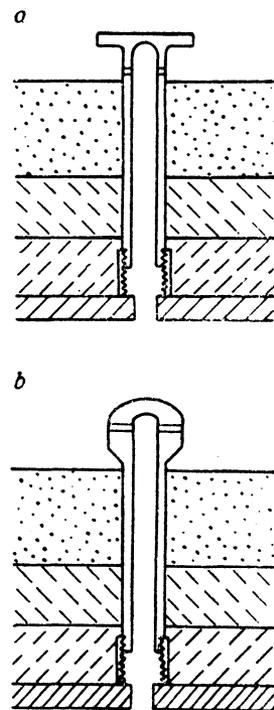


Рис. III-60. Входные отверстия для газа (не допускающие обратного потока твердой фазы):

а — с четырехугольным колпачком¹; б — с круглым колпачком (с набадашником).

¹ Matthews, Trans. Can. Inst. Mining a. Met., LII, 97 (1949).

¹ В оригинале «mortar board», что означает четырехугольный головной убор английских студентов и профессоров. — Прим. ред.

отверстий для входа газа можно достичь равномерно-го распределения потока.

В аппаратах с керамическим сводом обычно допускается только одно отверстие на кирпич при обычных размерах кирпича.

Питатели и расходомеры. В установках для каталитического крекинга, где добавка катализатора к загруженному ранее количеству мала и носит установившийся характер, пополнение катализатора можно производить из находящегося под давлением загрузочного бункера в одну из восходящих линий. Основной проблемой регулирования потока твердой фазы является поддержание в равновесии количеств катализатора, входящих и выходящих из реактора и регенератора. Перемещение твердой фазы из окислительной в восстановительную атмосферу или наоборот делает необходимым десорбцию адсорбированных частицами га-

Если твердая фаза является одним из реагентов (например, при обжиге руды), то ее поток должен быть непрерывным и неизменным, для того чтобы поддерживать постоянные условия работы реактора. Подача свободно движущихся гранулированных материалов во взвешенный слой не представляет затруднений. Для регулирования производительности и скорости подачи твердой фазы к питателю может применяться стандартное промышленное оборудование (взвешивающее и транспортирующее). Для введения твердых материалов в реактор используют шнеки, погружные трубы, гидравлические затворы (сифоны) и инжекторы. Трудности возникают, когда твердый материал не обладает хорошей текучестью (как, например, большая часть осадков, снятых с фильтра) и приходится применять специальные питатели. Одна из конструкций была предложена фирмой Кохинор — Вилланс.

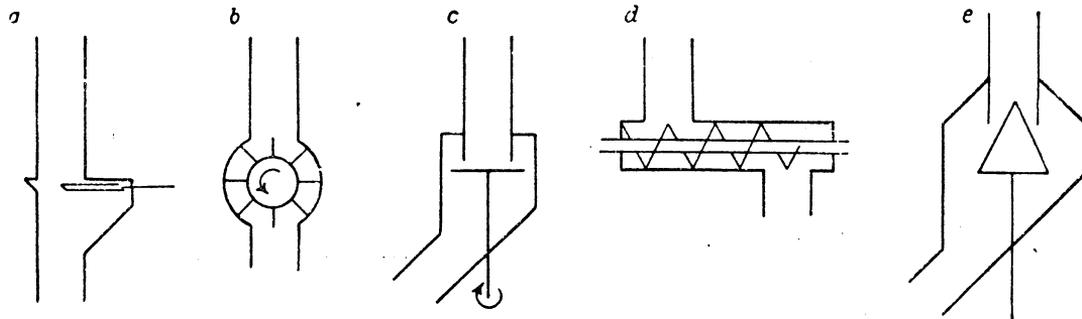


Рис. III-61. Устройства для регулирования потока твердой фазы: а — шибер; б — «звездочка»; в — тарельчатый питатель; д — шнек, е — конусный затвор.

зов. Обычно для этой цели используется водяной пар. Место выхода твердой фазы из взвешенного слоя в большинстве случаев находится под более низким давлением, чем место ввода питания в газ-носитель. Давление увеличивается у основания отводящей твердую фазу трубы благодаря введению газа в днище или через интервалы по высоте аппарата так, что перепад давления газа, текущего снизу вверх, противоположен напору спускающегося потока твердой фазы (в результате у основания аппарата давление будет ниже, чем в верхней его части). По этой напорной трубе поток твердой фазы может двигаться во взвешенном состоянии или без заметного расширения. В некоторых случаях давление над регулирующим расход твердой фазы вентилем должно поддерживаться одинаковым (или несколько выше) по сравнению с давлением в месте ввода материала в поток газа-носителя.

Конструкции вентиля для регулирования потока твердой фазы должны выбираться в соответствии с условиями процесса. Обычно запирающие вентили используют в связи с регулирующими. На рис. III-61 схематично показаны некоторые устройства для регулирования потока твердой фазы. Кроме них применяются другие, например приспособление¹ для установок каталитического крекинга, имеющее U-образное колено. В один конец трубы инжектируются переменные порции регенерированного воздуха. Изменения скорости инжекции воздуха ведут к изменению плотности потока, посредством чего и достигается регулирование скорости потока твердой фазы. Скорость циркуляции катализатора доходит до 70 т/мин.

После многих неудачных попыток подачи мокрого (а в некоторых случаях и студенистого) осадка с фильтра в реактор с помощью шнекового питателя было предпринято экспериментальное питание аппарата водной суспензией флотационных концентратов. Опыты прошли удачно. Описание этого метода питания можно найти в литературе¹. В тех же случаях, когда осуществима подача материала в виде суспензии, успешно проводится рециркуляция части твердого продукта для смешения с исходным материалом (особенно при сушке). Широко применяется также подача материала с помощью вращающегося тарельчатого питателя, смонтированного на крышке реактора и разгружающегося через механический дезинтегратор.

Влажный материал до поступления в слой обычно разрушается на отдельные частицы или агломераты очень тонких частиц под механическим воздействием или при быстром испарении воды. В некоторых случаях, если подаются куски сухого или полусухого материала (в частности сульфидов), то агломераты не разрушаются, а стремятся сплавить вместе. Так как размер агломерата во много раз больше размера самой крупной отдельной частицы, то агломераты будут выделяться из слоя, и в конечном счете взвешенный слой может превратиться в неподвижный слой, состоящий из агломератов.

Устройство для разгрузки твердой фазы. Тип разгрузочного механизма выбирается в зависимости от необходимости изоляции внутренней атмосферы реактора

¹ Gilfillan et al. J. Chem. Met. Mining Soc. South Africa (May 1954). — Solomon, Beal, Uranium in South Africa, 1946—1956.

¹ Esso Research and Engineering Co, model IV.

со взвешенным слоем от наружной атмосферы, а также в зависимости от последующей обработки твердой фазы. В простейшем случае для разгрузки материала в реакторе устанавливается перегородка, через которой пересыпается готовый продукт. Этот способ может применяться только тогда, когда выходящий газ или содержащая в нем пыль не вредные или когда допускается

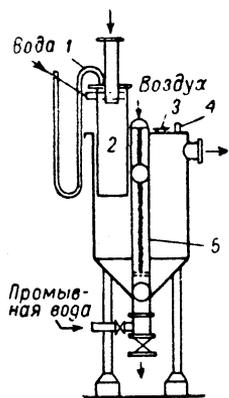


Рис. III-62. Сборник-гаситель для перетока или разгрузки твердой фазы из циклона [Gilfillan et al., J. Chem. Met. Mining Soc. South. Africa (May 1954)];

1 — гидравлический затвор; 2 — запорная труба; 3 — смотровое окно; 4 — воздушник; 5 — эрлифт.

подсос газа в аппарат из атмосферы, в которую разгружается взвешенный слой. Твердый материал

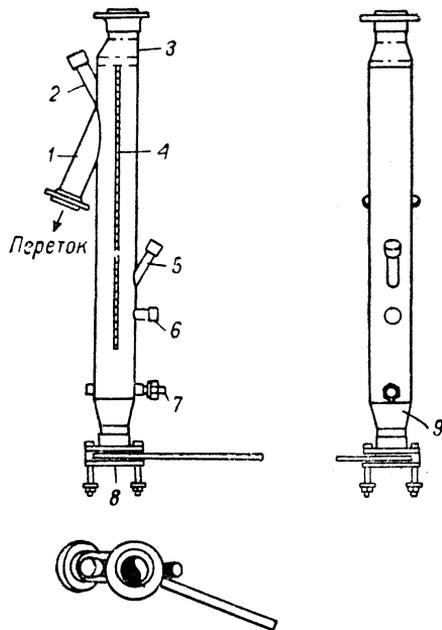


Рис. III-63. Схема перетока «Флюосил» (тип UA фирмы Дорр—Оливер):

1 — переточная труба; 2 — загрузочная труба; 3 — эксцентрический переходный патрубков; 4 — перегородка; 5 — патрубок для присоединения измерителя давления; 6 — разгрузочный клапан; 7 — труба для подачи вторичного воздуха; 8 — труба для подачи первичного воздуха; 9 — концентрический переходный патрубок.

газа, часто употребляется простой отсечный клапан (Parreg valve). Переток с помощью комбинации гидравлического затвора и промежуточного сборника-гасителя (рис. III-62) используется там, где допустимо увлажнение материала и где удаление или последующую обработку твердой фазы желательно проводить в виде суспензии. При разгрузке перетоком для уплотнения и очистки газа от твердых частиц используют простое и эффективное приспособление «Флюосил»

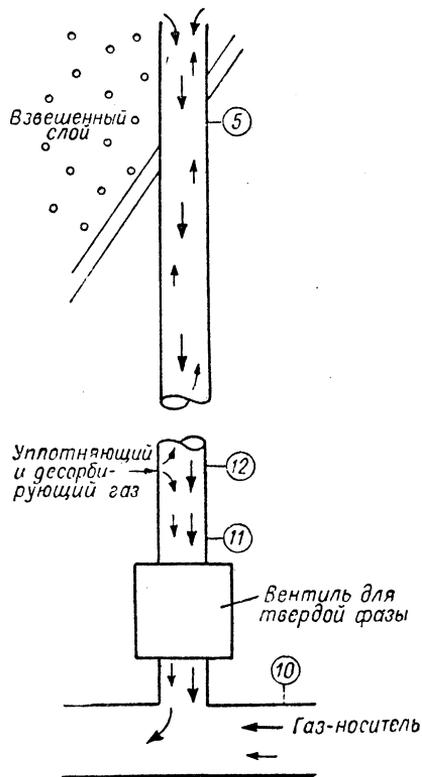


Рис. III-64. Переточная труба (цифры означают относительное давление).

(рис. III-63). Коленчатые затворы часто применяют в соединении с вентилями, регулирующими расход твердой фазы для того, чтобы уравнивать давления и извлекать уловленные или адсорбированные газы из твердой фазы. Действие такого затвора показано схематически на рис. III-64. Твердая фаза под действием силы тяжести движется из взвешенного слоя по колену затвора или спускной трубе. Уплотняющий или десорбирующий газ вводится близко к нижней части затвора. Этот газ движется в двух направлениях: сверху вниз и снизу вверх. Давления, указанные на рис. III-64, не соответствуют абсолютным величинам и имеют только относительное значение. Такие затворы конструируются для взвешенных или для осевших частиц.

Показанное на рис. III-65 устройство работает лучше, чем вентиль для регулирования расхода твердой фазы. Газ, введенный ниже обычного уровня слоя твердых частиц и выше разгрузочного отверстия, движется вверх и вниз от места входа. Относительная скорость в каждом направлении устанавливается самостоятельно, в зависимости от разности давлений

будет перемещаться из взвешенного слоя через отверстие даже в том случае, если давление над слоем незначительно ниже внешнего давления. Когда необходимо ограничить поток выходящего через отверстия

между точками ввода твердой фазы (питания) и разгрузки, а также от уровня твердой фазы в колене. Длина и диаметр разгрузочного желоба выбираются так, чтобы угол естественного откоса в спокойном состоянии предотвращал высыпание материала.

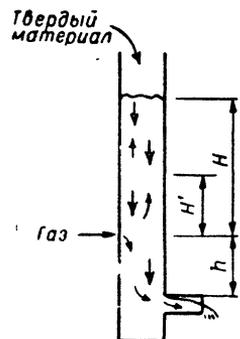


Рис. III-65. Разгрузочное устройство типа ICI (Imperial Chemical Ind., Brit. Pat. 607723).

Также может забиваться отдельными крупными кусками материала. Разгрузка через дно аппарата применяется в тех случаях, когда есть возможность сегрегации частиц в слое.

Для процессов, идущих при высокой температуре, используют пористые керамические фильтры или фильтры из сплавленного металла. В сложных установках должна быть предусмотрена продувка (регенерация) одного фильтра обратным потоком чистого газа пока в других аппаратах идет процесс фильтрования.

Циклоны обычно располагаются одним из способов, показанных на рис. III-66. Влияние расположения циклонов на высоту аппарата и общую высоту установки очевидно. Конструкции циклонов и данные о степени очистки можно найти в других разделах этой главы.

Разгрузка циклона во взвешенный слой требует особого внимания. Необходимо герметизировать нижнюю часть циклона так, чтобы степень очистки не уменьшалась при прохождении заметных количеств газа через разгрузочное отверстие (для твердой фазы). Обычно это достигается погружением колена затвора во взвешенный слой. Практика показала (особенно в случае слоя большой толщины), что нижний конец погруженной трубы должен быть защищен от действия крупных пузырей газа, которые, если позволить им подняться вверх по трубе, могут вынести некоторое количество тонких твердых частиц в циклон и мгновенно привести к высоким потерям. Для защиты от газовых пузырей можно прикрепить к низу трубы пластинку большего диаметра, чем труба. Пример расчета длины запорной трубы приведен ниже.

Пример. Заданы следующие условия: насыпная плотность слоя при скорости газа 0,3 м/сек составляет 1120 кг/м³; насыпная плотность продукта в циклоне при скорости газа 0,15 м/сек равна 640 кг/м³; начальная высота слоя (неподвиж-

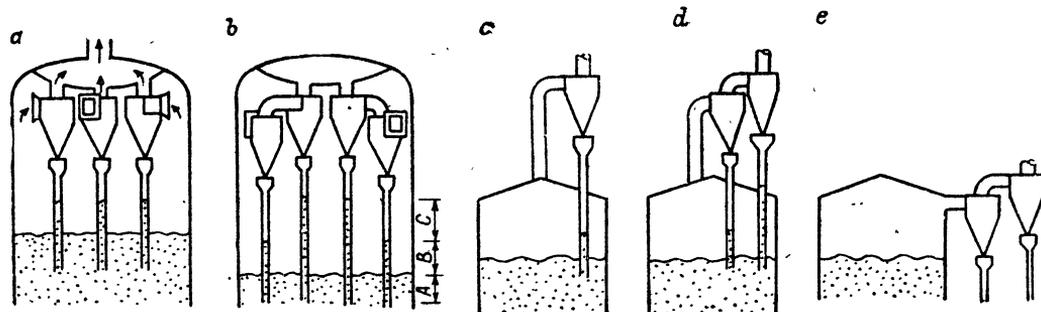


Рис. III-66. Соединения циклонов с реактором взвешенного слоя:

a — одноступенчатый внутренний циклон; *b* — двухступенчатый внутренний циклон; *c* — одноступенчатый наружный циклон (пыль возвращается в слой); *d* — трехступенчатый наружный циклон (пыль возвращается в слой); *e* — трехступенчатый наружный циклон (пыль собирается в наружный сборник).

В большинстве каталитических реакторов нет необходимости полностью выгружать твердый материал из аппарата, так как катализатор удерживается в системе и потери его (в виде очень тонких частиц, которые не задерживаются в системе пылеочистки) незначительны.

Пылеочистительные устройства для отходящих газов. Обычно необходимо регенерировать твердую фазу, содержащуюся в газе, покидающем свободное пространство над взвешенным слоем. Основная часть этих твердых частиц удаляется из газа в циклонах (см. стр. 301). Однако в некоторых случаях, особенно в установках малой производительности, для уменьшения содержания твердых частиц в газе применяют фильтры (без использования циклонов).

ного) 1,8 м; высота взвешенного слоя 2,44 м; гидравлическое сопротивление циклона 10 мм рт. ст. (или 1380 н/м²).

Для того чтобы обеспечить герметичность при пуске установки, нижний конец запорной трубы должен быть расположен на 1,5 м выше распределительной решетки (иными словами, погружен во взвешенный слой на 0,9 м). Давление на выходе твердой фазы из циклона обычно примерно на 5 мм рт. ст. (690 н/м²) ниже давления, развивающегося при разгрузке запорной трубы. Общее давление, уравнивающееся перетекающим слоем в погруженной трубе:

$$\Delta p_{\text{общ}} = 1120 \cdot 0,91 + 0,9 + 1380 + 690 = 12\,070 \text{ н/м}^2$$

$$\text{(или } 0,123 \text{ атм)}$$

Высота твердой фазы в погруженной трубе:

$$h_{\text{тр}} = \frac{12070}{640 \cdot 0,91} = 1,9 \text{ м}$$

Следовательно, расстояние от газораспределительной решетки до верхнего уровня твердой фазы в запорной трубе должно быть равным, по крайней мере, $H_{\text{общ}} = 1,5 + 1,9 = 3,4 \text{ м}$.

Чтобы учесть различные нарушения, изменения в распределении размеров частиц и другие факторы, применяют $H_{\text{общ}}$, равную 4,5 м.

В дополнение к обычной погруженной трубе используют другие различные устройства для возврата в слой твердых частиц, уловленных в циклоне (особенно в случае двухступенчатых циклонов). Некоторые из них показаны на рис. III-67. Наиболее часто применяется клапан, изображенный на рис. III-67, а. Пока нет общей согласованности относительно места установки этого клапана: устанавливать его ниже уровня слоя или в свободном пространстве над слоем. Разгрузка с помощью других устройств производится выше уровня слоя. В некоторых случаях должны уста-

плотность разбавленной фазы, кг/м^3 ; n — число первичных циклонов.

Часто после циклона приходится проводить вторичную газоочистку с помощью фильтров, электрофильтров, скрубберов. В тех случаях, когда не обязательно проведение сухой пылеочистки, можно отказаться от циклонов и проводить отделение более тяжелых частиц в скрубберах.

Контрольно-измерительные приборы. Обычно применяют простые стандартные чувствительные элементы, пригодные для непрерывного измерения температуры. Вследствие высокого абразивного действия слоя на горизонтальные поверхности, устанавливают защитные трубки (чаще всего вертикально). В сильно коррозионной атмосфере, где нельзя использовать металлические защитные трубки, успешно применяют короткие керамические трубки.

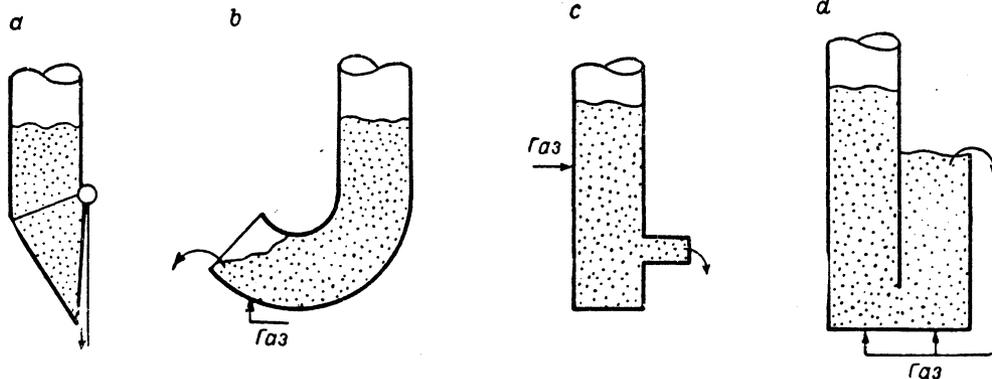


Рис. III-67. Уплотнения в циклонах с возвратом пыли в слой:

а — отсечный клапан (Dison Company); б — J-клапан; в — клапан типа ICI; д — разгрузочное устройство «Флюосил» (см. рис. III-63).

навливаться переточные трубы настолько больших размеров, чтобы выдерживать мгновенно возрастающие скорости твердой фазы, а также обеспечивать нужную герметичность для преодоления гидравлического сопротивления циклона с учетом разности плотностей слоя и выгружаемого из циклона материала. Отмечено, что в случае катализаторов для каталитического крекинга, плотность твердой фазы, собранной в первом циклоне, по существу одинакова с плотностью взвешенного слоя. Однако, как правило, плотность материала, выходящего из первого циклона, обычно меньше плотности взвешенного слоя. Каждый последующий циклон собирает более тонкие и менее плотные частицы твердой фазы. Скорость газа в отводящей трубе циклона меньше скорости в слое (обычно равна ее половине).

Шрофф¹ построил номограмму для определения размеров переточных труб в реакторах и регенераторах установок каталитического крекинга со взвешенным слоем.

В основе номограммы лежит уравнение:

$$\frac{n\pi D^2}{4} = 3600 \frac{V\rho}{G}$$

где D — диаметр переточной трубы циклона, м; V — расход паров при нормальных условиях, $\text{м}^3/\text{сек}$; ρ —

Несмотря на успешно проводимые измерения давления в слое с помощью трубок-датчиков, изготовленных из пористых материалов, большинство распространенных измерительных устройств состоит из продуваемой трубки, помещенной в слой в строго вертикальном положении. Минимальный внутренний диаметр такой трубки составляет 12,7—25,4 мм. Объемная скорость продувки обычно достигает 1,7 $\text{м}^3/\text{ч}$. Измерения давления производятся на различных расстояниях по высоте слоя для того, чтобы определить уровень слоя. Это делается нанесением на график перепадов давлений между двумя или более точками слоя и давлением в свободном пространстве над слоем в зависимости от уровня, на котором размещаются датчики, а также экстраполированием к нулевому перепаду давлений. Отделение двумя точками отрезка на линии покажет номинальный уровень слоя с постоянной насыпной плотностью. Однако зона всплесков и выбросов в верхней части слоя имеет меньшую плотность, чем весь слой; следовательно, в действительности твердая фаза поднимается на большую высоту, чем показывает график.

Из-за пульсаций в слое необходимо демпфирование контрольно-измерительных приборов (манометра, тягомера и т. д.).

Измерение расхода потоков чистых газов не представляет затруднений. Измерения загрязненных газовых потоков обычно избегают. Расход твердой фазы

¹ Shroff, Chem. Processing (August 1959).

регулируют, не проводя его измерения, а устанавливая косвенным путем — по температуре, уровню давления, активности катализатора, анализу газа и т. д. Во многих случаях обжига о скорости подачи твердой фазы судят по цвету прокаленного материала.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ

Возможности применения взвешенного слоя разнообразны. Во многих случаях достигнут успех и метод внедрен в промышленную практику, в других — он находится в стадии полупромышленного исследования, а в третьих — лабораторного. Обычно взвешенный слой используют для контактирования в системе газ — твердое, однако в некоторых случаях присутствие газа или твердого материала нужно только для организации взвешенного слоя и достижения, таким образом, конечного результата.

Характерные случаи использования взвешенного слоя:

- I. Химические процессы:
 - 1) каталитические;
 - 2) некаталитические:
 - а) гомогенные;
 - б) гетерогенные.
- II. Физическое контактирование:
 - 1) теплопередача
 - а) во взвешенный слой и из него;
 - б) между газом и твердой фазой;
 - в) регулирование температуры;
 - г) между отдельными точками в слое;
 - 2) смешение твердых материалов;
 - 3) перемешивание газов;
 - 4) сушка
 - а) твердых материалов;
 - б) газов;
 - 5) увеличение размеров частиц (агломерация);
 - 6) измельчение;
 - 7) классификация:
 - а) извлечение тонких частиц из твердой фазы;
 - б) извлечение тонких частиц из газа;
 - 8) адсорбция — десорбция;
 - 9) термообработка;
 - 10) нанесение покрытий.

КАТАЛИТИЧЕСКИЕ ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

Развитие и внедрение результатов исследований взвешенного слоя твердой фазы было наиболее успешным в области катализа. В частности, развитие каталитического крекинга с начала сороковых годов нашего столетия привело к созданию конструкций, показанных на рис. III-68. Установки всех типов построены или запатентованы.

Высокая скорость переноса твердой фазы между регенератором и реактором позволяет осуществлять процесс экзотермического сгорания угля и мазута в регенераторе с эндотермическим крекингом нефти в реакторе так, что температуру в обоих аппаратах обычно можно регулировать без применения дополнительных механизмов теплового контроля. Высокая скорость циркуляции катализатора также позволяет эксплуатировать катализатор при постоянно высокой активности. Следует отметить, что реактор и регенератор в установках каталитического крекинга обычно рассматриваются совместно, чтобы полученные результаты можно было согласовать с рассчитанными для реактора пол-

ного смещения. Значительные трудности встречались при увеличении размеров реакторов со взвешенным слоем, так как влияние числа ступеней, достигнутых при высоком отношении L/D , использованном в лабораторной или полупромышленной установке, как правило, сравнялось с более низким отношением L/D в промышленных установках.

Распространенные корреляции, основанные на определенных реакциях и катализаторах, или катализатор-подложках, показывают уменьшение степени превращения и выхода при уменьшении отношения L/D . Перемешивание газа и твердой фазы увеличивается, когда отношение L/D уменьшается¹.

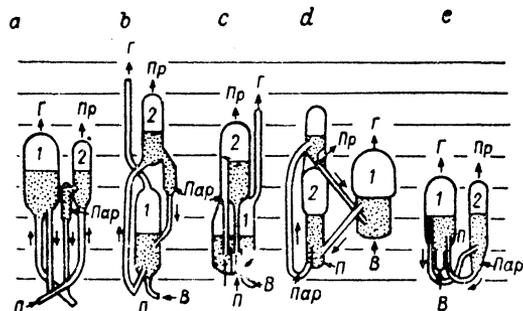


Рис. III-68. Установки для крекинга нефти во взвешенном слое [Sittig, Chem. Eng., (May 1953)]:

a — Standart Oil Development, model III; b — Union Oil Products; c — Model A. M. W. Kellogg Orthoflow; d — Shell Development Co.; e — Esso Research and Engineering Co., model IV.
1 — регенератор; 2 — реактор; В — воздух; Г — газ; П — питание; Пр — продукт.

Если адсорбция продуктов и реагентов незначительна, результатом будет уменьшение степени превращения, так как диаметр реактора увеличивается. Если адсорбция значительна, то в результате уменьшается степень превращения и выход. Очевидность повышения степени превращения при ограничении перемешивания показана Рутхуффом². Когда при расчете реактора выбираются средства, чтобы прекратить или уменьшить циркуляцию твердой фазы (например, устанавливаются перегородки), то при теплопередаче может образоваться местный перегрев («горячие пятна»). На рис. III-69 приведены 4 способа (a—d) разделения реактора со взвешенным слоем на ступени.

НЕКАТАЛИТИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

Некаталитические гомогенные реакции обычно проводятся во взвешенном слое для достижения полного перемешивания газов и регулирования температуры. Твердые частицы в слое действуют как аккумуляторы или излучатели тепла и облегчают таким образом теплопередачу к газу от теплопередающей поверхности или в обратном направлении. К реакциям этого типа относятся хлорирование углеводородов и окисление газообразного топлива.

¹ M a y, Chem. Eng. Progr., 55, 49 (Dec. 1959). — R e m a n, Chem. a. Ind. (London), 1955, 46.

² R u t h u f f, Petrol. Refiner, 32 (10), 113 (1953); World Petrol., 24, 42 (1953).

Процессы, осуществляемые в гетерогенных системах с помощью метода взвешенного слоя, имеют большее промышленное применение даже по сравнению с крекингом нефти. Обжиг сульфидных, мышьяковистых

руд для получения ценных металлов — так используют взвешенный слой в металлургии. На рис. III-70 показаны основные аппараты для проведения этих процессов.

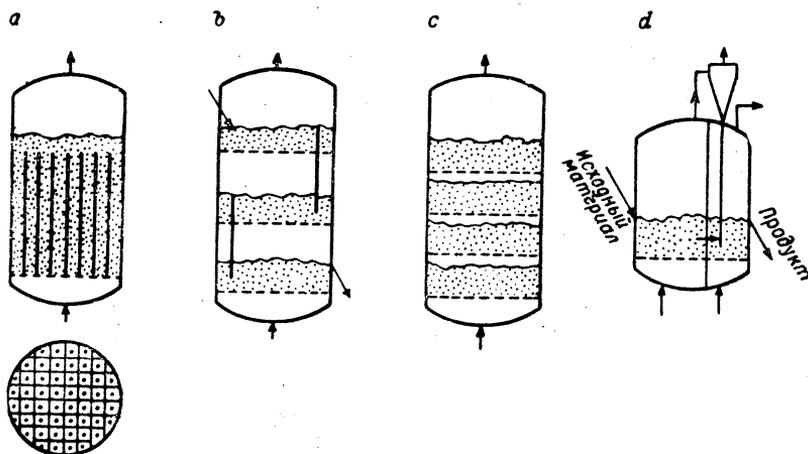


Рис. III-69. Способы организации ступеней во взвешенном слое.

и сурьмяных руд для облегчения процесса извлечения золота или серебра, обжиг пирита, пирротина

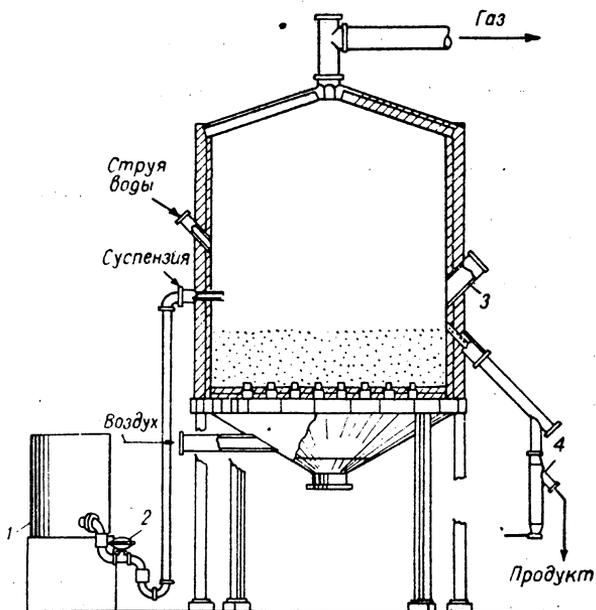


Рис. III-70. Реактор со взвешенным слоем «Доррко» (одноступенчатый):

1 — сборник суспензии; 2 — насос для подачи суспензии; 3 — горелка; 4 — разгрузочное устройство «Флюосил».
Материал подается в виде суспензии.

Промышленная установка для прокаливания известняка, доломита и глины с применением взвешенного слоя изображена на рис. III-71. Топливо сжигается во взвешенном слое материала, чтобы получить требуемое количество тепла. В качестве топлива в промышленных установках используют нефть, природный газ и уголь. Температура регулируется довольно точно для получения, например, извести с высокой степенью пригодности для гашения. Примерно половина подвергающегося прокаливанию доломита также обрабатывается во взвешенном слое.

Необходимость использования крупных кусков известняка для обжига сильно ограничивает применение метода. Использование мелких кусков приводит к низким выходам, вызываемым большими потерями от уноса пыли.

Фосфориты обжигаются для удаления углеродистых соединений перед разложением серной кислотой. В США действуют несколько пилотных установок для прямого восстановления гематита в железо. Литейная земля также прокаливается для удаления органических соединений и избавления от мелочи.

Интересной особенностью этих высокотемпературных процессов (прокаливания и обжига) является непосредственное введение тяжелой нефти, природного газа или угля во взвешенный слой материала. Сгорание происходит при довольно низких температурах пламени без атомизации или вспышки.

Расчет систем снабжения топливом и воздухом позволит использовать преимущества взвешенного слоя при перемешивании воздуха и топлива.

Теплопередача. Для того, чтобы отнять или подвести тепло во взвешенный слой, используются теплопередающие поверхности. Обычно эти поверхности изготавливаются в форме вертикальных труб, соединенных коллекторами сверху и снизу. Также применяются и горизонтальные байонетные соединения. Во всех таких случаях должно быть обеспечено предохранение теплопередающей поверхности от абразивного действия слоя.

или других природных содержащих серу руд для получения SO_2 в производстве серной кислоты, а также обжиг медных, кобальтовых и цинковых сульфидных

Расчет коэффициентов теплоотдачи приведен в гл. III и IV первого тома. Обычно скорость теплоотдачи во взвешенном слое увеличивается в 5—25 раз по сравнению с чистым газом.

Коэффициент теплоотдачи от твердой фазы к газу и от газа к твердой фазе обычно находится в пределах 15—50 $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, или 17—60 $\text{вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$. Однако при большой поверхности твердых частиц в

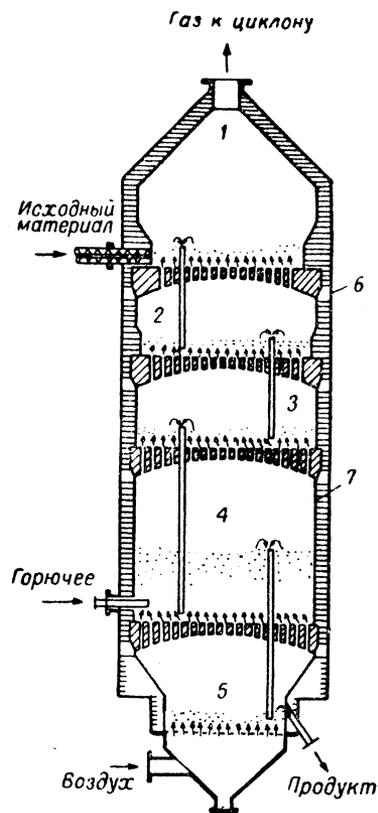


Рис. III-71. Обжиговая печь для производства извести во взвешенном слое;

1—3 — нагревательные камеры; 4 — камера прокаливания; 5 — камера охлаждения; 6 — стальной корпус; 7 — футеровка.

единице объема слоя (например, 45 000 $\text{м}^3/\text{м}^3$ для частиц размером 60 $\mu\text{м}$ при насыпной плотности 640 $\text{кг}/\text{м}^3$) в результате теплоотдачи происходит быстрое выравнивание температур газа и твердой фазы. При хорошем распределении газа существенное выравнивание температур наблюдается на расстоянии 25—75 мм выше газораспределительной решетки.

Теплопроводность слоя в вертикальном направлении измерялась в лаборатории. Она составляет величину порядка 30 000—45 000 $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, или 39 000—52 000 $\text{вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$. В горизонтальном направлении (для частиц размером ~3 мм) теплопроводность, по данным крупномасштабных экспериментов, равна 1500 $\text{ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, или 1700 $\text{вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$. За исключением экстремальных отношений L/D температура во взвешенном слое постоянна — обычно разность тем-

ператур в двух различных точках слоя не превышает ~5 град.

Регулирование температуры. Вследствие быстрого выравнивания температур во взвешенном слое их регулирование можно проводить несколькими путями:

1) адиабатическое — регулируется скорость подачи газа и твердой фазы таким образом, что тепло реакции отводится как осязательное тепло с отходящими газами и твердым материалом или недостаток тепла восполняется дополнительным притоком газа или твердой фазы;

2) циркуляцией твердой фазы — тепло отводится или поступает в слой при помощи циркулирующего потока твердой фазы;

3) циркуляцией газа — газ возвращается в слой, проходя теплообменники, где он охлаждается или нагревается;

4) инъекцией жидкости — добавляется легко испаряющаяся жидкость, так, чтобы теплота испарения была равна избытку энергии;

5) охлаждением или нагреванием поверхностей, введенных в слой.

Перемешивание твердой фазы. Очень сильная циркуляция твердой фазы от верха до низа слоя обеспечивает полное перемешивание частиц. Во всех практических случаях для слоя с отношением L/D от 4 до 0,1 можно считать, что в аппарате с непрерывно идущей реакцией достигается полное смешение твердой фазы.

Периодическое смешение с помощью взвешенного слоя успешно используется во многих отраслях промышленности. В этом случае размеры аппарата практически не ограничиваются.

Во всех описанных выше процессах имеется в виду, что у твердой фазы одинаковые характеристики. Очевидно, что твердые частицы с очень различными характеристиками будут отделяться (классифицироваться) одна от другой при некоторой скорости газового потока. Два взвешенных слоя, расположенные один над другим, в результате могут превратиться в неподвижный (размещенный ниже) и взвешенный (верхний). Последнее встречается часто при агломерации из-за расплавления в слое или плохого рассеивания слипающихся частиц, подаваемых в слой. Иногда проблема решается увеличением скорости газового потока; однако может потребоваться улучшение системы подачи питания или изменение рабочих условий. Другой способ заключается в непрерывном или периодическом удалении агломератов со дна слоя.

Перемешивание газа. Перемешивание вертикально проходящих через слой потоков газа в аппаратах со взвешенным слоем никогда не было проблемой. Однако перемешивание по горизонтали идет очень плохо и требуются очень эффективные газораспределители, чтобы два газа могли хорошо смешаться во взвешенном слое.

Сушка. Установки взвешенного слоя для сушки твердых материалов (угля, цемента, известняка и некоторых других) получили всеобщее признание. Экономические соображения делают применение этих установок особенно заманчивым, когда должны обрабатываться крупнотоннажные материалы (рис. III-72). Расход топлива составляет 835—1050 $\text{ккал}/\text{кг}$ испаренной влаги, или 3480—4450 $\text{кДж}/\text{кг}$, а общая мощность для приведения в действие вентиляторов, питателей и т. д. равна примерно 0,082 $\text{квт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$ испаренной влаги. Максимальный размер применяемого исходного материала (угля) — 38 мм . Однако строятся установки для сушки кусков угля размером до 63 мм .

Одним из важнейших преимуществ сушилок этого типа является точное регулирование заданных условий, например, можно предопределить, какое количество свободной влаги допустимо в материале для предотвращения пылеобразования при последующей обработке продукта. Сушилка взвешенного слоя может использоваться и в качестве классификатора, так как процессы сушки и классификации в ней заканчиваются одновременно.

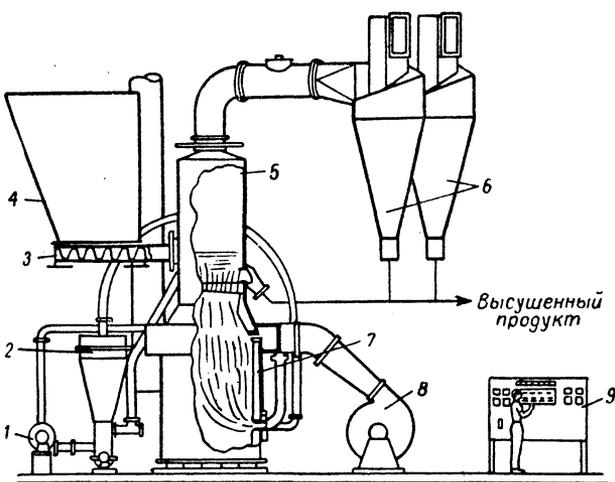


Рис. III-72. Сушилка угля во взвешенном слое:

1 - вентилятор; 2 - распылитель; 3 - питатель; 4 - бункер для влажного угля; 5 - сушилка «Флюо-Солид»; 6 - циклоны; 7 - нагреватель воздуха; 8 - воздуходувка; 9 - панель управления.

Установлено¹, что при сушке частиц доломита размером $-4,75$ мм топочными газами со скоростью $1,2$ м/сек были достигнуты следующие результаты удаления тонкоизмельченных частиц:

Размер частиц, мм	% извлечения
$-0,2 + 0,15$	60
$-0,15 + 0,10$	79
$-0,10 + 0,075$	85
$-0,075 + 0,045$	89
$-0,045$	89

Увеличение размеров частиц. При соответствующих условиях может происходить рост твердых частиц. Рост частиц связывается с расплавлением или размягчением некоторой части материала слоя. Например, добавка кальцинированной соды к исходному карбонату кальция при обжиге для получения извести, смолы при коксовании во взвешенном слое, сульфатов свинца или цинка при обжиге цинкового концентрата вызывают агломерацию твердых частиц, действуя таким же образом, как добавка связующих во вращающихся грануляторах. Движение частиц в слое приводит к образованию сферических гранул. Если размер этих частиц не регулировать, то будет происходить сегрегация крупных частиц из слоя.

Измельчение. Во взвешенном слое наблюдаются три основных механизма уменьшения размеров твердых частиц: истирание, стеклование (удар) и растрескивание под действием термических напряжений.

Из-за беспорядочного движения твердых частиц в слое происходит некоторый износ их поверхности за счет истирания. Обычно истирание очень мало и составляет около $1/4-1\%$ массы твердых частиц за сутки.

В области высоких скоростей газа наблюдаются более высокие скорости истирания за счет разрушения частиц при соударениях. Этот способ так называемого «струйного измельчения» применяется в некоторых установках для коксования с целью регулирования размеров частиц¹. Струйное измельчение наблюдается также (но в меньшей степени) в точке ввода газа, где перепад давлений, обеспечивающий газораспределение, определяется во входном отверстии или трубе, которая производит разгрузку прямо в слой.

Термическое растрескивание материала часто происходит, когда кристаллы перестраиваются при переходе из одной формы в другую или когда образуется новое соединение (например, при прокаливании известняка). В таких случаях возникающих усилий иногда достаточно для уменьшения размеров частиц (до размеров основных кристаллов).

Все описанные выше механизмы измельчения могут привести к полному истиранию материала, которое начинается сразу же после введения твердой фазы во взвешенный слой.

Классификация. Отделение тонкоизмельченных частиц от грубых также может быть проведено во взвешенном слое (см. стр. 286). Однако для экономического обоснования (т. е. для определения начальной стоимости, расхода мощности на сжатие газа, приводящего слой во взвешенное состояние, и т. д.) этого факта недостаточно, исключение составляют случаи, когда классификатор со взвешенным слоем необходимо строить только с целью проведения классификации.

Предполагается, что при соблюдении некоторых условий взвешенный слой можно применить для удаления тонких твердых частиц из потока газа.

Адсорбция-десорбция. Установка для фракционирования газов показана на рис. III-73.

Влияние адсорбции и десорбции на характеристику взвешенного слоя обсуждается на стр. 284.

Термообработка. Некоторые твердые материалы требуют термообработки для повышения их ценности или для облегчения дальнейшей обработки. Обычно в этом случае применяют многосекционные установки с целью сохранения тепла (уменьшения тепловых потерь) — см. рис. III-71.

Нанесение покрытий. Взвешенный слой термопластичных смол может быть использован в качестве защитного покрытия металлических частей. Подготовленная соответствующим образом и нагретая металлическая деталь полностью погружается во взвешенный слой

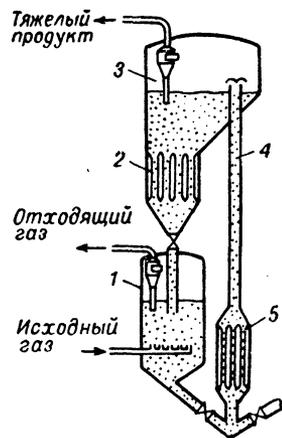


Рис. III-73. Установка со взвешенным слоем для фракционирования газа:

1 - адсорбер; 2 - холодильник; 3 - сепаратор; 4 - переточная труба; 5 - десорбер.

¹ Wall, Ash, Ind. Eng. Chem., 41, 1247 (1949).

¹ Griffin et al., AIChE National Meeting, December 1957.

твердых частиц. Нагретый металл расплавляет термопластик, который и образует на поверхности детали непрерывное однородное покрытие.

КОНВЕЙЕРНЫЕ ВИБРОСУШИЛКИ С ПРЯМЫМ НАГРЕВОМ

Конвейерная вибросушилка представляет собой разновидность аппарата со взвешенным слоем, в котором обработка твердых частиц в восходящем потоке газа происходит при совместном действии газодинамических и механических сил. Нагретый газ вводится в нагревательную камеру, расположенную под движущейся лентой, через газоходы и гибкие рукавные соединения, проходит через сетку конвейерной ленты, образуя взвешенный слой высушиваемого материала, и выходит через вытяжную трубу (рис. III-74). Если для

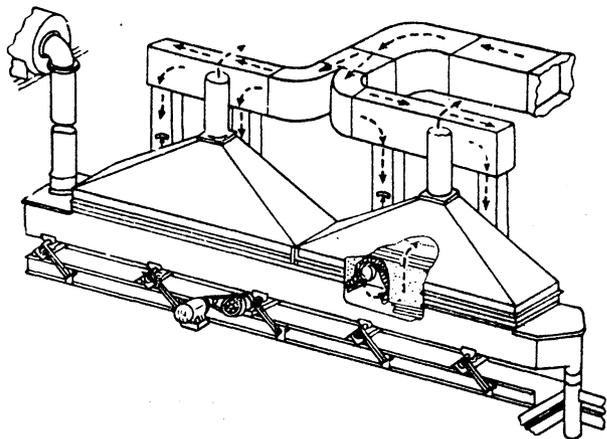


Рис. III-74. Схема ленточной вибросушилки.

охлаждения используется окружающий воздух, то стороны нагревательной камеры могут быть открыты и в этом случае применима простая вытяжная система. Так как для обеспечения постоянной скорости и равномерного распределения газового потока гидравлическое сопротивление сетки может составлять несколько сантиметров водяного столба, то утечка или подсос газа или выдуваемого материала из сушилки предотвращается уравниванием давления над сеткой и атмосферой путем регулирования напора в системе воздухоудвка — вытяжной вентилятор.

Установки изготавливаются шириной от 300 до 1200 мм. Длина их колеблется от 3 до 45 м, однако в большинстве промышленных ленточных вибросушилок длина каждой секции не превышает 9—15 м. Мощность, необходимая для вибропривода, составляет ~0,445 кВт на 1 м² ленты. Стоимость сушилок 1100—1700 долл. на 1 м² поверхности ленты для конструкции из низкоуглеродистой (мягкой) стали, причем более высокая цифра относится к установкам с малой поверхностью (~1 м²), а более низкая — с большой (~10 м²). Изготовление конструкции из нержавеющей стали увеличивает стоимость сушилки на ~60% (по ценам 1960 г.).

В общем, ленточные вибросушилки обладают очень экономичной теплопередающей поверхностью (как по себестоимости, так и по рабочей стоимости). Произ-

водительность их ограничивается в первую очередь скоростью воздуха (величина скорости должна быть такой, чтобы не возникало чрезмерных требований к пылеочистке).

В табл. III-23 приведены предельные скорости воздуха, пригодные для обработки различных твердых материалов. Обычно сушилки этого типа удовлетворительно работают при размере частиц >0,15 мм. Использование ленточных сушилок с непрямым нагревом исключает проблему пылеочистительных устройств, но в этом случае производительность ограничивается величиной коэффициента теплоотдачи, который достижим на конвейере (см. гл. IV первого тома).

ТАБЛИЦА III-23

Максимальные значения скорости воздуха, проходящего через сетки вибрационного конвейера¹

Размер отверстий в сетке		Скорость воздуха, м/сек	
мм	меш	$\rho_{ТВ} = 2000 \text{ кг/м}^3$	$\rho_{ТВ} = 1000 \text{ кг/м}^3$
0,074	200	0,23	0,13
0,15	100	0,69	0,38
0,30	50	1,37	0,89
0,60	30	2,60	1,82
0,85	20	3,20	2,50
1,70	10	6,85	4,5
4,0	5	11,5	7,95

¹ По данным Carrier Conveyor Corp.

Когда для взвешенного слоя применяется неподвижный аппарат, все обрабатываемые твердые частицы должны переходить из неподвижного во взвешенное состояние; тяжелые фракции (которые не может поднять вверх восходящий поток газа) падают на дно аппарата и могут в конце концов забить отверстия газораспределителя.

Введение механических вибраций в систему взвешенного слоя имеет следующие преимущества.

1. В аппарате можно обрабатывать фракции твердых частиц, не приводимые во взвешенное состояние. Хотя эти фракции могут опускаться из слоя на сетку, направленные вибрации заставляют их перемещаться к разгрузочному концу бесконечной ленты. Рассев или сортировка исходного материала может проводиться менее строго, чем в стационарном взвешенном слое.

2. Механические вибрации уменьшают начинающееся каналобразование.

3. Приведение во взвешенное состояние может достигаться при более низких давлениях и скорости газа. Доказано, что на вибросушилках взвешенное состояние слоя прекращается, когда выключается вибратор.

Ленточные вибросушилки пригодны для сыпучих твердых материалов, содержащих большей частью поверхностную влагу. Время пребывания ограничивается скоростью движения ленты, (от 1,5 до 7,5 м/мин). Толщина слоя редко достигает 75 мм, хотя находится в обращении установки, которые могут нести слой толщиной 300—450 мм; в них также применяются плоские или трубчатые змеевики, погруженные в слой, чтобы обеспечить дополнительную поверхность теплопередачи.

Вибросушилки непригодны для волокнистых материалов, которые под действием вибраций могут пере-

путаться, а также для липких твердых частиц, которые могут скататься или прилипнуть к ленте.

Для расчета сушилок с прямым нагревом можно допустить, что средняя температура отходящего газа, покидающего слой, приближается к конечной температуре выгружаемого материала (применительно к простой установке, несущей слой толщиной 50—150 мм). Расчет тепловой нагрузки и выбор температуры поступающего в установку воздуха, а также его скорости (см. табл. III-23), вызывающей грубую сортировку материала, может обеспечить минимальное время пребывания материала в сушилке.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Система газ — твердое, в которой твердая фаза находится в разбавленном состоянии, носит название пневматической. Термин «пневматическая» применим здесь потому, что в большинстве случаев количество и скорость газа достаточны, чтобы вести подъем и перемещение твердой фазы, действуя против сил тяжести. Для пневматических систем характерны две особенности.

1. Пребывание данного материала в системе в среднем очень мало (обычно не больше нескольких секунд). Это означает, что любой процесс, проводимый в пневматической системе, не может определяться диффузией. Взаимодействие должно быть главным образом поверхностным, или размеры твердых частичек должны быть очень малыми, чтобы внутренние процессы тепло- и массообмена были, по существу, мгновенными.

2. На основе закона сохранения энергии система всегда находится в равновесии, например, газ (или твердая фаза) в какой-то момент обладает достаточной энергией, чтобы завершить работу над всеми твердыми частицами (или газом), присутствующими в системе в то же самое время. Важно, что в этом случае не происходит запаздывания в отклике, так что можно регулировать изменения или пуск и остановку системы без необходимости задерживать между циклами частично обработанный остаток твердых частиц или газа.

По этим причинам пневматическое оборудование особенно пригодно для обработки термочувствительных, легко окисляющихся, взрывоопасных или воспламеняющихся материалов, которые нельзя подвергать воздействию тех или иных условий процесса в течение длительного промежутка времени.

Пневматические установки могут удовлетворительно работать как периодически, так и непрерывно.

Обычно газ и твердая фаза движутся прямококом (исключением является противоточная распылительная сушилка). Способ взаимодействия газа и твердой фазы в пневматических системах лучше всего описывается как сквозная циркуляция, однако в условиях разбавления твердые частицы настолько свободно распределяются в газе, что, очевидно, не оказывают влияния одна на другую и по существу не создают сопротивления проходу газа.

Специальные конструкции пневматического оборудования, обсуждаемые здесь, следующие: 1) пневматические подъемники; 2) распылительные сушилки; 3) быстросействующие обжиговые печи.

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ПОДЪЕМНИКИ

Пневматический подъемник состоит из следующих частей: 1) длинной трубы или канала, по которому с высокой скоростью движется газ; 2) вентилятора для

Вибрационные конвейерные аппараты, в которых обеспечивается прямое контактирование твердых материалов с горячим влажным воздухом, недавно стали применяться также для агломерации тонких порошков (главным образом для приготовления агломерированных водорастворимых пищевых продуктов). С целью регулирования температуры входящего воздуха и точки росы к твердому материалу добавляют малые количества жидкости для конденсации на охлаждаемых входящими частицами поверхностях. Секция увлажнения следует непосредственно за секцией сушки горячим воздухом.

приведения газа в движение; 3) питателя для подачи и распределения твердых частиц в потоке газа; 4) циклона или другого устройства для отделения твердых частиц от газа. Кроме обычного применения для транспортирования твердой фазы, пневматические подъемники используют также для нагревания, охлаждения и сушки сыпучих материалов.

Питатель для твердой фазы может быть любого типа. Обычно применяют шнековые питатели, профили Вентури, высокоскоростные истирающие диски, рассеивающие мельницы и др. Правильный выбор питателя для получения равномерного начального рассеивания твердой фазы очень важен. Например, при использовании воздушной молотковой мельницы (типа мельницы Раймонда) в процессе сушки от 65 до 95% общего тепла может быть передано внутри мельницы, если весь горячий газ, с помощью которого происходит сушка, проходит через нее¹.

Для создания газового потока могут быть установлены как вытяжные, так и нагнетательные вентиляторы. Первые обычно предпочитают, когда система может действовать при незначительном отрицательном давлении. В этом случае пыль и горячий газ не будут выдвигаться из системы через неплотности. Циклоны выбираются как наиболее дешевые и легко очищаемые пылесосительные устройства; они обычно используются по крайней мере для первичной очистки газа. Если необходимо добиться максимального удаления пыли или вредных паров, то за циклоном устанавливают мокрый скруббер или рукавный фильтр.

Транспортируемый воздух нагревается греющим паром, электрическим током или топочным газом, прямым или непрямым способом. Для охлаждения используется окружающий воздух или воздух, охлажденный в холодильной установке. При обычных нагревательных или охлаждающих процессах, в течение которых не выделяется влага, часто применяется непрерывная рециркуляция транспортируемого газа. В случае рекуперации растворителей непрерывно рециркулирует инертный газ, проходящий периодически в пневматическом подъемнике через газовые холодильники и нагреватели.

Пневматические подъемники пригодны для транспортирования гранулированных и сыпучих материалов, распределенных в газовом потоке при условии, что частицы не налипают на стенки аппарата и не образуют агломератов. Липкие материалы (осадки с фильтра) во многих случаях можно диспергировать и частично подсушивать в дезинтеграторе с воздушной циркуляцией. Высушенный продукт может быть также возвращен в цикл, смешан со свежим исходным материалом,

¹ Gordon, Chem. Eng. Progr., 45, 8, 477 (1949).

после чего направлен снова в дезинтегратор для измельчения. Крупные куски, содержащие внутри влагу, подвергаются тонкому измельчению в молотковой мельнице. Возможно не только проведение сушки после измельчения частиц, но и получение тонкоизмельченного сухого продукта в одной ступени, исключая дополнительную обработку, требующуюся при раздельных сушке и измельчении. Во всех случаях применения пневматических систем требуется мгновенное завершение операции или процесса; внутренняя диффузия влаги не должна лимитировать процессы сушки и размеры частиц должны быть настолько малы, чтобы теплопроводность твердой фазы не контролировала процессы нагревания и охлаждения. Пневматические подъемники непригодны для абразивных материалов.

Хотя пневмотранспорт не применяют для измельчения, тем не менее пребывание в пневматическом подъемнике приводит к значительному уменьшению размеров частиц, особенно когда обрабатываются кристаллические или другие хрупкие материалы. Это явление может быть желательным или недопустимым, но должно учитываться при выборе системы. Истирание твердых частиц при пневмотранспорте подобно истиранию при обработке в струйной мельнице.

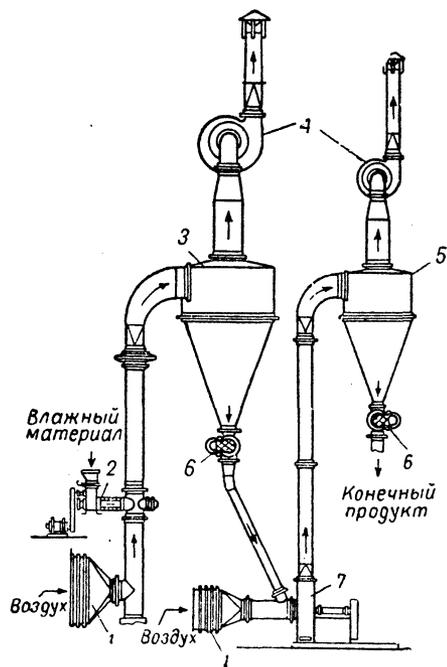


Рис. III-75. Двухступенчатая пневматическая сушилка:

1 — паровой калорифер для воздуха; 2 — мокрый питатель; 3 — циклон мокрой ступени; 4 — вентиляторы; 5 — циклон сухой ступени; 6 — воздушные затворы; 7 — мельница.

Пневматические подъемники могут быть одно- или многоступенчатыми. Одноступенчатые установки применяются для обычных процессов нагревания и охлаждения, а также сушки, сопровождающейся испарением небольших количеств поверхностной влаги. Многоступенчатые установки используются для сложных сушильных процессов (например, для сушки термочув-

ствительных материалов, содержащих большие количества влаги, а также материалов с начальным содержанием как внутренней, так и поверхностной влаги). Типичная двухступенчатая сушильная установка показана на рис. III-75. В ней объединены простая одноступенчатая пневматическая сушилка со второй ступенью, в состав которой входит мельница Раймонда.

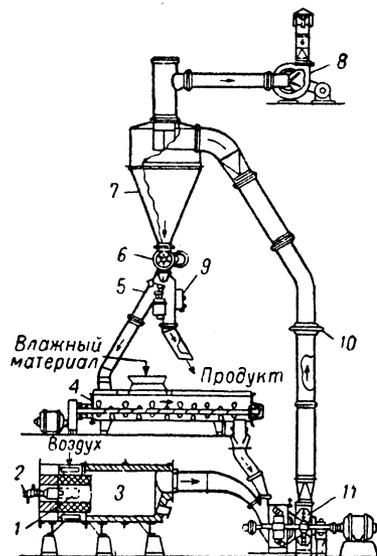


Рис. III-76. Одноступенчатая пневматическая сушилка:

1 — топка; 2 — горелка; 3 — нагреватель воздуха; 4 — смеситель; 5 — сепаратор; 6 — воздушный затвор; 7 — циклон; 8 — вентилятор; 9 — прибор, регулирующий продолжительность действия сепаратора; 10 — компенсатор; 11 — импеллерная мельница.

Вторая ступень обеспечивает полное высушивание после диспергирования комков и агломератов. Если требуется измельчить влажный материал, то можно изменить движение материала по ступеням на обратное или измельчать его в обеих ступенях. Системы такого типа применяются для сушки синтетических смол (например, полиэтилена и полипропилена).

На рис. III-76 показана одноступенчатая сушильная установка с лопастным смесителем, рециркуляционной трубой и мельницей Раймонда для тонкого измельчения (при диспергировании смеси исходного материала с обработанным в воздушном потоке). Такие установки проектируются для обработки осадков с фильтра или центрифуги, а также других липких или пастообразных материалов. В этих системах очень часто применяются также барабанные мельницы.

Характеристики различных продуктов, высушиваемых в пневматических сушилках, приведены в табл. III-24. Упомянутые в таблице сушилки аэрофонтанного типа по своему действию подобны обычным одноступенчатым пневматическим сушилкам (см. первую ступень на рис. III-75).

Методы расчета. В зависимости от термической чувствительности материала температура входящего воздуха находится в пределах 150—700°С. Для термочувствительных твердых материалов с высоким содержанием внутренней влаги можно использовать входящий воздух

ТАБЛИЦА III-24

Характеристика продуктов, высушиваемых в пневматических сушилках¹

Материал	Влажность, % (на влажный материал)		Производительность, кг продука/ч	Примечания
	начальная	конечная		
Гипс (сырой)	25 (суммарная)	5	3 170	Измельчение и прокаливание для штукатурных работ
Глина, обработанная кислотой	60	18	3 840	—
Глина (шарики)	25	0,5	3 620	Измельчение на 90% до —0,15 мм
Каолин, промытый водой и подсушенный	10	0,5	7 200	Измельчение на 99,9% до —0,045 мм
Карбоксилметилцеллюлоза	40	3	400	Измельчение на 80% до —0,075 мм
Клейковина (гранулы)	65	20	5 450	—
Клейковина (из сырой пшеницы)	70	10	230	Измельчение до —0,18 мм
Отбросы (жидкие)	82	0	8 400	Многоступенчатые системы, сушка и сжигание
Силикагель (катализатор)	53	10	5 000	—
Смола синтетическая	50	0,5	900	Двухступенчатая система
Уголь (размер частиц 9,5 мм)	11,5	1,5	72 500	Аэрофонтанная сушилка
Фармацевтические продукты	15	4	450	

¹ По данным Raymond Division, Combustion Engineering, Inc.

с высокой температурой. Испарение поверхностной влаги происходит, по существу, при температуре мокрого термометра. До тех пор, пока испарение не закончится (причем за это время воздух значительно охладится), пленка поверхностной влаги будет препятствовать повышению материалом температуры мокрого термометра для воздуха.

Пневматическая сушка применяется для материалов, имеющих начальную влажность от 3 до 90% (на влажный материал). Необходимый расход воздуха и производительность определяются нагрузкой по влаге, температурой входящего воздуха, а также влажосодержанием отходящего воздуха. Если последнее слишком велико, чтобы благоприятствовать полной сушке, т. е. если влажосодержание отходящего воздуха выше рав-

новесного с высушенным продуктом, нагрузка по газу и твердой фазе должна уменьшиться, так же как и температура входящего воздуха (см. табл. VII-9 в гл. VII первого тома).

Скорость газа в подъемной трубе должна быть достаточной для транспортирования наиболее крупных частиц. Она рассчитывается по методам, приведенным в гл. II первого тома. Для приближенных расчетов часто используется скорость, равная 23 м/сек, рассчитанная при температуре отходящего газа. Если в материале присутствует главным образом поверхностная влага и твердые частицы не надо подвергать предельному высушиванию, то движущая сила процесса приближается к значению логарифмической разности температур входящего и выходящего газов. Если же достигается полное высушивание, то температура твердого материала приближается к температуре отходящего газа (температуре сухого термометра). В большинстве случаев, когда внутренняя диффузия влаги не имеет большого значения, для приближенных расчетов принимается средняя логарифмическая разность температур газа на входе и на выходе из аппарата.

Несмотря на то, что пневматический транспорт рассматривается как метод контактирования разбавленных фаз и что в процессах нагревания, сушки, а также и охлаждения нагрузки по газу и твердому материалу малы, наблюдение над действующими пневматическими подъемниками показывает, что твердые частицы очень редко равномерно распределены в газовой фазе.

За редкими исключениями частицы движутся в ламинарном режиме, обтекая стенки подъемной трубы, где скорость потока минимальна. Редко происходит полная (или частичная) диффузия в газовую фазу даже от частиц с низкой плотностью. Скорости воздуха могут достигать 20—30 м/сек. Однако сомнительно, чтобы даже тонкоизмельченные и легкие материалы достигали более 80% этой скорости, тогда как тяжелые и крупные фракции могут перемещаться при меньших скоростях¹.

О пневматических сушилках опубликовано очень мало данных, которые могли бы быть положены в основу правильной теории расчета. Поэтому при выборе конструкции всегда необходимо проведение испытаний на пилотной установке. Считают однако, что значительное влияние скорости в пневматическом подъемнике обуславливается разностью скоростей между газом и твердыми частицами.

Один из способов приближенного расчета размеров установки состоит в применении объемного коэффициента теплопередачи (по аналогии с барабанными сушилками). Если принять, что эффективность взаимодействия представляет величину такого же порядка, как и эффективность, обеспечиваемая внутренней насадкой в барабанных сушилках, и что контролируется разность скоростей между потоками газовой и твердой фаз, то можно использовать для расчета объемного коэффициента теплопередачи уравнение (III-4).

Например, диаметр подъемной трубы равен 0,3 м, а скорость газа 23 м/сек. Если скорость твердых частиц составляет 80% от этой скорости, то разность скоростей газа и твердой фазы составит 4,6 м/сек, или 275 м/мин. Если плотность отходящего газа 1,04 кг/м³, то массовая скорость газа будет равна 17 000 кг/(м²·ч), а объемный коэффициент теплопередачи составит 590 ккал/(ч·м³·град), или 680 вт/(м³·град). Эта величина незначительно отличается от коэффициентов, найденных экспериментально на многих промышленных установках, однако обычно нельзя точно установить дей-

¹ Fischer, Mech. Eng., 81, 11, 67 (1959).

ствительную разность скоростей газа и твердой фазы. Кроме того, вероятно, на коэффициент теплопередачи влияют также нагрузки смеси (газ — твердое) и размер твердых частиц, которые регулируют общую поверхность твердых частиц, подвергающуюся действию газа в каждом кубическом метре подъемной трубы. Таким образом, метод, изложенный выше, применим только для ориентировочной оценки размеров установок.

Для расчетных целей поперечное сечение транспортной трубы выбирается по принятой скорости воздуха и его расходу. Объем, а следовательно, и длину, можно затем рассчитать изложенным выше методом (определяя среднюю логарифмическую разность температур по перепаду температур мокрого термометра воздуха) по уравнению (III-3).

Когда для измельчения и подачи материала применяются струйные мельницы или высокоэффективные питатели типа Вентури, процесс сушки в значительной своей части может мгновенно заканчиваться в питателе. По-видимому, в этом же месте может происходить полное распределение твердых частиц в газе; однако нет способа предсказать истинный механизм процесса без испытаний на пилотной установке.

Гидравлическое сопротивление системы можно рассчитать по методам, описанным в гл. II первого тома или в литературе¹. Чтобы предотвратить чрезмерную утечку из системы (или в систему), общее гидравлическое сопротивление которой может составлять 200—300 мм вод. ст., устанавливают вращающиеся воздушные уплотнения или шнековые питатели для подачи или выгрузки твердой фазы.

Подъемная труба и другие части установки (коллекторы) изолируются для уменьшения тепловых потерь при сушке и других процессах нагревания. Регулирование процесса обычно осуществляется с помощью контроля над температурой отходящего газа и изменением начальной температуры газа, чтобы компенсировать изменение начальных условий (питания). Следует поддерживать постоянный расход твердой фазы.

ТАБЛИЦА III-25

Сравнительная стоимость пневматических быстродействующих сушильных установок²

Материал — мягкая низкоуглеродистая сталь. Начальная температура воздуха 650° С³.

Напряжение по испаряемой влаге, в кг H ₂ O/ч	Примерные размеры установки, м			Стоимость, тыс. долл.
	B	L	H	
450	4,5	6,1	7,6	40
900	7,6	7,6	10,7	57
1800	9,1	8,5	12,2	77
2700	10,0	9,1	15,2	91
4100	11,6	12,2	15,2	106
5400	12,8	12,8	16,7	121
7200	13,7	13,7	16,7	137
9000	14,6	15,2	18,3	154

¹ Fischer, Chem. Eng., 65, 11, 114 (1958).

² По данным Raymond Division, Combustion, Engineering, Inc.

³ При температуре входящего воздуха 315—370° С считают напряжением по влаге примерно в два раза большим, чем в таблице (т. е. если производительность составляет 900 кг H₂O/ч, цена для установки берется как в случае производительности 1800 кг H₂O/ч). Для многих материалов также часто применяются значительно более низкие температуры входящего воздуха.

Характеристика и стоимость. Стоимость установок варьируется в очень широких пределах. Многие установки с пневматическими подъемниками монтируются из различных частей, поставляемых разными фирмами. Характерные цены (1960 г.) приведены в табл. III-25. Сюда включена стоимость барабанной мельницы для измельчения, первичного циклона, рукавного фильтра для вторичной очистки газа, а также электродвигателя.

Пневматические подъемники при одинаковых мощностях конкурируют по стоимости с прямоточными барабанными сушилками (см. табл. III-8).

Когда одновременно выполняется несколько процессов, например, транспортирование и измельчение или классификация, то рабочая и установочная стоимость могут быть уменьшены. С этой точки зрения пневматические подъемники имеют некоторое преимущество по сравнению с другими пневматическими аппаратами.

РАСПЫЛИТЕЛЬНЫЕ СУШИЛКИ

Распылительная сушилка состоит из большой цилиндрической (обычно вертикальной) камеры, внутри которой высушиваемый материал распыляется на мелкие капли. В камеру подается горячий газ в количестве, достаточном для того, чтобы внести тепло, необходимое для полного испарения жидкости.

Тепло- и массопередача происходят при прямом соприкосновении горячего газа с распыленными капельками. После окончания сушки охлажденный газ и твердая фаза разделяются. Это разделение частично может закончиться в сушильной камере за счет классификации и сепарации крупных сухих частиц. Тонкие частицы отделяются от газа в наружных циклонах, причем для вторичной очистки часто используются рукавные фильтры. Когда требуется, чтобы конечный продукт состоял только из крупнозернистой фракции, тонкие частицы можно извлечь из газа в мокром скруббере; отработавшая жидкость из скруббера концентрируется и возвращается в качестве питания в сушилку.

Изготавливаются также и горизонтальные распылительные камеры со шнеком, продольно расположенным на дне сушилки, для непрерывной выгрузки осевших крупных частиц.

Основной процесс контактирования газа и твердой фазы, происходящий в распылительных сушилках, представляет собой обычную сушку водных растворов и суспензий. Эти аппараты часто применяются для проведения комбинированных процессов сушки и термообработки или сплавления и охлаждения плавящихся материалов (например, гранул нитрата аммония).

Распылительные сушилки стали применять и для процессов мокрой агломерации (получение дисперсных, быстрорастворимых концентратов пищевых продуктов) как разновидности способа увеличения размеров частиц.

Распылительная сушка представляет собой один из методов контактирования, при котором твердая фаза находится в разбавленном состоянии. Этот процесс сходен с пневматическим транспортированием. Отличие заключается в том, что исходный материал обычно подается в виде раствора, суспензии или пасты, способных диспергироваться разбрызгиванием подобно струям жидкости (прежде чем материал превратится в сыпучие твердые частицы).

Распылительная сушка включает три основных операции: 1) атомизация жидкости; 2) смешение капелек с газом; 3) сушка капелек жидкости.

Распыление обычно производится тремя способами с помощью: 1) форсунок, действующих под давлением, 2) форсунок, в которые поступают два потока — распыляемой жидкости и распыляющего агента, 3) дисков, вращающихся с большой скоростью¹. В этих распылителях растворы могут быть диспергированы на капельки размером ~2 мкм. Размер самых крупных капель редко превышает 500 мкм. Из-за большой суммарной поверхности сушилки, вызываемой малыми размерами капелек, действительная продолжительность сушики в распылительной сушилке измеряется долями секунды. Общее время пребывания частицы в системе в среднем не превышает 30 сек.

В обзоре, сделанном Маршаллом², детально обсуждается теория распылительной сушики, а также конструкции и рабочие характеристики современных распылительных сушилок. Процессы атомизации жидкостей и распыления подробно описаны в гл. I настоящего тома. Распылители описаны ниже.

Специальные конструкции распылительных сушилок могут обеспечивать охлаждение воздуха, изолированные системы для рекуперации растворителей и удаление сухого продукта со стенок и дна камеры с помощью воздуха или механических гребков. Некоторые из них снабжаются пневматическими подъемниками (как показано на рис. III-77), в которых горячий воздух разбавляется холодным для охлаждения продукта перед сепарацией.

Распылительные сушилки могут работать с противотоком, смешанным током или прямотоком газа и твердой фазы. Воздух нагревается паром, а также в нагревателях прямого или непрямого действия. Температура входящего в сушильную камеру воздуха может находиться в пределах 150—800° С.

Распылители. 1. Форсунки, работающие под давлением, вызывают атомизацию (распыление) нагнетанием через маленькое отверстие потока жидкости, находящегося под высоким давлением и приведенного во вращение. Давление может находиться в пределах 30—700 ат, в зависимости от угла распыления, производительности и физических свойств распыляемой жидкости. Отверстия в форсунке делаются диаметром 0,25—4,0 мм, в зависимости от необходимого для данной производительности давления и от требуемого угла распыления. При распылении суспензий твердых частиц в жидкости под высоким давлением отверстие форсунки будет подвергаться эрозии и поэтому должно изготавливаться из твердого сплава (например, из углеродистого вольфрама или стеллита). Наконечники форсунок могут быть сделаны из синтетического драгоценного камня, например сапфира.

Содержание в исправности форсунок, работающих под давлением, всегда представляет собой сложную задачу, так как эрозия возникает даже при использовании самых твердых наконечников, и как только в отверстии появляются царапины и нарушается его форма, хорошее распыление становится невозможным. Инкрустация или забивание форсунок инородными частицами также вызывает нарушение ее действия.

Жидкость под высоким давлением подается поршневыми насосами. Эрозия клапанов этих насосов составляет важную проблему при эксплуатации распылителей.

Качество распыления форсункой, работающей под давлением, зависит от величины давления и от размера отверстия. Давление влияет не только на распы-

лительные характеристики, но и на производительность установки. Если желательно уменьшить количество распыляемой жидкости снижением давления, то при этом распыление может стать более грубым. Чтобы исправить положение, необходимо установить наконечник с меньшим отверстием, но при этом может потребоваться более высокое давление, чтобы получить желаемую производительность, и кроме того, распыление может оказаться более тонким, чем это необходимо. В многочисленных конструкциях форсунок стремятся преодолеть эту особенность процесса распыления под давлением, несмотря на то, что некоторые форсунки усложняют конструкцию сушильной камеры и режим движения воздуха, а также вызывают столкновения частиц, приводящие к неоднородности распыления.

2. Двухпоточные форсунки не могут действовать эффективно при высокой производительности, вследствие чего они не получили широкого применения в промышленных распылительных сушилках. Их главным преимуществом является то, что они могут действовать при относительно низких давлениях: жидкость поступает при 0—4 ат, а распыляющий поток при 0,7—7,0 ат. В качестве распыляющего агента используют воздух или пар. В последнее время эти форсунки стали применять для диспергирования паст и осадков с фильтрата, не поддающихся обработке в обычных распылителях¹.

3. Центробежные диски распыляют жидкости, заставляя растягиваться поток тонким слоем, который диспергируется при высокой скорости с периферии диска.

При проектировании диска необходимо обеспечить равномерное распределение по размерам капелек распыленной жидкости. Диаметр диска может быть равен 50 мм в маленькой лабораторной модели и 300—350 мм в промышленной сушилке. Скорость вращения диска находится в пределах 3000—50 000 об/мин (более высокая скорость обычно используется в сушилках небольшого диаметра). В промышленных сушилках скорость вращения дисков лежит в пределах 4000—20 000 об/мин, в зависимости от диаметра диска и желаемого угла распыления. Угол распыления как функция скорости вращения диска определяется диаметром диска и его скоростью (чем больше угловая скорость, тем больше угол распыления). Таким образом, с диском диаметром 125 мм при 30 000 об/мин можно ожидать более тонкого распыления, чем с диском той же конструкции диаметром 50 мм, вращающимся со скоростью 50 000 об/мин.

Распыление с помощью центробежного диска особенно выгодно для атомизации суспензий и паст, вызывающих эрозию и забивание форсунок. Плотные пасты можно обрабатывать в том случае, если прерывисто подавать их к диску с помощью насосов.

Диски способны действовать в широком диапазоне расходов материала, причем обеспечивают получение более или менее однородного по качеству продукта. Центробежные диски могут приводиться в действие с помощью ременной или прямой передачи от высокоскоростного электродвигателя или от паровой турбины. Прямое соединение вала диска с валом электродвигателя применяется тогда, когда требуется очень высокая скорость вращения, а также при необходимости точного контроля над отклонениями скорости. Продолжительность службы высокоскоростных подшипников в центробежных дисковых распылителях зависит от условий их действия и в среднем составляет 2000 ч. Запасные части распылителей должны быть стандартными.

¹ В отечественной литературе эти три способа распыления соответственно называются: 1) гидравлическим или механическим, 2) пневматическим и 3) центробежным. — *Прим. ред.*

² Marshall, Chem. Eng. Progr., Monograph Ser., 50, 2 (1954).

¹ Chem. Eng., 67, 6, 83 (1960).

Распределение размеров частиц, полученных одним из трех методов распыления, зависит от большого числа факторов. В общем, гранулометрический состав будет зависеть от конструкции распылителя, свойств жидкости и степени распыления. Если попытаться получить более тонкое распыление, приближаясь к оптимальным условиям, то пределы изменения размеров частиц, вне зависимости от метода распыления, будут узкими. В особенности это относится к форсункам, действующим под давлением, в которых однородность размеров частиц увеличивается с давлением. Кроме того, для получения грубого продукта с высоким содержанием крупных частиц метод распыления удобен, так как позволяет регулировать гранулометрический состав. При соответствующем расчете центробежного диска часто можно получать продукт, состоящий из однородных грубых частиц.

Одно из основных преимуществ распылительной сушики заключается в получении продукта в виде сферических частиц, чего обычно нельзя добиться другими методами сушики. Эти сферические частицы могут быть твердыми или полыми в зависимости от материала, условия его подачи и условий сушики. Водные растворы таких материалов, как мыло, желатина и водорастворимые полимеры, которые образуют упругие тонкие наружные оболочки при сушике, могут превращаться при распылительной сушике в полые сферические частицы. Это объясняется образованием затвердевающей пленки на наружной поверхности частицы, причем эта пленка препятствует испарению жидкости изнутри на поверхность частицы.

Из-за высокой скорости теплоотдачи к каплям жидкость испаряется из центра частицы, расширяя при этом ее наружную оболочку и образуя полую сферу. Иногда скорость образования пара внутри частицы достаточно для того, чтобы выдуть отверстие в стенке сферической оболочки.

Шарообразные частицы получаются из истинных растворов или суспензий с помощью любого из вышеописанных распылителей.

Физические свойства материалов, высушиваемых в распылительных сушилках, подвергаются значительным изменениям в зависимости от направления потока входящего газа и его температуры, степени и однородности распыления, содержания твердой фазы в исходной смеси и степени аэрации питания. Из свойств продукта наибольший интерес представляют: размер частиц,¹ насыпная плотность, способность к пылеобразованию. Заданную конечную влажность продукта обычно получить сравнительно легко.

Размер частиц является функцией рабочих условий распылителя, а также содержания твердой фазы, вязкости и плотности жидкости, расхода питания.

Насыпная плотность высушенного в распылительной сушилке материала подлежит строгому контролю как критическое свойство, по которому можно судить о ходе процесса. Насыпная плотность может увеличиваться при следующих изменениях рабочих условий: 1) уменьшении размеров капелек; 2) уменьшении температуры входящего воздуха; 3) увеличении количества протекающего воздуха; 4) увеличении турбулентности воздуха; 5) применении противотока вместо прямотока; 6) получении из распылителя частиц широкого гранулометрического состава.

Влияние изменений рабочих условий в распылительной сушилке на насыпную плотность было установлено только качественно¹ при сушике детергента.

Пыль выделяется¹ из продукта в результате тонкой атомизации исходного раствора или разложения частиц после сушики. Тонкостенные полые частицы легко разрушаются во время классификации. Тонкая атомизация и высокая температура газа способствует достижению высокой производительности по продукту в малых сушильных камерах; при этом также образуются тонкие частицы в форме тонкостенных сфер.

Распылительные сушильные установки, производящие чрезвычайно тонкие и пылящие продукты, часто являются результатом усилий сконструировать оборудование максимальной производительности при минимальных капиталовложениях. Крупные твердые частицы или толстостенные сферы требуют более продолжительного цикла сушики, а следовательно, больших размеров сушильных камер. Поэтому необходимо тщательное исследование на пилотной установке.

В промышленных установках классификация частиц и отделение тонких фракций от более грубого продукта часто проводится с помощью противотока газа и твердой фазы. Камеры некоторых типов со смешанным током также пригодны для этой цели.

В большинстве распылительных промышленных сушилок применяется прямоток газа и твердой фазы. Противоточные сушилки используются в основном для сушики мыл и детергентов. В этих случаях очень полезна классифицирующая способность противоточных сушилок. Поток воздуха, направленный снизу вверх, выносит тонкоизмельченные частицы в верхнюю часть камеры. Крупные частицы осаждаются и удаляются отдельно со дна камеры.

Горизонтальные распылительные сушилки всегда строятся для прямотока газа и твердой фазы. Воздух движется, образуя завихрения для лучшего перемешивания.

Сушилки смешанного тока делают различных конструкций, комбинируя прямоточную и противоточную сушику. Режимы движения потоков имеют сложный характер с высокой турбулентностью в сушильной камере. В одной из сушилок воздух движется как в циклоне. Воздушный поток вводится тангенциально в верхнюю часть конической камеры, проходит по спирали вниз и поворачивает вверх — в колонну, расположенную в центре, и выходит по ней из аппарата. Питание подается в центре верхней крышки, проходит вниз, противотоком к потоку отходящего газа, и затем близко к стенкам разрыхляется и переносится вниз прямо-током входящего газа.

В промышленности работает большое количество вариантов распылительных сушилок с различными режимами воздушного потока; большинство из них характеризуется турбулентным режимом и полным перемешиванием газа и капелек жидкости, а также наиболее эффективным использованием объема камеры.

Важные и наиболее успешные случаи применения распылительных сушилок — сушика растворов, суспензий и паст, обладающих следующими свойствами: их нельзя обезвоживать механическим путем; они термочувствительны и потому не могут подвергаться действию высокой температуры в течение долгого времени; они содержат очень тонкие частицы, способные агломерироваться и сплавляться в других условиях сушики (не в разбавленном состоянии). В других случаях сушика распылением редко конкурирует (по стоимости) с двухступенчатым обезвоживанием и сушикой в твердом состоянии.

Необходимость применения рукавных фильтров для извлечения твердых частиц, уносимых большими объемами отходящего газа, может вдвое увеличить стои-

¹ Chaloud et al., Chem. Eng. Progr., 53, 12, 593 (1957).

мость установки распылительной сушилки. Дополнительные затраты обычно оправдываются некоторым улучшением качества продукта (например, формы частиц, размеров, запаха и вкуса, цвета или термической устойчивости).

Сушка распылением применима для получения таких термочувствительных продуктов, как порошковое молоко и другие виды пищи, а также лекарства, из-за короткого времени контакта с горячим газом в сушильной камере. Кроме того, пленка воды на капле раствора защищает твердые частички от действия высокой температуры газа. Сушка заканчивается, по существу, при температуре мокрого термометра сушильного агента (воздуха).

В табл. III-26 приведен список различных материалов, которые можно высушивать в распылительных сушилках.

ТАБЛИЦА III-26

Данные по сушке некоторых материалов в распылительной сушилке¹

Диаметр камеры 5,5 м, высота 5,5 м, распылитель — центробежный диск. Производительность вентилятора к этой сушилке составляет 310 м³/мин на выходе из аппарата.

Материал	Температура воздуха ² , °C		Содержание воды в исходном материале, %	Скорость испарения, кг/ч	
	на входе	на выходе			
Гидроокись алюминия	316	54	93	1160	
Детергент	232	121	50	300	
	238	116	63	370	
	232	121	40	155	
Дрожжи	227	60	86	490	
Карбонат магния	316	49	92	1090	
Кровь (животная)	166	71	65	350	
Лигнин	204	90	63	410	
Пигмент	243	60	73	800	
Силикагель	316	77	95	1010	
Смола карбамидная	260	82	60	230	
	232	88	70	115	
Сульфаты:					
	алюминия	143	77	70	105
	марганца	316	143	50	325
	натрия	227	66	50	125
цинка	327	110	55	600	
Хлорид магния	432	151	53	515 (до дигидрата)	
Экстракты:					
	дубильный	166	66	46	310
	кофе	149	82	70	225
	260	116	47	330	

¹ По данным Courtesy of Bowen Engineering Inc.
² Температура воздуха на выходе рассчитывается по тепловому балансу, так как она зависит от подсоса холодного воздуха и истинного падения температуры, вызванного испарением.

Красящие пигменты являются примером группы продуктов, где при сушке желательно сохранить (насколько возможно более точно) первоначальный размер твердых частиц. Другой группой продуктов, для получения которых особенно применима сушка распылением, являются суспензии чрезвычайно тонких твердых частиц, характеризующиеся как неньютоновские жидкости, т. е.

сохраняющие текучесть при очень низком содержании влаги (к этой категории относятся некоторые сорта глин). Распылительные сушилки также применимы для процессов, в которых необходимо получение продукта

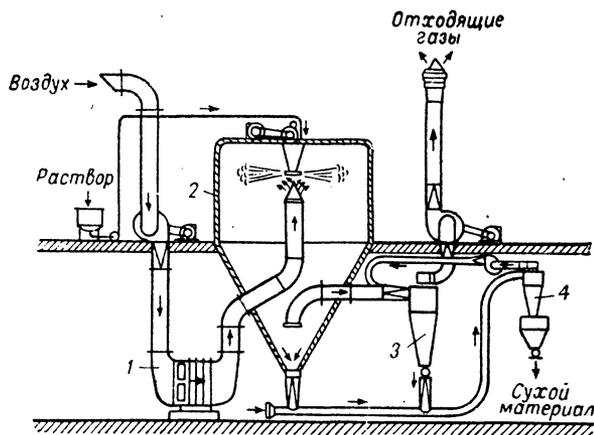


Рис. III-77. Схема распылительной сушилки:

1 — калорифер; 2 — сушильная камера; 3 — первичный коллектор для пыли; 4 — вторичный коллектор для пыли.

в виде капсул (например, в парфюмерии)¹. Охлаждение распыления применяется для получения бисульфата натрия, нитрата аммония и фенотиазина.

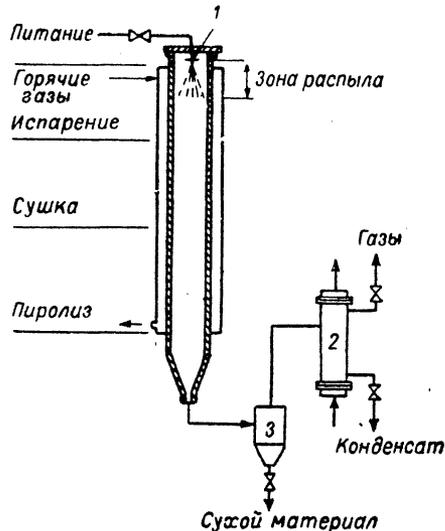


Рис. III-78. Сушилка-распылитель для суспензий:

1 — распылитель; 2 — конденсатор; 3 — сепаратор.

Если продукт не прилипает к стенкам сушилки и для сепарации твердых частиц от газа достаточно обычного циклона, то можно использовать распылительную сушилку периодического действия. С другой стороны, продолжительность и стоимость очистки оборудования редко делает процесс экономичным по сравнению с непрерывнодействующим.

¹ Malecny, Soap. Chem. Specialties, 34, 1, 135 (1958).

Стандартная прямоточная распылительная сушилка показана на рис. III-77. В нее входят первичный циклон для отделения тонких частиц из отходящего газа и пневматический подъемник для охлаждения продукта. Сушильные камеры большого диаметра требуются в тех случаях, когда для распыления применяются центробежные диски.

Высокие вертикальные камеры малого диаметра используются при распылении с помощью двухпоточных форсунок или форсунок, действующих под давлением.

Условия работы в установленной распылительной сушилке с трудом поддаются регулированию, так как необходимо сохранять постоянную скорость выхода продукции.

К важнейшим параметрам, которые должны быть установлены перед проектированием промышленной сушилки, относятся форма и размер частиц продукта, физические свойства исходного материала (влажность, вязкость, плотность и т. д.), максимальные температуры входящего газа и продукта.

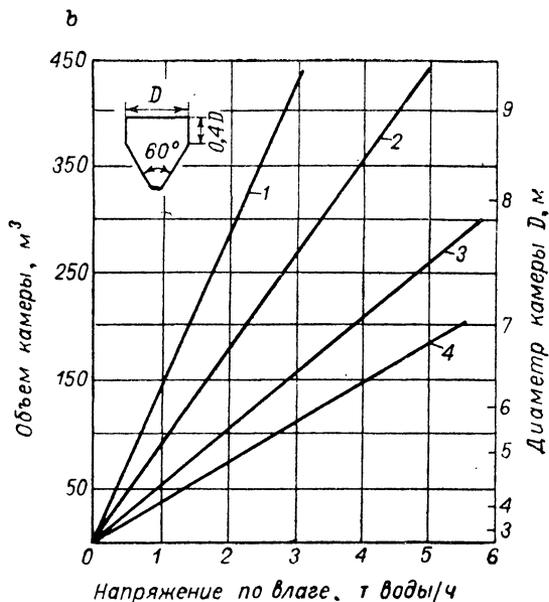
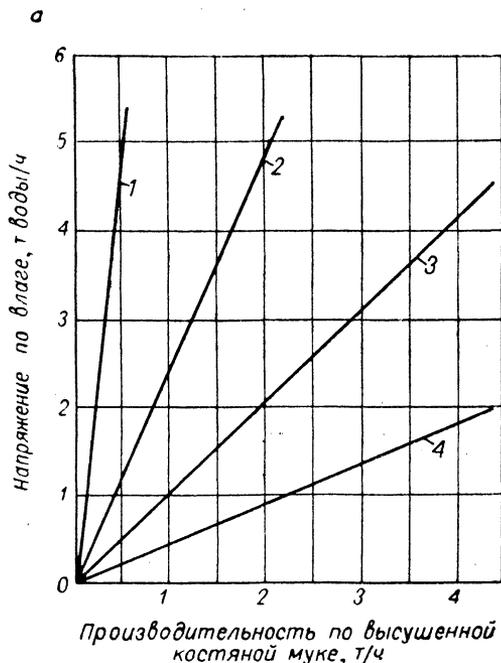


Рис. III-79. Диаграммы для приближенного расчета размеров распылительных сушилок [Chem. Eng. Costs Quart., 6, 4 (1956)]:

а — зависимость напряжения сушилки по испаряемой влаге от производительности по высушенному материалу и концентрации твердой фазы (необходимо применять согласующие единицы для производительности и напряжения по влаге). Содержание твердой фазы (%): 1 — 10; 2 — 20; 3 — 50; 4 — 70;

б — зависимость объема камеры от напряжения сушилки по испаряемой влаге (данные соответствуют времени пребывания материала в сушилке 20 сек).

Температура на входе (°C): 1 — 204; 2 — 260; 3 — 371; 4 — 538; температура на выходе во всех случаях 93° C.

Форма камеры должна соответствовать режиму работы распылителя так, чтобы распыленные частицы не могли контактировать со стенками до полного высушивания. Конструкция такой распылительной сушилки показана на рис. III-78. Она была построена в Канаде для извлечения серы из сульфитных щелоков. Стенки камеры обогреваются электрическим током или горячими топочными газами с температурой 600—800° C, и тепло передается излучением от стенок аппарата к капелькам раствора. Высушенный продукт выносится из камеры вместе с паром, образующимся при испарении из капелек.

Методы расчета (проектирования). Расчетные параметры должны быть установлены экспериментально до окончательного расчета сушильной камеры. В общем, размеры камеры, выбор распылителя и вспомогательного оборудования для очистки газа должны быть установлены в зависимости от потребных физических характеристик продукта. Организация самого процесса сушки редко вызывает затруднения.

Опубликовано большое количество работ, в которых рассматриваются теоретические методы расчета распылительной сушилки на основе тепло- и массопереноса к капле жидкости, взвешенной в воздушном потоке. Для приближенного расчета применим метод с использованием понятия об объемном коэффициенте теплопередачи (он подробно описан при расчете пневматических, а также барабанных сушилок с прямым нагревом). В качестве движущей силы процесса принимается средняя логарифмическая разность температур воздуха (при t_m).

К сожалению, режимы движения воздуха и капелек в промышленных сушилках очень сложны и поэтому трудно предсказать действительный профиль скоростей. Общий коэффициент теплопередачи изменяется в пределах от 16 до 320 $\text{kcal}/(\text{ч} \cdot \text{град} \cdot \text{м}^3 \text{ объема камеры})$, или 19—370 $\text{вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$. Его величина зависит от исходного материала, температуры входящего воздуха, гранулометрического состава капелек и многих других

трудноопределимых переменных. Применение диаграмм рис. III-79 и III-80 предлагается для предварительного

определеца по рис. III-80, а. В цену сушилки входит стоимость:

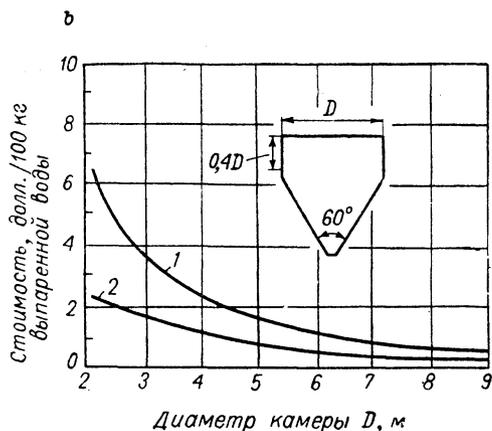
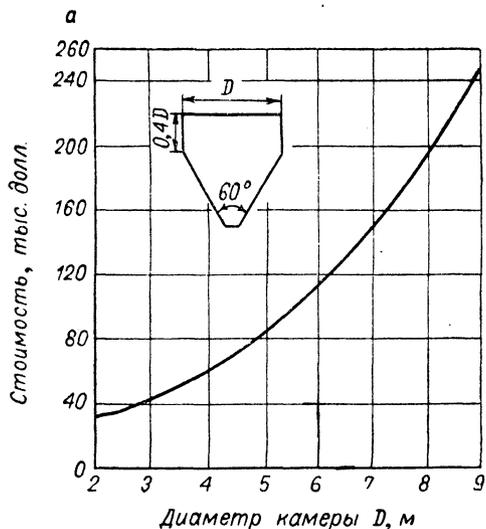


Рис. III-80. Диаграммы для приближенного расчета стоимости распылительных сушилок [Chem. Eng. Costs Quart., 6, 4 (1956)]:

а — зависимость стоимости распылительной сушильной установки от размеров сушильной камеры; б — зависимость рабочей стоимости сушильной установки от размеров сушильной камеры. Температура на входе ($^{\circ}\text{C}$): 1 — 260; 2 — 538; температура на выходе 93°C .

расчета размеров оборудования без помощи испытаний на пилотной установке.

Характеристика и стоимость. Сушильные камеры, трубопроводы и циклоны обычно изготавливаются из нержавеющей стали. Использование углеродистой стали может дать экономию $\sim 20\%$ продажной цены. Тенденция к применению термостойких и коррозионноустойчивых покрытий из эпоксидных смол и других пластиков позволяет в будущем шире использовать конструкции из углеродистых сталей. Основное оборудование сильно различается по стоимости. Цена нагревателей для воздуха, например, зависит от способа нагрева (паром, электрическим током, прямым или непрямым сжиганием нефти или газа). Оборудование для очистки от пыли может состоять из циклона, рукавных фильтров или мокрого скруббера. Стоимость форсунок и центробежных распылителей примерно одинаковы. Установка центробежного распылителя требует механического привода и двигателя, а для форсунки, работающей под давлением, необходим компрессор, развивающий высокое давление. Стоимость компрессора обычно больше стоимости привода для центробежного диска.

В стоимость установки распылительной сушилки включается вспомогательное оборудование: воздушные фильтры, изоляция сушильной камеры и механические или пневматические транспортеры для охлаждения материала. Необходимые контрольно-измерительные приборы: указывающие и регистрирующие термометры для температур входящего и выходящего воздуха, амперметр для мотора распылителя (или манометр для форсунки), расходомер, манометры, сигнальное устройство для предупреждения перегрева и пульт управления для всего оборудования. Процесс сушки может быть полностью автоматизирован с помощью установки нескольких дополнительных приборов. Приближенно основная стоимость распылительной сушилки может быть

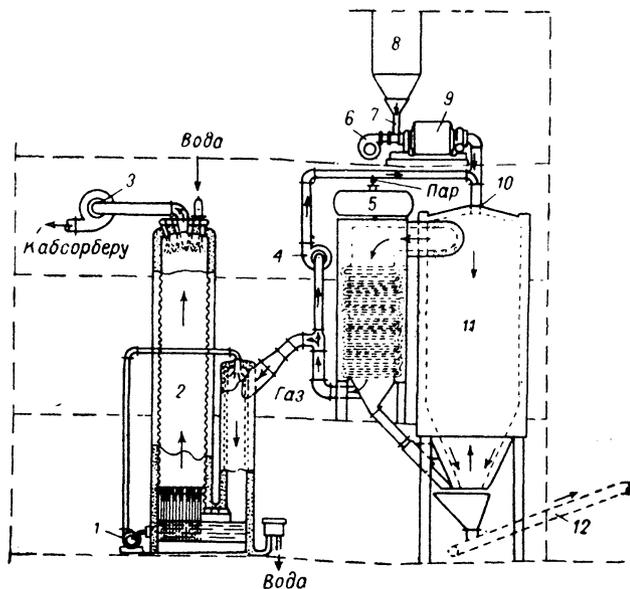


Рис. III-81. Скоростная обжиговая установка для получения двуокиси серы [Griswold, Fluids, Combustion and Furnaces, New York, 1946, p. 425]:

1 — рециркуляционный насос; 2 — скруббер; 3 — вытяжной вентилятор; 4 — рециркуляционный вентилятор; 5 — котел-утилизатор; 6 — верхний паянательный вентилятор; 7 — питатель; 8 — бункер исходного материала; 9 — шаровая мельница; 10 — горелка; 11 — камера сгорания; 12 — транспортер.

1) сушильной камеры из нержавеющей стали с изоляцией, люком, раздвижным смотровым отверстием,

окнами и подсветкой, воздуховодом и распределителем воздуха;

2) циклона с коллектором для пыли из нержавеющей стали и выхлопной трубой из углеродистой стали;

3) воздуховода-смесителя;

4) калорифера для воздуха с прямым нагревом при сжигании газа или нефти;

5) всех двигателей и вентиляторов;

6) воздушных фильтров;

7) центрального распылителя с двигателем;

8) пульта управления и контрольно-измерительных приборов для автоматического управления;

9) инженерного обслуживания для проектирования и изготовления по пунктам 1—8;

10) монтажа заказанной установки по пунктам 1—8;

11) пуска.

Общая установочная стоимость (включающая здание, фундамент, площадки для обслуживания, коммуникации, электропроводку и т. д.) составит 200—300% от расчетной. Рабочая стоимость находится в пределах 0,4—7 центов за 1 кг выпарной воды.

Годовые расходы на ремонт и эксплуатацию составляют дополнительно в среднем 5—10% общей установочной стоимости.

Распылительные сушилки могут работать под положительным, отрицательным или нейтральным давлением. В общем гидравлическое сопротивление всей си-

стемы находится в пределах 150—500 мм вод. ст. в зависимости от размеров трубопровода и примененного оборудования для отделения пыли.

СКОРОСТНЫЕ ОБЖИГОВЫЕ ПЕЧИ

Обжиговые печи с высокой циркуляцией особенно пригодны для обработки очень тонких частиц, например, сульфидов цинка, железа, меди и никеля, которые реагируют с кислородом воздуха, выделяя тепло. При этом получаются двуокись серы и окисел металла. Использование кислорода вместо воздуха приводит к образованию более концентрированной двуокиси серы. Для этой цели строятся кислородные установки. Полученный окисел металла восстанавливается.

На рис. III-81 показана схема установки такого типа. Тонкоизмельченные частицы вводятся с потоком воздуха внутрь топочной камеры, где происходит горение. Тангенциальный отвод вызывает завихрение газов, причем более крупные частицы оседают на дно бункера топочной камеры. Горячие газы проходят через котел-утилизатор, а затем через скруббер, где большинство частиц осаждаются и удаляются из системы. Очищенные от пыли газы направляются на извлечение двуокиси серы. Температура в камере сгорания поддерживается около 980°С.

РАЗДЕЛЕНИЕ СИСТЕМ ГАЗ — ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО (ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ)

В этом разделе рассмотрено приложение механики частиц к проектированию систем улавливания сухой пыли. Мокрые пылеуловители (скрубберы), а также оборудование для удаления из газов тумана увлеченной ими жидкости см. в гл. I.

ЦЕЛИ И СПОСОБЫ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

Пылеулавливание (удаление твердых взвешенных частиц из газов) проводится со следующими целями:

1) удаление вредных примесей (например, очистка вентиляционного воздуха, удаление летучей золы из топочных газов силовых станций);

2) уменьшение износа оборудования (например, фильтрация воздуха, засасываемого двигателями, обработка газа колчеданных печей; перед его поступлением в камеры сернокислотных установок);

3) обеспечение требований техники безопасности и санитарно-технических норм (например, улавливание абразивной и металлической пыли при работе на шлифовальном, сверлильном и другом оборудовании, а также мучной пыли при помоле и упаковке);

4) улучшение качества продукции (например, очистка воздуха при производстве фармацевтических продуктов и фотографической пленки);

5) возврат ценных продуктов (например, улавливание пыли от сушилок и плавильных печей);

6) улавливание порошковых продуктов (например, при распылительной сушке молока, яиц и мыла, при производстве окиси цинка высокой чистоты, при пневмотранспорте).

Способы улавливания пыли можно классифицировать следующим образом: 1) гравитационное осаждение; 2) инерционное отделение; 3) ударное действие (пересечение линий потока); 4) диффузионное отделение; 5) электростатическое отделение; 6) термическое осаж-

дение; 7) звуковая агломерация. Во многих опубликованных работах¹ обсуждаются основные механизмы процесса улавливания пыли и приводятся безразмерные группы величин, с помощью которых оценивается эффективность различных способов улавливания.

В большинстве аппаратов улавливание пыли осуществляется одновременно несколькими способами, поэтому классифицировать пылеулавливающее оборудование более удобно по конструктивным признакам.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

Пылеуловители можно характеризовать эффективностью улавливания η , которая представляет собой массовую долю уловленной пыли, т. е. отношение массы уловленной пыли к общему количеству пыли, поступившей в аппарат. В некоторых случаях, например при фильтровании радиоактивных аэрозолей, наибольший интерес представляет фракция, ушедшая из пылеуловителя. Так как эта фракция обычно находится в степенной зависимости от свойств фильтра, то иногда удобно выразить эффективность в значениях $lg[1/(1-\eta)]$, что численно равно логарифму отношения концентраций входящей и выходящей пыли. Это число называется «фактором деконтаминации» (обезвреживания) и обозначается DF (согласно Блайзевитцу и Джайдсону,² использующим десятичные логарифмы) или «числом единиц переноса» и обозначается N_i (согласно Райту, Стесни и Лепплю³, применяющим натуральные логарифмы и проводившим аналогию с подобными значениями в тепло- и массопередаче). Очевидно, наиболее

¹ Chen, Chem. Rev., 55, 595 (1955). — Ranz, Principles of Inertial Impaction, Renn. State Univ. Eng. Research Bull. B-66, Dec. 1956. — Lapple, Chem. Eng. Progr., 53, 385 (1957).

² Blawitz, Judson, Chem. Eng. Progr., 51, 6-J (1955).

³ Wright, Stasny, Lapple, High Velocity Air Filters, WADC Tech. Rept 55-457, ASTIA AD-142075, Oct. 1957.

логичной численной характеристикой является отношение эффективности улавливания к перепаду давления, принятое Ченом¹:

$$\eta = \frac{\ln [1/(1-\eta)]}{\Delta p} \quad (\text{III-15})$$

где Δp — перепад давления, *мм вод. ст.*

Эффективность улавливания частиц не является специфической характеристикой данного уловителя, а зависит от физических свойств разделяемой системы. На рис. III-82 приведены характеристики частиц и взвесей и указаны типы применяемого газоочистного оборудования.

Размер твердых взвешенных частиц обычно выражают в микронах и определяют как средний или эквивалентный диаметр частицы. Некоторые авторы выражают размер частиц через радиус. Иногда размер частиц выражают через ячейки сита, отверстия которого соответствуют диаметру частиц.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СИСТЕМ ГАЗ—ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО

Гравитационные отстойные камеры

Гравитационные отстойные камеры — простейший тип пылеулавливающего оборудования. Основным конструктивным элементом этих аппаратов является камера, в которой скорость газа уменьшается, а пыль оседает под действием силы тяжести. Практически промышленное использование гравитационных камер ограничено. Применяются они в основном для осаждения крупных частиц, диаметр которых превышает 40 *мкм*. Для осаждения меньших частиц требуются камеры очень больших размеров.

Гравитационные уловители обычно имеют форму длинных полых горизонтальных прямоугольных камер с входом на одной стороне и выходом на другой (сбоку или сверху). Допустив низкую степень турбулентности потока по отношению к скорости осаждения частиц пыли, эффективность гравитационной камеры η можно найти по уравнению:

$$\eta = \frac{uL}{vH} = \frac{uBL}{V} \quad (\text{для } \eta \leq 1,0) \quad (\text{III-16})$$

где u — конечная скорость осаждения частицы под действием силы тяжести, *м/сек*; L — длина камеры в направлении газового потока, *м*; v — средняя скорость газа в камере, *м/сек*; H — высота камеры, *м*; B — ширина камеры, *м*; V — объемный расход запыленного газа, *м³/сек*.

Выразив u через диаметр эквивалентной сферической частицы, определим диаметр наименьших частиц $D_{ч \text{ min}}$ (в *м*), которые могут быть осаждены полностью (допускается применимость закона Стокса):

$$D_{ч \text{ min}} = \sqrt{\frac{18\mu v H}{L(\rho_{тв} - \rho_{г})g}} = \sqrt{\frac{18\mu v}{BL(\rho_{тв} - \rho_{г})g}} \quad (\text{III-17})$$

(для $\eta = 1,0$)

где μ — вязкость потока, *н · сек/м²*; $\rho_{тв}$ — истинная плотность твердых частиц, *кг/м³*; $\rho_{г}$ — плотность газа, *кг/м³*; g — ускорение силы тяжести, *м/сек²*.

При заданном объемном расходе запыленного газа эффективность улавливания зависит от общей площади

камеры в плане и не зависит от высоты. Высота камеры выбирается так, чтобы скорость газа v была небольшой и чтобы не происходило увлечения осаждаемой пыли. В общем случае скорость не должна превышать 3 *м/сек*.

Горизонтальные пластины, установленные в виде полок внутри камеры, дают заметное увеличение улавливания. Такие полки используются, например, в пылевой камере Говарда (задержателе дыма)¹. Недостатками этого аппарата являются трудность очистки обусловленная малым расстоянием между полками, и коробление полок при высоких температурах.

Перепад давления в отстойной камере мал и складывается в основном из потерь на входе и выходе.

Отстойные камеры иногда применяются при естественной тяге из печей, но постепенно их заменяют циклонами с небольшим перепадом давления или другими более компактными пылеуловителями.

Сепараторы ударного действия

Когда запыленный газовый поток наталкивается на твердое тело и обтекает его, частицы пыли вследствие большей инерции стремятся осесть на поверхности тела. Работа сепараторов ударного действия может быть объяснена на основе так называемой эффективности попадания (эффективности мишени) η_i . Эта величина представляет собой долю частиц, извлеченных из потока, натолкнувшегося на твердое тело. Так, при обтекании цилиндра (рис. III-83) все частицы, заключенные

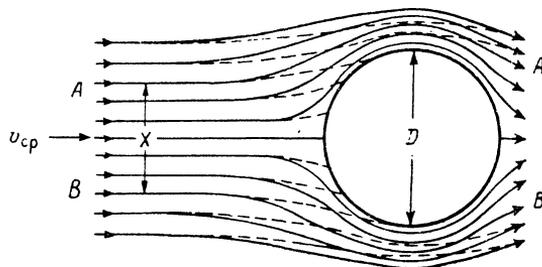


Рис. III-83. Пылеотделение ударного действия: — ламинарные поточные линии; --- траектории частиц.

первоначально в потоке между линиями A и B , будут осаждены на твердом теле, а эффективность попадания будет численно равна X/D . Установлено², что величина η_i является функцией безразмерной группы uv_{cp}/Dg (здесь u — конечная скорость осаждения частицы под действием силы тяжести, *м/сек*; v_{cp} — средняя скорость запыленного газа, *м/сек*; D — определяющий линейный размер или диаметр твердого тела, о которое происходит удар, *м*; g — ускорение силы тяжести, *м/сек²*).

Для тел простых очертаний соотношения $\eta_i = f(uv_{cp}/Dg)$ может быть выведено теоретически, но для тел более сложных форм требуется экспериментальное его определение. Такие соотношения, приводимые многими исследователями для различных форм улавливающего тела, отчасти расходятся. Наиболее надежными являются соотношения, определенные Ланг-

¹ US Pat. 896111, 1908.

² Albrecht, Phys. Z., 32, 48 (1931). — Sell, Forsch. Gebiete Ingenieurw., 2, Forschungsheft 347, Aug. 1931. — Langmuir, Blodgett, US Army Air Forces, Techn. Rept 5418, Feb. 19, 1946.

¹ Chen, Chem. Rev., 55, 595 (1955).

мюром и Блотгеттом (рис. III-84). Хотя эти соотношения выведены для условий ламинарного (потенциального) потока возле твердого тела, они должны строго выдерживаться даже в том случае, если поток будет турбулентным.

Необходимо отметить, что эти соотношения должны быть справедливы независимо от того, движется ли тело через поток или поток движется вокруг тела (величина u_{cp} берется как относительная скорость между телом и потоком). Хотя кривые на рис. III-84 относятся к улавливающим телам, находящимся в беско-

фективности улавливания ряда типовых сепараторов ударного действия.

Типовой промышленный уловитель ударного действия показан на рис. III-85. Ударные уловители рассчитываются на перепад давления в пределах 2,5—38 мм вод. ст. и используются для улавливания пыли с диаметром частиц >10—20 мкм. Иногда в уловителе предусматриваются ударные механизмы для стряхивания пыли с улавливающих тел через определенные интервалы времени. Основное преимущество этих аппаратов — лучшая, чем у других типов уловителей, при-

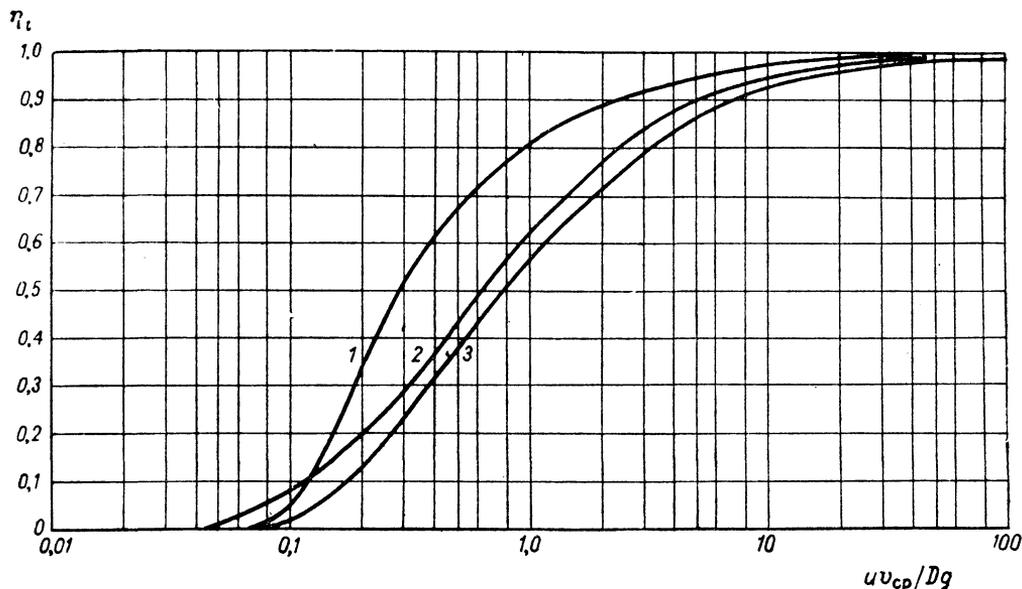


Рис. III-84. Диаграмма для определения эффективности попадания:

1 — ленты (полоски); 2 — сферические тела; 3 — цилиндрические тела.

Точки пересечения кривых с осью абсцисс: 0,0417 — для сферических тел; 0,0625 — для лент и цилиндрических тел.

Движение твердых частиц подчиняется закону Стокса.

В работе Лангмюра и Блотгетта даны соотношения $\eta_t = f(u_{cp}/Dg)$ для случаев, когда закон Стокса не применим.

нечном потоке, они могут быть применены для непосредственного расчета эффективности улавливания в установках, где такие тела расположены параллельно и последовательно. При этом учитывается, что смежные улавливающие элементы установлены не тесно и не вносят заметного искажения в форму потока. Это, по существу, характерно для многих типов воздушных фильтров. Когда улавливающие элементы расположены относительно тесно, кривые дают умеренное приближение для эффективности улавливания. Для улавливающих элементов, форма которых значительно отличается от формы тел, указанных на рис. III-84, необходимы дополнительные опытные данные, хотя оценка порядка величины η_t может быть сделана путем интерполяции по приведенным кривым.

Метод приближенного определения эффективности попадания для ряда устройств приводится в работе Ренца¹ (удар струй о плоские пластины и каналы, столкновение потока с шарами, цилиндрами, многоугольниками). Этот метод можно использовать для оценки эф-

способляемость к существующим дымоходам и трубопроводам. Уловители ударного действия могут применяться при повышенных температурах, если пыль не становится липкой. В случае липкой пыли применяются уловители, в которых для очистки улавливающих элементов используется пленка циркулирующей воды.

Дополнительные сведения об уловителях ударного действия можно найти в литературе¹.

Циклоны

Наиболее широко применяемыми аппаратами для извлечения пыли из газов являются циклоны. Запыленный газ входит в цилиндрическую (или коническую) камеру тангенциально в одной или более точках и выходит через центральное отверстие (рис. III-86). Частицы пыли под действием сил инерции движутся по направлению к наружной стенке циклона, откуда направляются в приемник. Циклон является, по существу,

¹ Ranz, Principles of Inertial Impaction, Penn. State Univ. Eng. Research Bull., B-66, Dec. 1956.

¹ Powers, Rock Prods, 46, 70, 72 (1943). — Roberts, Power, 83, 345, 392 (1939).

осадительной камерой, в которой ускорение силы тяжести сочетается с центробежным ускорением. Непосредственный вход в циклон обычно имеет прямоугольную форму.

Области применения. Циклоны являются наиболее дешевым оборудованием для улавливания пыли. Применяются они для удаления твердых веществ и жидко-

меньше, чем 5 мкм. В определенных случаях в циклоне, в результате проявления эффекта агломерации, достигается высокая эффективность улавливания (98%) пыли с частицами диаметром 0,1—2,0 мкм.

Форма потока. Газ в циклоне движется по спирали вниз с наружной стороны и вверх с внутренней. На входе в циклон скорость газа перераспределяется так,

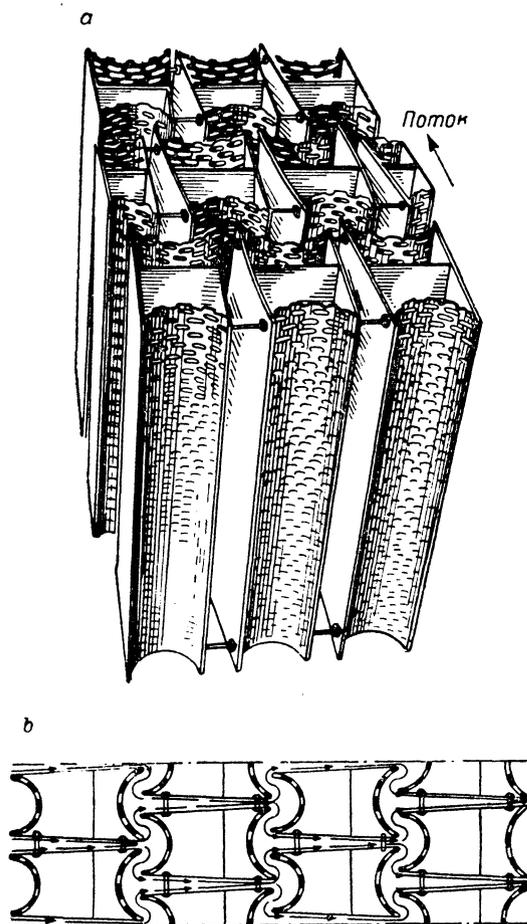


Рис. III-85. Уловитель ударного действия с обращенными насадками:

a — общий вид; *b* — диаграмма-план, показывающая движение газового потока через аппарат.

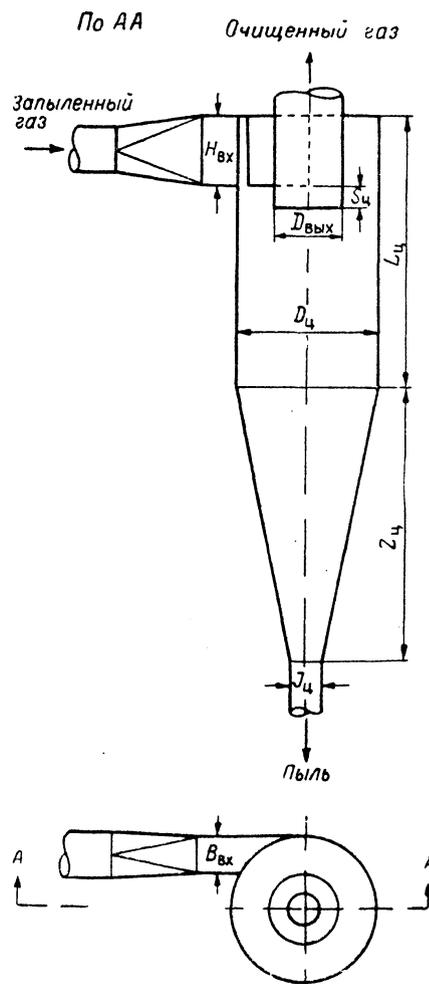


Рис. III-86. Циклон.

Соотношение размеров: $B_{вх} = D_{ц}/4$; $D_{вых} = D_{ц}/2$; $H_{вх} = D_{ц}/2$; $L_{ц} = 2D_{ц}$; $S_{ц} = D_{ц}/8$; $Z_{ц} = 2D_{ц}$; $J_{ц}$ — произвольно (обычно $J_{ц} = D_{ц}/4$).

стей из газов и твердых веществ из жидкостей и могут работать при высоких температурах (до 1000°С) и давлениях (до 500 ат). Для удаления твердых веществ из газов циклоны используются в основном при диаметре частиц, превышающем 5 мкм (некоторые параллельно-многоотрубные установки достигают эффективности 80—85% при частицах диаметром 3 мкм). Для улавливания частиц диаметром более 200 мкм обычно применяются гравитационные осадительные камеры, которые менее подвержены абразивному износу, чем циклоны. Если пыль обладает высокой способностью к агломерации или концентрация ее превышает 230 г/м³, циклоны улавливают частицы размером значительно

что тангенциальная ее составляющая v_t увеличивается с уменьшением радиуса циклона r : $v_t \approx r^{-n}$ (здесь r — в м, v_t — в м/сек). Спиральная составляющая скорости в циклоне может достигнуть значения нескольких средних скоростей газа на входе. Теоретически показатель степени n должен быть равен 1,0 при отсутствии трения о стенку. Действительные измерения показывают, что n лежит в пределах 0,5—0,7 для большой доли радиуса

циклона¹. Установлено², что $n=0,52$ для тангенциальных составляющих скоростей, измеренных в цилиндрической части циклона в пределах от наружной стенки центральной трубы до внутренней поверхности циклона. Хотя составляющие скорости у стенки приближаются к нулю, пограничный слой достаточно тонок, так что измерения трубкой Пито показывают относительно высокие тангенциальные составляющие скорости (рис. III-87). Радиальная составляющая скорости v_r направлена в циклоне к центру, а из центра — наружу.

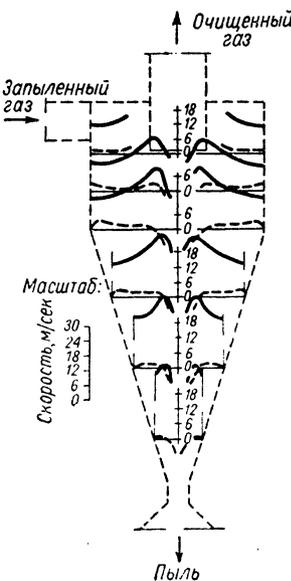


Рис. III-87 Изменение тангенциальной и радиальной составляющих скорости в различных точках циклона:

— тангенциальная составляющая скорости;
--- радиальная составляющая скорости.

ственно по площади $A_{вх}$, м/сек; $A_{вх}$ — площадь входа в циклон (для циклона с прямоугольным входом $A_{вх} = B_{вх} H_{вх}$ — см. рис. III-86), м².

Потеря на трение в циклоне пропорциональна величине статического давления и мощности, которую должен развивать вентилятор, и относится к потере напора следующим образом:

$$F_{ц} = \Delta p' + 1 - \left(\frac{4A_{вх}}{\pi D_{ввых}^2} \right)^2 \quad (III-19)$$

где $F_{ц}$ — потеря на трение в циклоне, выраженная числом скоростных напоров h (безразмерная величина); $\Delta p'$ — перепад давления, выраженный числом скоростных напоров h (безразмерная величина); $D_{ввых}$ — диаметр выходной трубы циклона, м; $A_{вх}$ — площадь входа в циклон, м².

Попытки рассчитать потери на трение или перепад давления на основе общих предпосылок не являются

Налагаясь на «двойную спираль», в циклоне при определенных условиях может появиться «двойной вихрь»³, похожий на вихрь, встречающийся в трубчатых змеевиках. Измерения в циклонах такого типа, как изображенный на рис. III-86, показали, что скорости двойного вихря малы по сравнению со скоростями спирали¹.

Перепад давления. Перепад давления в циклоне, так же как потерю на трение, удобно выражать в значениях скоростного напора, вычисленного непосредственно по площади входа в циклон. Скоростной напор на входе в циклон h связан со средней скоростью газа на входе соотношением:

$$h = 0,051 \rho_r v_{вх}^2 \text{ мм вод. ст.} \quad (III-18)$$

где ρ_r — плотность газа, кг/м³; $v_{вх}$ — средняя скорость газа на входе в циклон, вычисленная непосредственно по площади $A_{вх}$, м/сек; $A_{вх}$ — площадь входа в циклон (для циклона с прямоугольным входом $A_{вх} = B_{вх} H_{вх}$ — см. рис. III-86), м².

Потеря на трение в циклоне пропорциональна величине статического давления и мощности, которую должен развивать вентилятор, и относится к потере напора следующим образом:

удовлетворительными¹. Таким образом, пока не имеется общей корреляции для данных по перепаду давления в циклоне.

Потери на трение в циклонах находятся в пределах 1—20 скоростных напоров на входе и зависят от геометрических соотношений циклона². Для циклона со специальными геометрическими соотношениями значения $F_{ц}$ и $\Delta p'$, по существу, постоянны независимо от действительных размеров циклона.

Миллер и Лиссман, исследуя циклоны с закрученным входом, получили следующее эмпирическое выражение:

$$\Delta p' = K \left(\frac{D_{ц}}{D_{ввых}} \right)^2 \quad (III-20)$$

Найдено, что значение эмпирической константы K равно 3,2 при геометрических соотношениях в следующих пределах: $B_{вх}/D_{ц} \approx 1/8 \div 3/8$; $H_{вх}/D_{ц} \approx 1,0$; $D_{ввых}/D_{ц} \approx 1/4 \div 3/4$ (здесь $B_{вх}$ — ширина прямоугольного входного штуцера; $H_{вх}$ — высота прямоугольного входного штуцера; $D_{ц}$ — диаметр циклона; $D_{ввых}$ — диаметр выходной трубы). При меньших значениях $D_{ввых}/D_{ц}$ величина K возрастает, при меньших значениях $B_{вх}/D_{ц}$ — уменьшается. Величины $D_{ц}$, $D_{ввых}$ и $B_{вх}$ при исследовании были переменными, величина $H_{вх}$ постоянной.

Для циклонов общего типа (рис. III-86) получено эмпирическое выражение³

$$F_{ц} = \frac{KB_{вх}H_{вх}}{D_{ц}^2} \quad (III-21)$$

справедливое при $B_{вх}/D_{ц} \approx 1/12 \div 1/4$; $H_{вх}/D_{ц} \approx 1/4 \div 1/2$; $D_{ввых}/D_{ц} \approx 1/4 \div 1/2$.

Если прямоугольный вход оканчивается у корпуса циклона или цилиндра, то $K=16,0$. Если внутренняя сторона входного штуцера выступает за цилиндрическую стенку циклона и образует внутри кольцевого пространства (на половине расстояния до противоположной стенки) так называемую «входную лопасть», то потеря на трение уменьшается примерно на 50%. В этом случае $K=7,5$. Величины перепада давления, подсчитанные с помощью уравнения (III-21), при $K=13,0$ совпадают с большинством данных Миллера и Лиссмана в пределах $\pm 30\%$.

Для соотношений, указанных на рис. III-86, $F_{ц}=8,0$, а перепад давления рассчитывается по уравнению:

$$\Delta p = 0,408 \rho_r v_{вх}^2 \text{ мм вод. ст.} \quad (III-22)$$

Для циклона, показанного на рис. III-88, а, перепад давления рассчитывается по уравнению:

$$\Delta p = 0,221 \rho_r v_{вх}^2 \text{ мм вод. ст.} \quad (III-23)$$

Данные для циклона, показанного на рис. III-88, б, могут быть рассчитаны по уравнению (III-21) при $K=18,4$. Соотношения, используемые при этом расчете, приблизительно равны: $B_{вх}/D_{ц} \approx 5/8$; $H_{вх}/D_{ц} \approx 5/8$; $D_{ввых}/D_{ц} \approx 1/2 \div 1$ (здесь $D_{ц}$ — диаметр верхнего цилиндра). Большой диаметр верхнего конуса больше $D_{ц}$ в $13/8$ раза.

¹ Feifel, Forsch. Gebiete Ingenieurw., 9, 68, 306 (1938); Arch. Wärmewirt., 20, 15 (1939).

² Alden, Design of Industrial Exhaust System, chap. VII, New York, 1959.

³ Shepherd, Lapple, Ind. Eng. Chem., 31, 972 (1940).

¹ Shepherd, Lapple, Ind. Eng. Chem., 31, 972 (1940).

² Ter Linden, Inst. Mech. Engrs J., 160, 235 (1949).

³ Van Tongeren, Mech. Eng., 57, 753 (1935). — Wellman, Feuerungstechn., 26, 137 (1938).

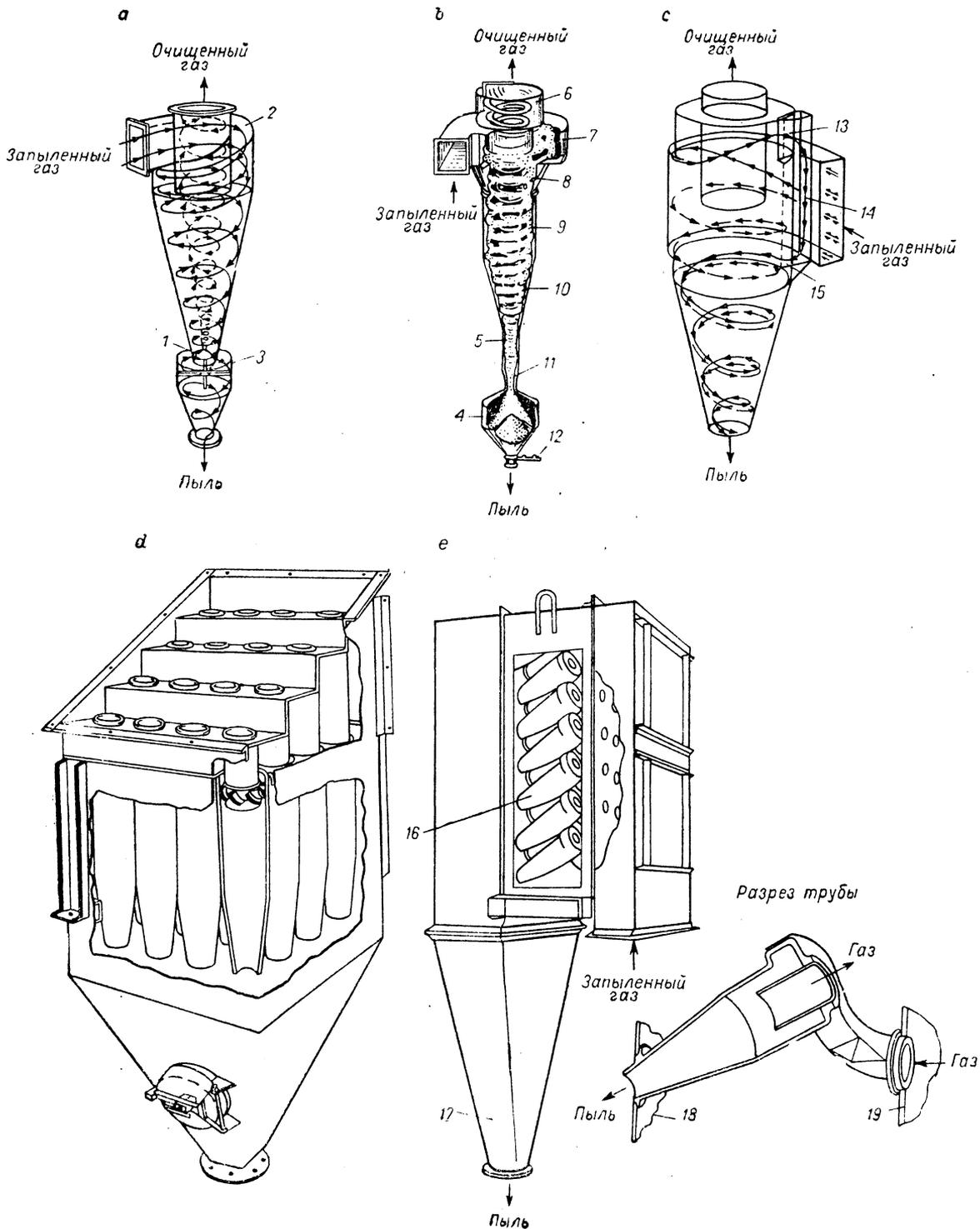


Рис. III-88. Типовые промышленные циклоны:

a — пылеуловитель «Дуклон»; *b* — пылеуловитель «Сирокко» (тип D); *c* — циклон Ван-Тонгерена; *d* — мультициклон; *e* — миниаторный сборный пылеуловитель «Дустек».

1 — вихреотражатель; 2 — винтовая крышка; 3 — пылевое отверстие; 4 — приемник; 5 — средний цилиндр; 6 — выходная головка; 7 — корпус; 8 — верхний конус; 9 — верхний цилиндр; 10 — средний конус; 11 — нижний конус; 12 — дутьевой шибер; 13 — пылевой шибер; 14 — канал для ответвленного пылевого потока (принципиально, более мелких частиц, движущегося вихревым током; 15 — отверстие для обратного входа ответвленного пылевого потока; 16 — трубопровод выхода газа; 17 — пылевой бункер; 18 — бушкерная трубная решетка; 19 — лицевая трубная решетка.

При изучении влияния шероховатости стенок на перепад давления Айнная¹ установил, что Δp падает с ростом шероховатости. Наклеивая песчаные частицы разного размера на стенку циклона, он получил следующие значения перепада давления, выраженные числом скоростных напоров на входе в циклон:

Без частиц песка	8,0
Тонкий слой частиц размером 147—175 мкм	5,8
Толстый слой частиц размером 147—175 мкм	4,9
Слой частиц размером 500—1000 мкм	4,1

Фирст² пришел к заключению, что трение о стенку составляет незначительную часть общего перепада давления π , очевидно, уменьшает интенсивность вихрей, вследствие чего перепад давления понижается.

Эффективность улавливания. Различные авторы³ исследовали теоретическое время движения частиц пыли по направлению к стенке циклона. Тер Линден⁴ сделал попытку теоретически подсчитать эффективность циклона, но в настоящее время еще не имеется общепринятых обобщений в этой области. Наиболее удовлетворительное выражение для расчета эффективности циклона было получено Розинным, Раммлером и Интельманом⁵. Они вывели следующее уравнение для минимального диаметра частиц, которые должны быть полностью отделены от газа в циклоне:

$$D_{ч \text{ min}} = \left[\frac{9\mu B_{вх}}{\pi n_r v_{вх} (\rho_{гв} - \rho_{г})} \right]^{0,5} \text{ м} \quad (\text{III-24})$$

где n_r — число оборотов, совершаемое потоком газа в циклоне.

Частицы небольшого размера улавливаются в степени, пропорциональнойначальному их расстоянию от стенки. Этот вывод основывается на законе Стокса, причем допускается, что поток газа движется с постоянным числом оборотов при постоянной спиральной составляющей скорости без всякого перемешивающего действия или турбулентности.

Уравнение Розина, Раммлера и Интельмана для определения ожидаемой эффективности улавливания частиц заданного размера (так называемой фракционной эффективности) может быть представлено графически (рис. III-89). Критический размер частицы (т. е. размер, соответствующий фракционной эффективности 0,5) рассчитывается по уравнению:

$$D_{ч, \text{кр}} = \left[\frac{9\mu B_{вх}}{2\pi n_r' v_{вх} (\rho_{гв} - \rho_{г})} \right]^{0,5} \text{ м} \quad (\text{III-25})$$

где n_r' — эффективное число оборотов, совершаемое потоком газа в циклоне.

Для кривой Розина, Раммлера и Интельмана значение n_r' идентично n_r . В действительности форма потока будет значительно более сложной и кривая не будет такой крутой, как это предполагалось. При отсутствии повторного увлечения пыли кривая эффектив-

ности и значение n_r' должны быть единственными для циклона с заданными геометрическими соотношениями. Когда влияние повторного увлечения ощутимо, значение n_r' уменьшается с увеличением скорости и плотности газа.

На рис. III-89 приведена также кривая, построенная по опытным данным для различных пылей, улавливаемых в циклоне, изображенном на рис. III-86. В этом случае повторный унос пыли окажется, очевидно, незначительным. Следует отметить, что эти данные основываются на немногих заводских и лабораторных экспериментах. Найденное при этом значение $n_r' \approx 5$ вероятно занижено, так как по некоторым сведениям оно равно 10. При установленной на входе в циклон лопасти повторный унос пыли становится заметным и кажущееся значение n_r' приближается к 2, когда скорость запыленного газового потока на входе в циклон (при атмосферном давлении) составляет ~ 15 м/сек.

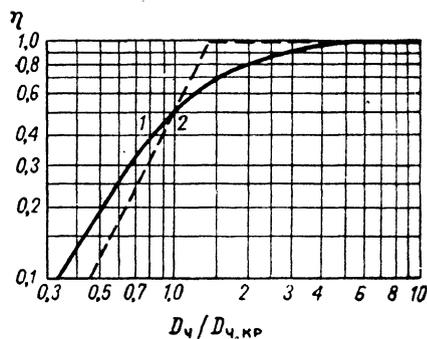


Рис. III-89. Эффективность улавливания пыли циклонами:

1 — экспериментальные данные для циклона с геометрическими соотношениями, приведенными на рис. III-86; 2 — данные, рассчитанные по теоретическому уравнению Розина, Раммлера и Интельмана.

Указанные значения n_r' определялись при условиях относительно низкой агломерации пыли в газовом потоке.

По рис. III-89 определяется эффективность ожидаемого улавливания пыли с заданным размером частиц, но в потоке, поступающем в циклон, обычно содержатся частицы различных размеров. Следовательно, общая эффективность улавливания является суммой эффективностей, подсчитанных в соответствии с долями частиц каждого размера в запыленном газе. Если фракционный состав пыли известен, то общая эффективность улавливания может быть подсчитана графически по вычерченным значениям η и Φ (рис. III-90), соответствующим одному и тому же размеру частиц. Общая эффективность улавливания определяется по средней ординате кривой, т. е. по ординате, для которой заштрихованные области равны.

Во многих случаях удовлетворительная точность достигается, когда общая эффективность улавливания принимается равной совокупному содержанию частиц с диаметром, большим, чем критический размер $D_{ч, \text{кр}}$ пыли, поступающей в циклон. При заданной скорости газа на входе в циклон возрастание температуры (для частиц с широким диапазоном размеров) вызывает соответствующее снижение эффективности улавливания.

¹ Iinoya, Mem. Faculty Eng., Nagoya Univ., 5 (2), Sept. 1953.

² First, Fundamental Factors in the Design of Cyclon Dust Collectors, Doctoral Thesis, Harvard University, May 1950.

³ Davies, Proc. Inst. Mech. Engrs, B.1B, 185 (1952). — Lapple, Shepherd, Ind. Eng. Chem., 32, 605 (1940).

⁴ Ter Linden, Proc. Inst. Mech. Engrs, 160, 233 (1949).

⁵ Rosin, Rammeler, Intelmann, Z. Ver. Deutsch. Ing., 76, 433 (1932).

Необходимо отметить, что при заданных размерах циклона постоянная эффективность улавливания будет сохраняться при любой температуре, если перепад давления не меняется, т. е. влияние изменений плотности газа и вязкости взаимно компенсируется.

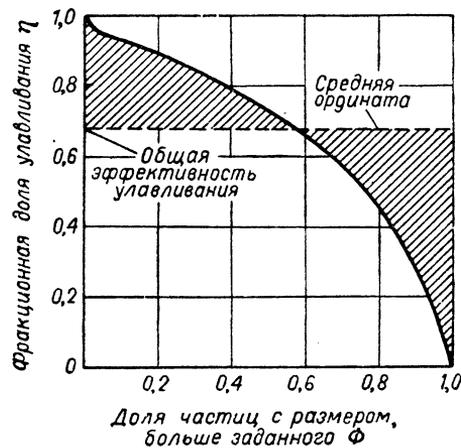


Рис. III-90. Расчет общей эффективности улавливания.

В табл. III-27 приведены экспериментальные значения эффективности улавливания, найденные Андерсоном для геометрически подобных циклонов такого типа, как показанный на рис. III-88, *d*. Эта таблица предназначена для оценки порядка величины эффективности улавливания, ожидаемой для частиц разных размеров.

ТАБЛИЦА III-27

Экспериментальные значения эффективности улавливания пыли из атмосферного воздуха

Скорость газа на входе в циклон, м/сек.	13,4
Перепад давления в циклоне, мм вод. ст.	100
Концентрация пыли на входе в циклон, г/м ³	4,5—11,5
Плотность пыли, кг/м ³	3000
Соотношение размеров циклона	$V_{вх} \approx D_{ц}/6$
Размер частиц, мкм.	5 10 20
Количество частиц, превышающих данный размер, %	74 64 43

Диаметр циклона, мм	Количество уловленной пыли, %		
	90 (общий)	66 (— 5 мкм)	98 (+ 5 мкм)
150	83	60 (— 10 мкм)	99 (+ 10 мкм)
230	70	47 (— 20 мкм)	98 (+ 20 мкм)

Параметры для расчета циклонов. В основу расчета циклонов положены пределы перепада давления. Для установок, работающих при давлении, близком к атмосферному, максимальный перепад давления ограничен достигаемым напором вентилятора. Этот перепад давления соответствует скорости газа 6—21 м/сек на входе в циклон. Чаще всего циклоны рассчитывают на входную скорость 15 м/сек.

В процессе извлечения пыли эффективность улавливания можно менять в небольших пределах, варьируя рабочие условия. Одним из расчетных факторов, используемых для изменения эффективности улавливания, является диаметр циклона. Циклоны меньшего диаметра, работающие при том же перепаде давления, что и превышающие их по размерам, будут иметь более высокую эффективность¹. Однако при заданной производительности использование циклонов малого диаметра обуславливает увеличение числа параллельно устанавливаемых аппаратов. В таких случаях пыль из отдельных циклонов может разгружаться в общий приемный бункер². В конце расчета приходится делать выбор между какой-либо определенной величиной эффективности улавливания и сложностью технологической установки.

Обычно на заданную производительность рассчитывают одиночный циклон. Если необходимой эффективности улавливания нельзя достигнуть в одиночном аппарате, устанавливают параллельно несколько циклонов.

Циклоны, работающие последовательно, применяют в следующих случаях:

- 1) когда пыль имеет широкий диапазон размеров частиц с большой долей частиц диаметром <15 мкм; в этом случае первым устанавливают циклон большого диаметра для улавливания грубой фракции и уменьшения нагрузки многотрубной установки малого диаметра;
- 2) когда пыль имеет тенденцию к агломерации в оборудовании, предшествующем циклонам, и в самих циклонах.

В последнем случае эффективность улавливания, подсчитанная на основе окончательного распределения частиц по размерам, не будет очень большой. Хотя и установлено, что эффективность увеличивается с повышением производительности циклонов по газу³, этот вывод может оказаться неверным из-за эффекта дефлуляции при более высоких скоростях газа. Подобным же образом расчет пропорциональных изменений, следствием которых является увеличение эффективности улавливания дисперсной пыли, может оказаться неверным в случае агломерации твердых частиц.

Уменьшение диаметра трубопровода, отводящего газ, приводит к увеличению эффективности улавливания и возрастанию перепада давления. Увеличение высоты циклона повышает эффективность улавливания, однако надежных данных в этой области пока не имеется. Нет также надежных сведений относительно влияния соотношения размеров входного отверстия на эффективность улавливания, хотя выведенное Розинным, Раммлером и Ингельманном уравнение дает возможность заключить, что при заданной скорости газа на входе в циклон ширина входа должна быть минимальной. Во избежание чрезмерного перепада давления, обусловленного попаданием струн газа в корпус циклона, необходимо, чтобы вход был плавным. Рекомендации по выбору оптимального угла конуса противоречивы, однако большинство высокоэффективных циклонов имеет длину конуса в пределах 1,6—3,0 диаметра циклона.

Циклон работает одинаково хорошо как на всасывающей, так и на нагнетательной стороне вентилятора. Важнейшей причиной неудовлетворительной работы циклона является, вероятно, просачивание воздуха в пылеотвод из аппарата. Небольшое проникновение воздуха в этом месте может привести к значительному

¹ Anderson, Chem. a. Met., 40, 525 (1933). — Drijver, Wärme, 60, 333 (1937). — Whiton, Power, 75, 333 (1932); Chem. a. Met., 39, 150 (1932).

² Whiton, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, 63, 213 (1941).

³ Drijver, Wärme, 60, 333 (1937).

снижению эффективности улавливания, особенно для тонкой пыли.

Для непрерывного удаления пыли из циклона можно использовать ячейковые питатели, клапаны двойного шлюзования, шнековые транспортеры (последние только для тонкой пыли), а также специальные пневматические устройства. На рис. III-91 показан циклон, в котором газ и твердые частицы выводятся в одном месте.

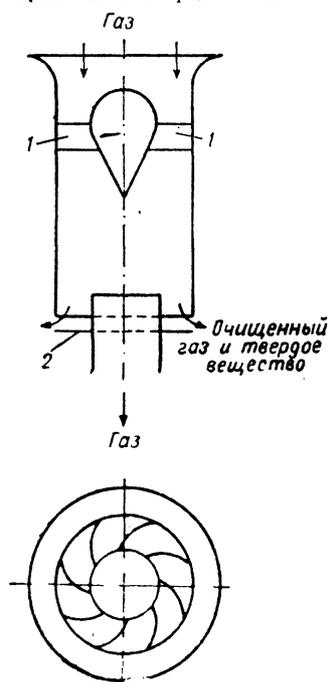


Рис. III-91. Прямоточный циклон:

1 — спиральные лопасти; 2 — отражательное кольцо.

циклонов желательно снизить, чтобы увеличить производительность по обрабатываемому газу; 3) производственные площади помещения ограничены. Если лопасть установлена на входе, то выгодно увеличить длину отводящего газ трубопровода внутри корпуса циклона. Плоский или конический отражатель, помещенный ниже отводящего трубопровода, устанавливается в том случае, если неизбежно всасывание наружного воздуха при выходе пыли. Для того чтобы наросты пыли на стенках циклона были минимальны, на отводящий трубопровод иногда подвешивают цепь. Такая цепь крепится к трубопроводу шарнирно для обеспечения свободного ее вращения без скручивания. До настоящего времени неизвестны приспособления для рекуперации энергии спиральной составляющей скорости газа в отводящем трубопроводе. По существу, всякое устройство, которое уменьшает перепад давления, одновременно уменьшает спиральную составляющую скорости газа в корпусе циклона, что ведет к снижению эффективности улавливания.

При малой нагрузке по пыли давление в пылеприемнике одиночного циклона будет ниже, чем в отводящем газ трубопроводе. Возрастающая нагрузка по пыли увеличивает давление в пылеприемнике. Такие устройства, как конусы, диски и входные лопасти, яв-

ляются причиной того, что давление в пылеприемнике может превысить давление в отводящем газ трубопроводе (при этом циклон будет работать в горизонтальном положении так же, как в вертикальном). Вообще же отклонение от вертикали может привести к закупориванию выводного отверстия для пыли, что обусловит снижение эффективности улавливания. Если выводной трубопровод циклона необходимо уменьшить в связи с тем, что размеры его заданы, переход должен быть сделан на расстоянии, превышающем пять диаметров по ходу от циклона, и предпочтительно после колена. Если нужно сделать переход к циклону, переходной патрубком должен иметь такое сечение, чтобы можно было избежать чрезмерного перепада давления.

Увеличение нагрузки циклона по пыли ведет одновременно к снижению перепада давления и возрастающей эффективности улавливания¹. При нагрузке по пыли свыше 460 г/м³ перепад давления может составить половину от расчетного в отсутствие пыли.

Промышленные типы циклонов. В промышленности используются разнообразные циклоны, начиная от длинных аппаратов, подобных изображенному на рис. III-86, и кончая короткими аппаратами большого диаметра. Низ циклона может быть коническим или цилиндрическим, а вход спиральным, тангенциальным, круглым или прямоугольным.

На рис. III-88 показаны некоторые из специальных типов промышленных циклонов.

В мультициклоне (батареином циклоне) спиральное движение сообщается газу посредством кольцевых лопастей, встроенных в многочисленные элементы диаметром 150 и 225 мм. Мультициклоны обычно применяются для улавливания летучей золы от паровых котлов. Трубы этих циклонов изготавливаются из чугуна литья или других эрозноустойчивых сплавов.

В циклонах «Дуклон» использованы витой вход и спиральная крышка, уменьшающие перепад давления. Чаще всего эти аппараты применяются в последовательных и параллельных циклонных установках после контактных аппаратов с псевдоожиженным твердым катализатором в нефтеперерабатывающей и металлургической промышленности. Изготавливаются они из обычной или нержавеющей стали и могут быть выложены внутри керамическим материалом. Конические перегородки, помещаемые в основании конуса и служащие для повышения эффективности улавливания, устанавливаются только при свободной стекающей пыли.

В циклонах Ван-Тонгерена для увеличения эффективности улавливания используется явление «двойного вихря» (посредством установки байпаса от верха до конической части циклона).

Циклон «Сирокко» типа D имеет выводящий трубопровод в виде раструба, который может быть изменен с целью увеличения или уменьшения эффективности улавливания при соответствующем увеличении или уменьшении перепада давления. Этот циклон обычно изготавливается из стали и может быть снабжен конусом из чугуна литья в случае применения в абразивных средах.

В установке «Дустекс» применены параллельно работающие циклоны диаметром 125 мм (нагрузка циклона по пыли не должна превышать 23 г/м³). Во избежание образования наростов пыли, забивания элементов и последующего плохого распределения газового потока используют вертикальные трубчатые поверхности и индивидуальные тангенциальные входы; для того

¹ Drijver, Wärme, 60, 333 (1937). — Shepherd, Lappe, Ind. Eng. Chem., 31, 972 (1939); 32, 1246 (1940).

чтобы свести к минимуму конденсацию влаги из газов при температуре, близкой к точке росы, допускают циркуляцию

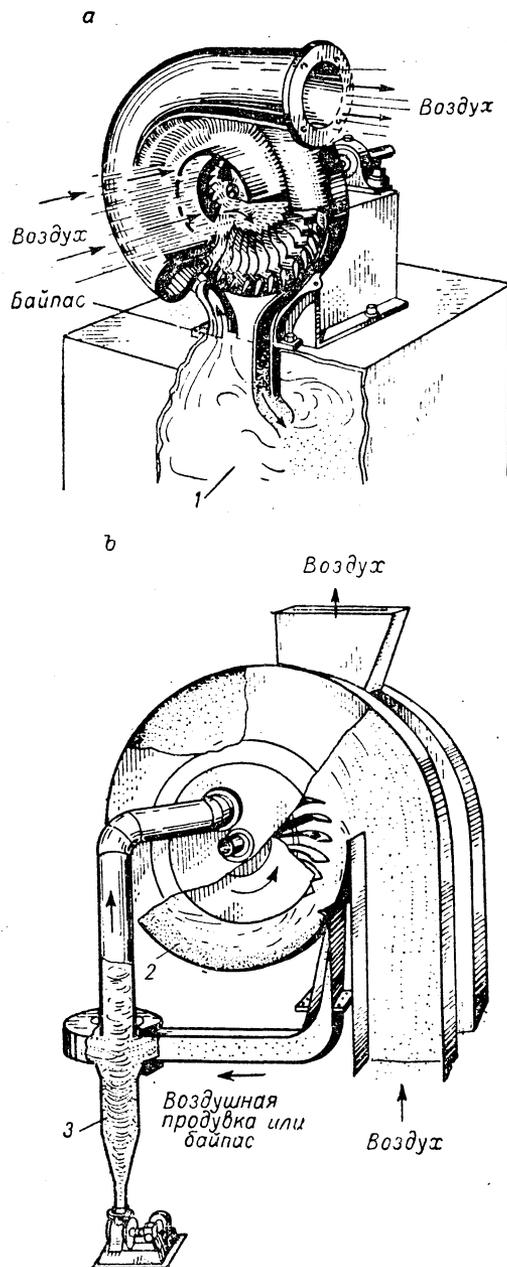


Рис. III-92. Типовые механические центробежные сепараторы:

a — ротор типа D; *b* — зольный вентилятор «Сирокко»;
1 — бункер для пыли; 2 — первичный уловитель;
3 — вторичный уловитель.

Механические центробежные сепараторы

Типовые механические центробежные сепараторы показаны на рис. III-92. В агрегате, изображенном на рис. III-92, *a*, воздуходувка (или вентилятор) и пылеуловитель представляют собой единое целое. Для подачи отделенной пыли в кольцевую прорезь лопатки имеют специальный профиль. Очищенный газ (воздух) поступает в улитку, а пыль — в сборный бункер. Установка, представленная на рис. III-92, *b*, обычно применяется на всасывающей стороне вентилятора, а ротор ее соединен с валом вентилятора. Запыленный газ (воздух) поступает с периферийной стороны улитки, движется через ротор и уходит наружу в его центре. Пыль, отброшенная к стенке улитки, концентрируется в небольшом потоке газа, который ответвляется в циклонный уловитель, где пыль осаждается. Эффективность улавливания пыли в установках такого типа, вероятно, сопоставима с эффективностью одиночного циклона с высоким перепадом давления. Основное преимущество этих установок — компактность, которая может оказаться главным фактором, если требуется большое количество отдельных пылеуловителей. Следует отметить, что при улавливании пылей, склонных к налипанию на твердые поверхности, ротор механического сепаратора может забиться и дебалансироваться, что обусловит высокие расходы на техническое обслуживание аппарата.

Сепараторы с зернистым слоем

В фильтре Линча¹ применен слой насадки из гравия. Гравий удаляется непрерывно снизу слоя, проходит через сито для удаления уловленной пыли и возвращается на верх слоя. Скорость газа при высоте слоя 300—1200 мм составляет $\sim 0,09$ м/сек, диаметр частиц гравия 12—25 мм, перепад давления ~ 25 мм вод. ст. Установки из обычной стали можно применять при температуре до 450°С, из высокохромистой стали — до 800°С, а из кирпича — до 1100°С.

Фильтры с гранулированным насадочным слоем могут быть применены для удаления субмикронных радиоактивных частиц из отходящих газов². Фильтр состоит из особо тонких фракций песка, помещенного в большой подземной емкости. Эффективность улавливания обычно равна 99,7%, если диаметр улавливаемых частиц составляет 0,2—0,7 мкм.

Электростатически заряженный псевдооживленный слой с успехом применяется для фильтрования аэрозолей³.

Отделение пыли в слое зернистого твердого вещества обусловлено: 1) гравитационным осаждением; 2) диффузионным отложением; 3) инерционным отложением; 4) ударным действием и 5) электростатическим осаждением. Особое значение электростатическое осаждение имеет в том случае, когда слой, составленный из частиц с высоким электрическим сопротивлением, перемешивается с целью получения высокого поверхностного заряда. В слоях из тонкой насадки, работающих при низкой скорости газа, преобладают гравитационное осаждение и диффузионное отложение; в этом случае при повышении скорости газа надо ожидать

¹ Linch, Fuel Economist, 12, 47 (Oct. 1936).

² Waste Disposal Symposium, Nucleonics, 4, 11 (1946). — Blasewitz, Judson, Chem. Eng. Progr., 51, 7-J (1955).

³ Zenz, Othmer, Fluidization and Fluid-particle Systems, chap. 1, New York, 1960. — Meissner, Mickley, Ind. Eng. Chem., 41, 1238 (1949).

циркуляцию очищенных газов снаружи циклонов. Конструкционными материалами для этих аппаратов являются чугуны и алюминиевое литье, а также нержавеющая сталь.

ТАБЛИЦА III-28

Значение $K_{тк}$ (ламинарный поток) и проницаемости по воздуху для некоторых промышленных тканей

Ткань	Размер пор, мм	Диаметр ниток, мм	$K_{тк}$, мм вод. ст. / спз (м/мин)	Проницаемость по воздуху, м ³ /мин
				$\frac{m^2}{\text{при } \Delta p = 12,7 \text{ мм вод. ст.}}$
Бумажная ткань				
Оснабург:				
чистая	0,25	0,5	42,5	16,5
грязная	...	...	1400	1,75
Тик	0,25	0,25	7,7	91,3
Сатин (без ворса)	0,18	0,23	22,5	31,1
	0,13	0,25	73,2	9,6
	...	0,3	135,6	5,2
	0,1	0,28	93,3	7,5
Шерстяная ткань		0,36	127,5	25,5
Найлон-саржа	...	0,25	5,5	12,8
Найлон-парусина	...	0,18	138	5,1
Абестон	...	...	46,6	15,1
Тефлон	...	...	116	6,05

чину $K_{с.л}$ можно подсчитать по уравнению Кармана¹, записанному в виде:

$$K_{с.л} = \frac{A(1-\epsilon)}{\varphi^2 D_{ч}^2 \rho_{тв} \epsilon^3} \quad (\text{III-28})$$

где ϵ — порозность слоя (безразмерная величина); φ — фактор формы частиц (безразмерная величина); $D_{ч}$ — диаметр частиц; $\rho_{тв}$ — истинная плотность твердого вещества (частиц); A — константа, зависящая от размерности входящих в уравнение величин.

Достаточного количества данных для использования уравнения (III-28) обычно не имеется, и величину $K_{с.л}$ чаще всего приходится определять экспериментально. Практические пределы значений $K_{с.л}$ в зависимости от размера частиц представлены на рис. III-93. В большинстве случаев в литературных источниках, по которым составлен рис. III-93, точных данных о размерах частиц не приводится, поэтому для кривых взят приблизительный интервал $D_{ч}$. Примерные пределы для большого количества пылей показаны на рис. III-93. Теоретические кривые получены по уравнению (III-28) при заданных значениях φ , $\rho_{тв}$ и ϵ . Из рис. III-93 следует, что для частиц меньших размеров значение ϵ возрастает. Для частиц < 10 мкм значения $K_{с.л}$, вероятно, становятся постоянными, причем возрастающая порозность компенсирует уменьшение размеров частиц. Для грубых пылей величина $K_{с.л}$ изменяется обратно пропорционально квадрату диаметра частицы; это значит, что порозность не должна меняться с изменением размеров частиц.

Уравнение (III-28) справедливо только в тех случаях, когда длина среднего свободного пробега молекул газа мала по сравнению с размером частиц пыли. Если размер частицы приближается к длине среднего свободного пробега молекул газа, то должен быть

¹ Carman, Trans. Inst. Chem. Engrs (London), 15, 150 (1937).

понижения эффективности улавливания. В слоях из грубой насадки, работающих при более высоких скоростях, но ниже скорости псевдооживления, доминируют инерционное отложение и ударное действие, а увеличение скорости газа приводит к возрастанию эффективности улавливания до тех пор, пока не начнется унос осажденного материала.

Рукавные фильтры

Имеются два основных типа рукавных фильтров. Оба они обеспечивают эффективность улавливания свыше 99% и пригодны для полностью автоматизированной работы. В одном из фильтров в качестве фильтровальной перегородки применяется сравнительно тонкий тканый материал, а во втором используется фетр.

Фильтры с применением тканого материала. В этих фильтрах запыленный газ пропускается через ткань, задерживающую твердые частицы на своей поверхности. Обычно поры ткани во много раз превосходят размеры отделяемых частиц, поэтому когда запыленный газ проходит через чистую ткань, эффективность улавливания будет низкой до тех пор, пока на ткани не образуется достаточной толщины слой осевших частиц. Для пылей, которые обычно встречаются в промышленных процессах, этот вспомогательный слой будет образовываться за несколько минут или даже секунд. Как только такой слой образуется, эффективность улавливания превысит 99%. Снижение высокой эффективности улавливания может происходить вследствие неправильного содержания оборудования, например, из-за прорыва рукавов.

Поток, проходящий через фильтровальную среду, будет иметь ламинарный характер. Перепад давления в ткани можно выразить уравнением:

$$\Delta p = K_{тк} \mu v \text{ мм вод. ст.} \quad (\text{III-26})$$

где $K_{тк}$ — константа, зависящая от свойств ткани, мм вод. ст./спз (м/мин); μ — вязкость потока, спз; v — скорость движения потока сквозь ткань, м/мин.

Значения $K_{тк}$ для некоторых тканей приведены в табл. III-28. Когда поры заполнены пылью, значение $K_{тк}$ может быть в 10 раз больше, чем для чистой ткани.

Термин «проницаемость по воздуху» обычно употребляется для того, чтобы характеризовать пористость фильтровальной ткани. Проницаемость по воздуху (табл. III-28) определяется как скорость потока воздуха (в м³/мин) при 20°С и 1 атм, пропускаемого 1 м² чистой фильтровальной ткани при перепаде давления 12,7 мм вод. ст. (1/2 дюйма вод. ст.). Значение $K_{тк}$ легко вычислить, используя уравнение (III-26) и подставляя вместо v проницаемость по воздуху, вместо Δp величину 12,7 мм вод. ст. и вместо μ вязкость воздуха при 20°С и 1 атм. Это приводит к уравнению: $K_{тк} = 702/\text{проницаемость по воздуху}$.

Перепад давления в слое осажденной пыли может быть определен следующим образом:

$$\Delta p = K_{с.л} m v = K_{с.л} \mu v^2 \tau \text{ мм вод. ст.} \quad (\text{III-27})$$

где $K_{с.л}$ — константа, мм вод. ст./спз (г/м²) (м/мин); μ — вязкость потока, спз; m — масса твердого вещества, приходящаяся на единицу площади ткани, г/м²; v — скорость движения потока сквозь ткань, м/мин; c — концентрация пыли во входящем газовом потоке, г/м³; τ — время, мин.

Последнее равенство дает увеличение перепада давления вследствие накопления пыли за время t . Вели-

применен корректирующий фактор, учитывающий так называемый «скользящий поток», и величина $K_{сл}$ будет меньше, чем полученная по уравнению (III-28). При работе фильтра под атмосферным давлением корректирующий фактор становится существенным, если размер

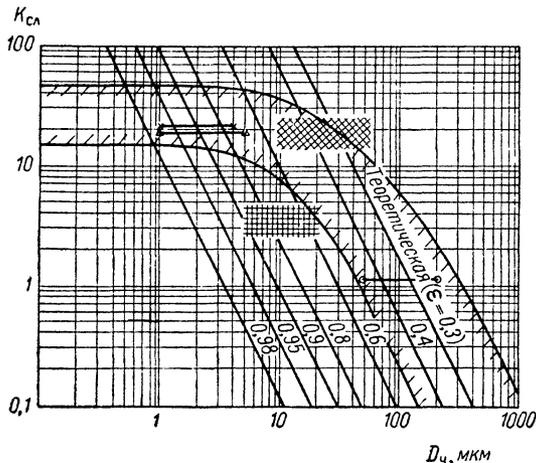


Рис. III-93. Факторы сопротивления $K_{сл}$ слоев пыли.

Теоретические кривые основаны на уравнении (III-28) при факторе формы $\phi = 0,5$ и истинной плотности твердых частиц $\rho_{ТВ} = 2000 \text{ кг/м}^3$.

- Приблизительные пределы данных для разных пылей [Williams, Hatch, Greenburg, Heating, Piping and Air Conditioning, 12, 259 (1940)].
- Угольная пыль — 75 мкм [Mumford, Markson, Ravese, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, 62, 271 (1940)].
- Пыль ацетата целлюлозы (агломерированная).
- Трубоводная пыль [Carpell, Gas, 15, 31 (August 1939)].
- Цинковая или тонкая обжиговая пыль.
- Пыль талька.

частиц уловленной пыли $< 5 \text{ мкм}$. Для уточнения значений $K_{сл}$, рассчитанных по уравнению (III-28), они должны быть разделены на корректирующий фактор¹:

$$\left[1 + K' \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\lambda_{ср}}{\phi D_ч} \right) \right]$$

Здесь K' — коэффициент пропорциональности; $\lambda_{ср}$ — длина среднего свободного пробега молекул (обычно рассчитывается по кинетической теории газов) газа; $D_ч$ — диаметр частиц; ε — порозность слоя. Значение K' , по существу, постоянно и равно приблизительно 15.

Вильямс и другие исследователи² определяют фактор сопротивления осадка K_1 (табл. III-29) так:

$$K_1 = \frac{\Delta p}{v W} \quad (\text{III-29})$$

где Δp — перепад давления в слое осадка (не включает перепада давления в ткани), *мм вод ст.*; W — массовая скорость пыли на подходе к фильтровальной ткани, *кг/(мин · м²)*; v — скорость газового потока, *м/мин*.

ТАБЛИЦА III-29

Значения K_1 при фильтровании атмосферного воздуха

Пыль	Значения K_1 для частиц с размерами меньше			
	90 мкм	45 мкм	20 мкм	2 мкм
Гранит . . . . .	. . . . .	. . . . .	337	
Гипс . . . . .	. . . . .	. . . . .	322	
Полевой шпат . . . . .	. . . . .	. . . . .	465	
Камень	107,4	. . . . .	
Ламповая сажа . . . . .	. . . . .	. . . . .		804
Окись цинка . . . . .	. . . . .	. . . . .		268
Древесная пыль	107,4	. . . . .	
Смола (холодная) . . . . .	. . . . .	. . . . .	430	
Зерно	64,4	150		
Овес	163,5	187,5		

Приведенное выше уравнение получено в результате исследования фильтрования воздуха при окружающих условиях, поэтому вязкость газа можно было не учитывать. Так как перепад давления прямо пропорционален вязкости газа [см. уравнение (III-26)], то поправку для иных чем у окружающего воздуха вязкостей сделать нетрудно.

Газовые фильтры с применением тканого материала, используемые в промышленных установках, могут быть двух типов.

В фильтрах первого типа применяются конверты из ткани, натягиваемые на металлические сетки (рис. III-94, *a* и *b*), в фильтрах второго типа — овалы или круглые вертикально смонтированные рукава (рис. III-94, *c* и *d*) диаметром 125—200 мм и длиной 2,5—5,2 м. Площадки для доступа к рукавам и их обслуживания обычно устанавливаются со стороны чистого газа. Небольшие фильтры можно отряхивать вручную, вообще же предусматривается механическое встряхивание. Таким образом, возможна полностью автоматизированная работа, если предусмотреть реле времени, двигатель для встряхивания и разгрузочные клапаны (пневматические или механические). Фильтры малых размеров (площадь ткани менее 93 м²) обычно поставляются в собранном виде. Большие установки собираются из прямоугольных параллельных секций, объединяемых в одном корпусе (в каждой секции от 93 до 186 м² ткани). Фильтр монтируется так, что одна или более секций могут быть временно отключены для очистки или ремонта (может быть предусмотрено также увеличение производительности в дальнейшем за счет увеличения количества секций). Корпус фильтра чаще всего имеет прямоугольную форму, но может быть и круглым, если по условиям эксплуатации фильтр работает под избыточным давлением или под вакуумом.

Фильтры с применением тканого материала работают при перепаде давления 50—150 мм вод. ст. и рассчитываются на производительность 0,3—2,5 м³ газа/(мин · м²). В случае очень тонких пылей или при высоких нагрузках по пыли производительность фильтра не должна превышать 0,9 м³/(мин · м²). Для очень

¹ Carman, Arnell, Canad. J. Res., 26(A), 128 (1948).

² Williams et al., Heating, Piping and Air Conditioning, 12, 259—263 (1940).

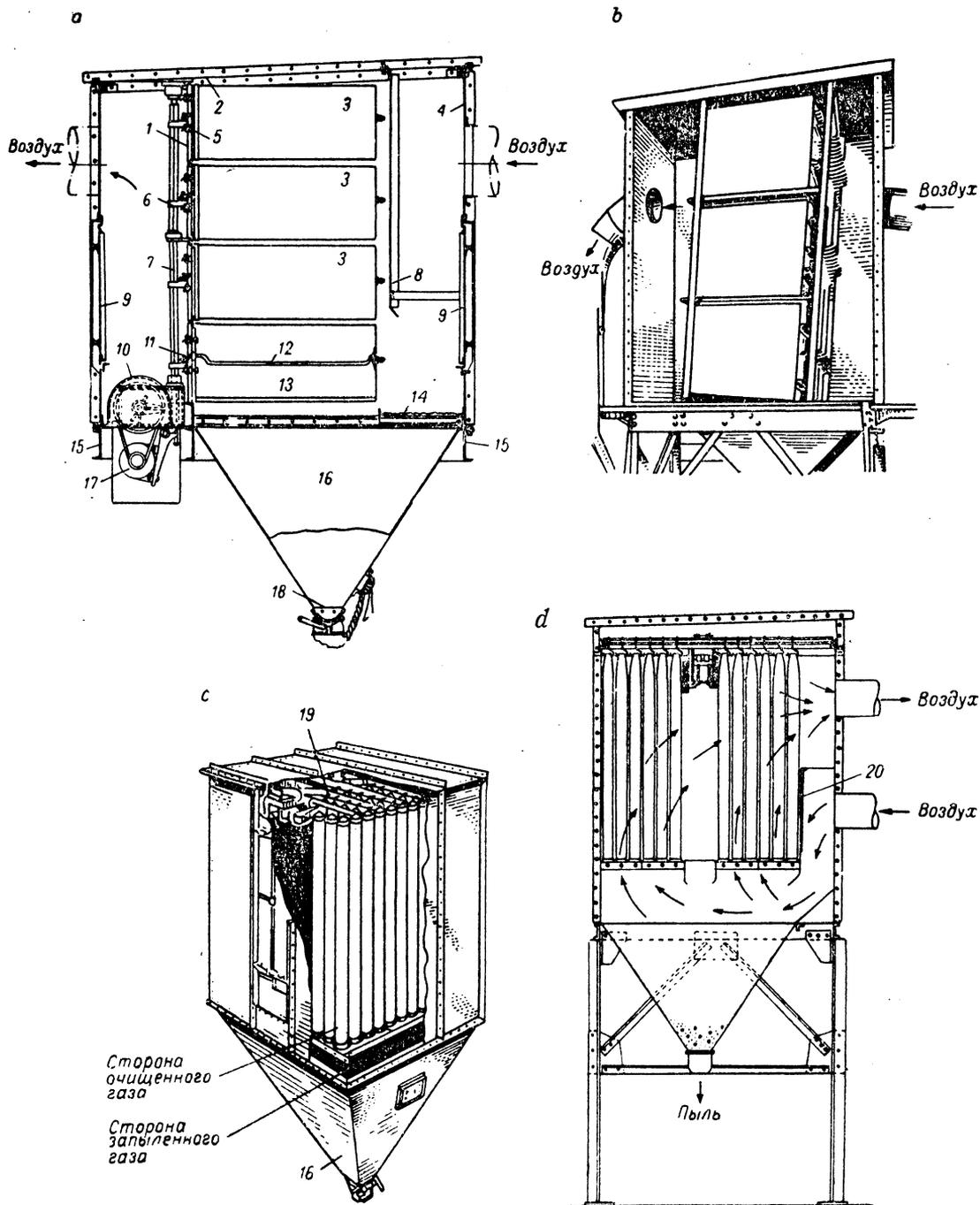


Рис. III-94. Типовые фильтры с применением тканого материала:

a — ящичный или конвертный тип (вид секции); *b* — ящичный или конвертный тип (вид в разрезе); *c* — рукавный тип (вид в разрезе); *d* — рукавный тип (вид секции).

1 — решетка; 2 — крышка; 3 — сетка; 4 — обшивка; 5 — хомуты; 6 — плечо рычага; 7 — рукоятка рычага; 8 — сменная перегородка; 9 — лаз; 10 — встряхивающий механизм; 11 — тяга к ударнику; 12 — ударник сетки; 13 — сетка со снятой тканью; 14 — проволочная сетка для ходьбы; 15 — опора; 16 — бункер; 17 — электродвигатель; 18 — затвор бункера; 19 — устройство для подвешивания и встряхивания рукавов; 20 — отражательная перегородка.

тонких липких пылей мешочный фильтр лучше сеточного или конвертового, так как он снабжен более эффективным встряхивающим устройством. При высокой

тн. Хлопчатобумажные ткани все еще находят широкое применение ввиду их низкой стоимости, но условия эксплуатации таких тканей ограничены низким

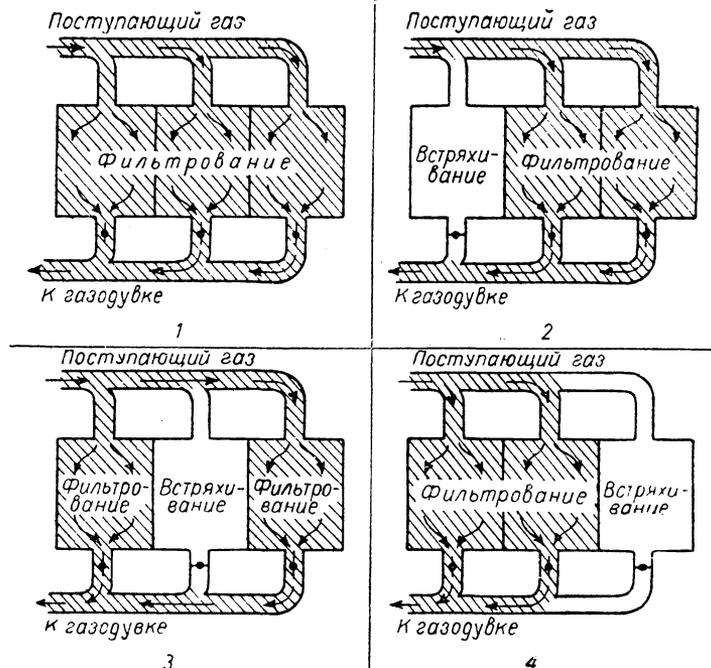


Рис. III-95. Трехсекционный рукавный фильтр в различных стадиях цикла очистки:

1—4 — последовательность стадий.

нагрузке фильтра по пыли можно применять предварительную циклонную очистку газа.

В зависимости от условий работы фильтры необходимо очищать через каждые $\frac{1}{4}$ —8 ч. Для определения срока очистки к фильтру обычно присоединяют манометр. Полностью автоматизированные фильтры могут очищаться каждые 2 мин, однако ремонт рукавов будет более редким, если время между встряхиваниями можно увеличить до 15—20 мин без чрезмерного повышения перепада давления. Во время встряхивания подачу запыленного газа прекращают (иногда при очень тонкой пыли одновременно необходимо уравнивать давление сквозь ткань¹). На практике это может быть достигнуто без перерыва в работе фильтра — выключением на время одной из секций (рис. III-95). В автоматических фильтрах эта операция совершается в следующей последовательности: закрытие дросселя — встряхивание секции фильтра (пневматическим или механическим способом), сопровождаемое в некоторых случаях обратным током очищенного газа через фильтр, — открытие дросселя. В автоматических фильтрах, управляемых сжатым воздухом, вся эта операция продолжается 2—10 сек, в обыкновенных фильтрах с автоматическим контролем — около 3 мин. Для очистки рукавов можно использовать также обратный ток газа при одновременной звуковой вибрации (рис. III-96).

В качестве фильтровального материала в тканевых рукавных фильтрах прежде обычно использовался са-

температурными пределами. Наиболее распространенные фильтровальные ткани приведены в табл. III-30. Применение стеклоткани и асбеста в качестве фильтровальных материалов приводило ранее к частым авариям, однако в настоящее время их можно успешно использовать в этих целях. Клинг¹ сообщает о применении комбинированных стеклоасбестовых материалов при очистке газа доменных печей. Имеются также сведения об успешном использовании стеклоткани при очистке газов от окислов металлов и цементной пыли.

При выборе величины поверхности ткани необходимо руководствоваться экономическими соображениями. Поскольку перепад давления при заданных условиях изменяется пропорционально квадрату скорости газа, то большая площадь ткани ведет к значительному сокращению частоты встряхивания и увеличению срока службы рукавов, т. е. расходы на ткань при этом относительно невелики (особенно в малых установках). Чтобы поры ткани не забивались при работе фильтра,

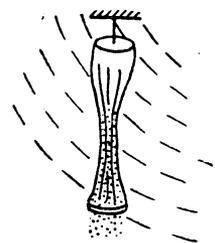


Рис. III-96. Рукав из стеклоткани с очисткой обратным током газа и звуковой вибрацией.

Рукав деформируется обратным током воздуха во время цикла очистки. Штриховыми линиями изображены волны от звукового генератора (200 циклов в секунду, 100—150 дб).

¹ Mumford, Markson, Ravese, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, 62, 271 (1940).

¹ Kling, Blast Furnace Steel Plant, 34, 1257 (1946).

ТАБЛИЦА III-30

Материалы для сухого фильтрования

Принятые показатели качества: А — отличное; В — выше среднего; С — среднее; D — ниже среднего; E — плохое.

Волокно	Сопротивление растяжению	Сопротивление истиранию	Рекомендуемая максимальная рабочая температура при различной продолжительности эксплуатации, °C		Химическая стойкость		Воспламеняемость	Специальные свойства
			месяцы	часы	кислоты	щелочи		
Акрилан (полиакрилонитрил)	С	С	120	150	D	D	Да	
Арнель (триацетат целлюлозы)	E	E	120	150	D	D	Да	Модифицированная целлюлоза; имеет улучшенную тепловую и бактериальную стойкость
Верел	С	E	95	120	С	D	Нет	Верел FR имеет лучшую огнестойкость, чем шерсть
Дакрон (полиэфир)	A	A	135	175	B	С—D	Да	Более быстрое разрушение идет в присутствии тепла и влаги
Дарван (нитрил)	С	E	155	160	B	D	Да	Плавится выше 165° C
Динель (сополимер акрилонитрила и винилхлорида)	С	С	80	115	B	A	Нет	Хорошо сохраняет размеры при 150° C
Кодель (полиэфир)	С	С	135	175	B—C	С—D	Да	Размягчается и коробится при температурах выше 80° C
Найлон 6 (полиамид)	A	A	95	120	E	B	Да	Теплоустойчив
Найлон 66 (полиамид)	A	A	95	120	E	A	Да	Мягок и гибок при воздействии тепла
Орлон 42 (полиакрилонитрил)	С	B	125	150	С	D	Да	Лучший термостойкий материал
Полиэтилен	A	A	65	100	A	A	Да	Чувствителен к некоторым органическим растворителям. Теплоустойчив. При продолжительных нагрузках удлиняется. Легче воды
Саран (винилиденхлорид)	D	С	65	95	A	B	Нет	Обладает высоким химическим сопротивлением до определенного температурного предела
Стекло	A	E	260	340	С	E	Нет	Обладает слабым сопротивлением изгибу и истиранию
Тефлон (полифторэтилен)	С	D	230	285	A	A	Нет	Обладает высоким химическим сопротивлением, теплоустойчив. При нагревании > 200° C разлагается с выделением ядовитого дыма
Хлопчатобумажное (целлюлоза)	С	B	70	120	E	A	Да	
Цефран	С	С	105	130	С	D	Да	
Шерсть (протени)	Влажная E; сухая D	Влажная и сухая C	95	120	E	E	Нет	
Q957 (винилиденхлорид)	С	—	105	115	B	B	Нет	Нити изготавливаются из пленки. Выпускаются также плоские ленты

необходимо поддерживать температуру газа выше точки его росы.

Фильтры с применением валяных материалов. Нагрузка фильтров, в которых используются тканые материалы, ограничена $0,3—2,5 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)$ из-за уплот-

Фильтр Герсея (рис. III-97, а) был первым промышленным фильтром с применением валяных материалов. На рис. III-97, б и с изображены два промышленных реверсивно-струйных фильтра, разработанных на основе фильтра Герсея.

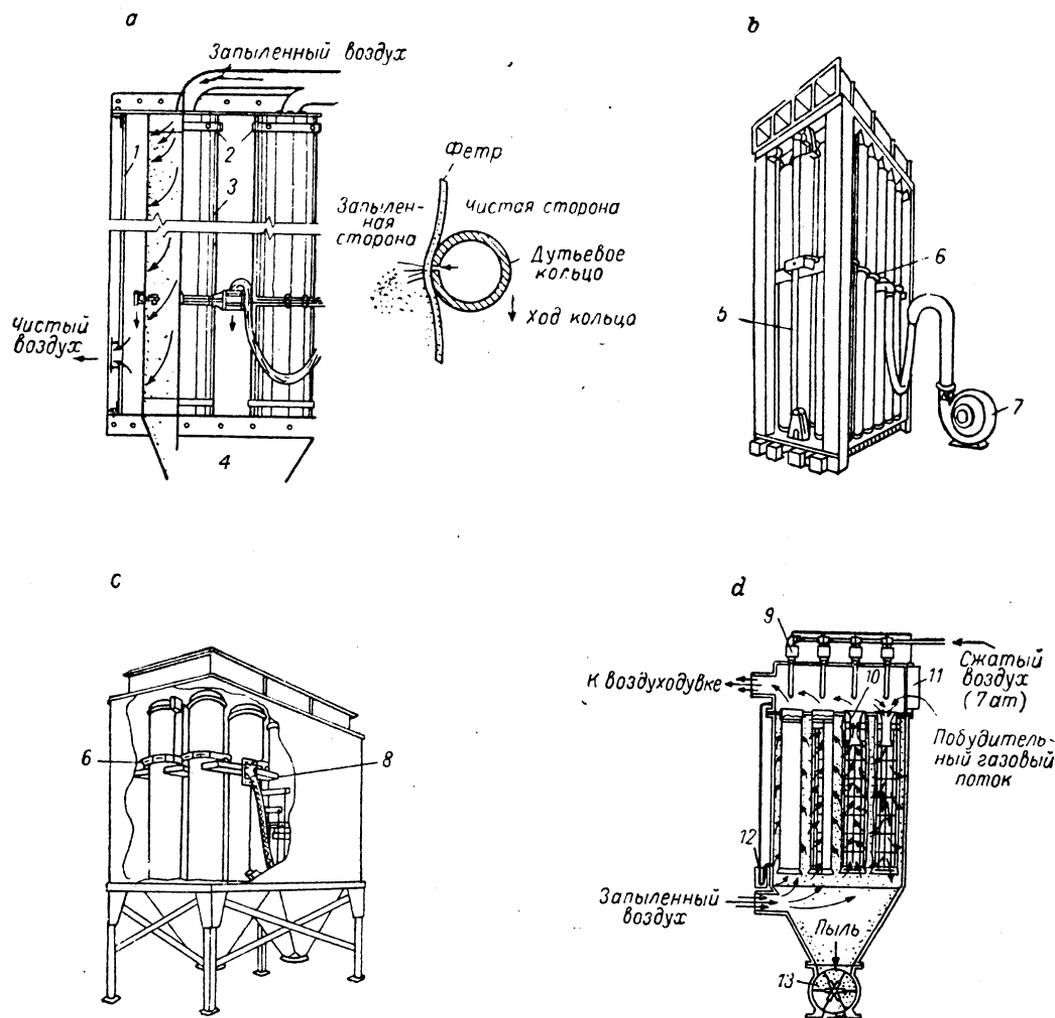


Рис. III-97. Типовые фильтры с применением фетровых тканей:

а — реверсивно-струйный фильтр Герсея [H e r s e y, Ind. Chemist, 31, 138 (1955)]; б — бескамерный тип реверсивно-струйного фильтра с применением фетровых рукавов (фильтр „Дэй АС“); с — камерный тип реверсивно-струйного фильтра (воздухо-поворотный фильтр Копперса); д — реверсивно-струйный фильтр, очищаемый побудительным потоком выходящего газа („Микро-Пульсайр-уловитель“).

1 — проволочный каркас; 2 — хомут; 3 — фильтровальный мешок; 4 — бункер; 5 — цепной привод для каретки дутьевого кольца; 6 — саморегулирующееся дутьевое кольцо; 7 — вспомогательный вентилятор; 8 — каретка дутьевого кольца с кабелем привода; 9 — клапан с соленоидом; 10 — сопло Вентури; 11 — реле времени; 12 — манометр; 13 — шлюзовая затвор.

няющего действия более высоких скоростей потока. Это ведет к значительному перепаду давления и, наконец, к местному прорыву в слое отфильтрованного осадка, что обуславливает повышенный проскок частиц. Применение фетра в качестве фильтровального материала позволяет увеличить скорости запыленного темп же твердыми частицами потока, так как слой осадка в уловителях этого типа играет меньшую роль, чем в фильтрах с применением тканых материалов.

Очистка фильтра (непрерывная или периодическая) производится посредством кольца, которое движется по наружной поверхности мешка. Сжатый воздух продувается из прорези на внутренней стороне кольца (ширина прорези 0,8 мм) сквозь фильтровальный материал в направлении, противоположном потоку запыленного газа. Дутьевое кольцо соприкасается с фетром и вдавливается в него, обеспечивая таким образом уплотнение в месте соприкосновения; струя газа при

этом проходит непосредственно через фетр. За счет вдавливания кольца также удаляется некоторый слой пыли.

Фильтровальный мешок изготавливается из фетра толщиной от 1,5 до 3 мм. Диаметр мешка 200—450 мм, длина до 5,8 м. Производительность фильтра по обрабатываемому газу находится в пределах от 1,5 до 9 м³/(мин · м²). Однако в последних конструкциях фильтров стремятся избегать скоростей, превышающих 4,5 м³/(мин · м²), и все большее количество пылеуловителей рассчитывают теперь на 1,5—3,0 м³/(мин · м²). Причина этого заключается в росте перепада давления, а высокий перепад давления вызывает более частую очистку фильтра, что, в свою очередь, ведет к

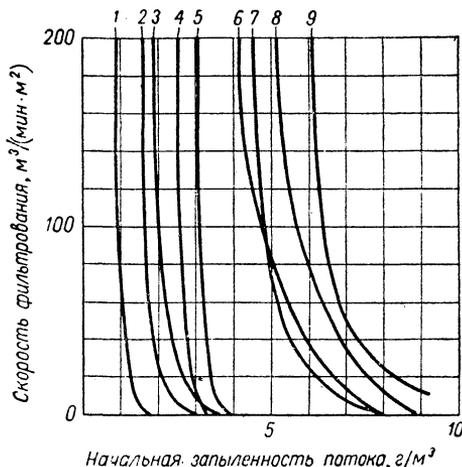


Рис. III-98. Типичные производственные данные, полученные на пылеуловителе „Брамик-Микро-Фил“ при перепаде давления 90 мм вод. ст. [Hersey, Ind. Chem., 31, 140 (1955)]:

кривые 1—6: пыль с размерами частиц, проходящих на 99,94—99,99% через сито с ячейкой 40 мкм в свету; кривые 7—8: пыль с размерами частиц, проходящих на 95% через сито с ячейкой 75 мкм в свету; кривая 9: пыль с размерами частиц ~ 200 мкм.

1 — трисиликат магнезии; 2 — сажа; 3 — крахмальная пыль; 4 — смолы; 5 — инфузурная земля; 6 — каолин; 7 — цементная и известняковая пыль; 8 — угольная пыль; 9 — пыль кожевенного производства.

большому расходу фетра на мешки. Перепад давления не должен быть выше 150 мм вод. ст. Имеются сведения о нагрузках фильтра по пыли, превышающих 2 кг пыли/кг газа, но обычно концентрация пыли в поступающем на очистку газе меньше 90 г/м³.

Сводка данных о работающих установках¹ показывает, что из 88 установок перепад давления в 90% случаев находится в пределах 28—160 мм вод. ст. при среднем перепаде 66 мм вод. ст.; из 95 установок скорость фильтрации в 90% установок составляет 1,6—10 м³/(мин · м²) при средней скорости 4,1 м³/(мин · м²); из 68 установок нагрузка по пыли в 90% установок находится в пределах 0,115—18,5 г/м³ при средней нагрузке 1,4 г/м³; из 32 установок эффективность улавливания в 13 установках была выше 99,99%, в 24 установках выше 99,90% и в 8 установках 97,2—99,9%.

Типичные производственные данные представлены на рис. III-98.

Разрушение слоя отложенной пыли обуславливает проникновение некоторых частиц сквозь плотный фетр, поэтому, чем меньше действие будут оказывать обратные струи, тем выше средняя эффективность улавливания.

На рис. III-97, d представлен реверсивно-струйный фильтр без механически движущихся деталей. Пыль откладывается снаружи на фетровых трубах, которые имеют диаметр 115 мм при длине 1830 мм и снабжены сверху проволочными держателями. Очистка мешков производится посредством периодических толчков сжатого до 7 ат газа, который выходит вниз через сопла у вершин мешков и вызывает быстрый обратный ток газа сквозь фильтровальные трубы в процессе очистки. Это обеспечивает толчок мешков, и пыль падает в бункер. Мешки очищаются с определенной частотой, регулируемой реле времени, которое воздействует на соленоидные клапаны, находящиеся сверху каждой фильтровальной трубы. Время цикла регулируется по перепаду давления. Длительность толчка очистки равна 0,1 сек, потребление сжатого газа составляет 0,25—0,4 м³/мин (при атмосферных условиях) для фильтра, поверхность фильтрации которого равна 47,5 м².

В качестве фильтровального материала для реверсивно-струйных фильтров используется нетканый шерстяной фетр толщиной от 1,4 до 1,6 мм. Лишь немногие текстильные волокна (например, тефлон) имеют необходимые усадочные характеристики, пригодные для производства нетканого фетра. Остальные синтетические волокна, включая нейлон, орлон, акрилан, динел, дакрон и арпель, используются в виде сетчатого фетра, получаемого механическим плетением нитей вокруг сетки из того же материала.

Стоимость установки фетровых фильтров с автоматической реверсивно-струйной очисткой обычно ниже стоимости автоматизированных фильтровальных установок с тканевыми рукавами, так как первые требуют меньших производственных площадей, чем вторые. Стоимость 1 м² поверхности фильтрации в 2—4 раза выше для фетровых фильтров при той же допускаемой скорости фильтрации. Следовательно, стоимость фильтров в расчете на 1 м³ газа/мин приблизительно одинакова. Применение скоростей потока свыше 3 м/мин в реверсивно-струйных фетровых фильтрах ведет обычно к снижению стоимости оборудования.

Электрофилтры

Когда частицы, взвешенные в газе, подвергаются ионизации в электростатическом поле, они становятся заряженными и движутся под действием поля. Механизм электрического осаждения может быть сведен к следующему:

1) ионизация газа;

2) улавливание частиц; а) создание электростатического поля; б) задержание газа с тем, чтобы дать частицам возможность передвигнуться к осадительной поверхности; в) предупреждение нового увлечения осажденных частиц; г) удаление уловленных частиц из фильтра.

Имеются два основных класса электрических фильтров: одноступенчатый, в котором ионизация и улавливание твердых частиц объединены; двухступенчатый, в котором ионизация осуществляется в одной части фильтра, а улавливание твердых частиц — в другой. В теории электроосаждения принимается, что концентрация пыли в газе должна быть достаточно мала.

¹ Hersey, Ind. Chem., 31, 138 (1955).

Градиент напряжения (напряженность) поля. Так как приложенный потенциал обычно известен, то напряженность поля определяет режим этого поля. Когда протекающий ток мал (до начала искрового или коронного разряда), напряжение и градиент напряжения поля связаны следующими уравнениями¹: для параллельных пластин

$$E = \frac{U}{B} \quad (\text{III-30})$$

для концентрических цилиндров (проволака в цилиндре)

$$E = \frac{U}{r_0 \ln(D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}})} \quad (\text{III-31})$$

Здесь E — электростатический градиент напряжения, в/см ; U — разность электростатических потенциалов, в ; B — расстояние между пластинами, см ; r_0 — расстояние от оси концентрических цилиндров, см ; $D_{\text{нар}}$, $D_{\text{вн}}$ — наружный и внутренний диаметры провода или осадительного электрода соответственно, см .

Напряженность поля между параллельными пластинами постоянна, в то время как в пространстве между концентрическими цилиндрами она меняется, достигая максимального значения у поверхности центрального цилиндра. После установления короны протекающий ток становится заметным. Напряженность поля вблизи центрального электрода становится при этом меньше, чем определяемая уравнением (III-31), а в большей части зазора — несколько больше и однороднее [см. уравнения (III-36) и (III-38)].

Потенциал и ионизация. Чтобы началась ионизация газа, необходимо хотя бы в одном месте превысить электрическое сопротивление газа пробойю. Корона — это такой местный разряд, который сам по себе не может распространяться дальше. Искровой разряд является, по существу, выступающим вперед пространством короны, в котором происходит полный пробой газа на данном участке. Так как корона представляет местный пробой, она может возникнуть только в неоднородном поле². Следовательно, при параллельных пластинах имеет место только искровой разряд, а градиент напряжения поля, или разность потенциалов, определяется эмпирическими выражениями:

$$E_{\text{н}} = E_0 \left(1 + \frac{K_0}{Bd}\right) d \quad (\text{III-32})$$

$$U_{\text{н}} = E_0 Bd + K_0 E_0 \quad (\text{III-33})$$

где $E_{\text{н}}$ — электростатический градиент напряжения, требующийся для начала искрового разряда, в/см ; E_0 — константа электрического пробоя для газа, в/см ; K_0 — константа «энергетического расстояния» при электрическом разряде в газах, см ; d — отношение плотности газа к его плотности при 0°C и 760 мм рт. ст. (безразмерная величина); $U_{\text{н}}$ — разность электростатических потенциалов, требующаяся для начала искрового пробоя, в .

¹ Уравнения электротехники (связанные с процессом электрического осаждения частиц) пересчитаны из физической системы, принятой в оригинале, в техническую (вольт, ампер и т. д.). Для обратного перехода к уравнениям оригинала и его источников необходимо учесть, что физическая единица разности потенциалов равна 300 в , а единица силы тока — $3,2 \cdot 10^{-10} \text{ а}$. — Прим. ред.

² Whitehead, Dielectric Phenomena — Electrical Discharge in Gases, Princeton, 1927, p. 40.

Для воздуха при $Bd=0,1 \div 2,0$ величина $E_0=33\,360 \text{ в/см}$ и $K_0=0,048 \text{ см}$. Торнтон¹ дает также значения E_0 и K_0 для других газов. При концентрических цилиндрах корона образуется на центральной проволоке², когда:

$$E_{\text{к}} = E_0 \left(1 + \sqrt{\frac{K_0}{D_{\text{нар}}d}}\right) d \quad (\text{III-34})$$

$$U_{\text{к}} = \left(\frac{E_0 D_{\text{нар}} d}{2}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{K_0}{D_{\text{нар}}d}}\right) \ln \frac{D_{\text{вн}}}{D_{\text{нар}}} \quad (\text{III-35})$$

Здесь $E_{\text{к}}$ — электростатический градиент напряжения, требующийся для начала коронного разряда, в/см ; $U_{\text{к}}$ — разность электростатических потенциалов, требующаяся для начала коронного разряда, в .

Для воздуха $E_0=33\,000 \text{ в/см}$ и $K_0=0,18 \text{ см}$. Корона будет образовываться при $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}} > 2,718$. Если $D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}} < 2,718$, то коронный разряд, согласно уравнениям (III-34) и (III-35), не наблюдается, а происходит только искровой разряд.

На практике электрофильтры обычно работают без искрения при максимальном напряжении, поскольку оно усиливает как заряд частиц, так и осаждающее электрическое поле. Пробойный потенциал вообще выше при отрицательном заряде на коронирующем электроде и менее устойчив, когда корона имеет положительный заряд. Однако существует мнение, что образование озона значительно меньше при положительном коронном разряде, чем при отрицательном. Вследствие этого в промышленных электрофильтрах применяется отрицательный разряд, а положительный используется при кондиционировании воздуха.

ТАБЛИЦА III-31

Потенциал пробоя (тонкая проволока расположена концентрично в трубе)

Приведенные данные справедливы для газов, содержащих водяной пар, воздух, CO_2 и туман, при отрицательной полярности коронирующих электродов (температура $> 38^\circ \text{C}$, давление 1 атм).

Диаметр трубы, мм	Потенциал пробоя, в		Диаметр трубы, мм	Потенциал пробоя, в	
	максимальный	средне-квадратичный		максимальный	средне-квадратичный
103	59 000	45 000	228	90 000	69 000
152	76 000	58 000	305	100 000	77 000

В табл. III-31 приведены некоторые значения потенциала пробоя для случая тонких проволок, расположенных в трубах разных размеров. Потенциал пробоя меняется почти прямо пропорционально с изменением плотности газа и в значительной степени зависит от свойств материала, осажденного на электродах. Даже малые количества плохо проводящего материала, осевшего на электродах, могут заметно понизить потенциал пробоя. При положительной полярности разрядного электрода потенциал пробоя будет значительно ниже. Существенное влияние на потенциал пробоя оказывают температура и влажность газа (рис. III-99).

¹ Thornton, Phil. Mag., 28 (7), 666 (1939).

² Loeb, Fundamental Process of Electrical Discharge in Gases, New York, 1939. — Peek, Dielectric Phenomena in High-voltage Engineering, New York, 1929. — Whitehead, Dielectric Phenomena — Electrical Discharge in Gases, Princeton, 1927.

Величина тока. Коронный разряд сопровождается электрическим током относительно малой величины (обычно от 0,1 до 0,5 ма/м^2 расчетной площади осадительного электрода). Пробую обычно сопутствует значительно больший ток, который допустим только в течение долей секунды и обязательно при предусмотренном ограничителе тока. Кроме разрушающего воздействия на оборудование и электроды, пробой приводит к уменьшению эффективности улавливания из-за сни-

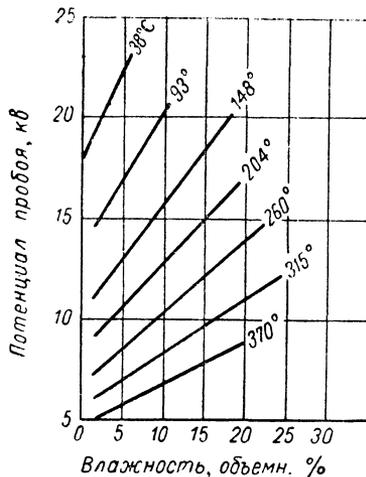


Рис. III-99. Зависимость потенциала пробоя (отрицательное острие — плоскость, промежуток 12,7 мм) от влажности и температуры воздуха при давлении 1 атм [Sproull, Nakada, Ind. Eng. Chem., 43, 1356 (1951)].

жения приложенного напряжения, нового диспергирования осажженной пыли и образования каналов тока. Для расчета величины тока короны можно использовать уравнение, выведенное при допущении постоянства пространственного заряда (плотности ионов)¹:

$$I = \frac{8,9 \cdot 10^{-7} \lambda_{\text{ион}} U (U - U_{\text{к}})}{D_{\text{вн}}^2 \ln(D_{\text{вн}}/D_{\text{нар}})} \quad (\text{III-36})$$

где I — электрический ток на единицу длины электрода, ма/м ; $\lambda_{\text{ион}}$ — подвижность ионов, $(\text{см/сек})/(\text{в/см})$.

Средний пространственный заряд (средняя плотность ионов) определяется по уравнению²:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{U - U_{\text{к}}}{75\pi D_{\text{вн}}^2 e} \quad (\text{III-37})$$

где $\sigma_{\text{ср}}$ — средняя плотность ионов (среднее число ионов, приходящихся на 1 см^3); e — элементарный электрический заряд ($e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ э.и.-ст. ед.).

В пространстве, окружающем область коронного разряда, напряженность поля примерно постоянна. Среднее ее значение можно рассчитать по уравнению:

$$E = 3000 \sqrt{\frac{2I}{\lambda_{\text{ион}}}} \quad (\text{III-38})$$

Это уравнение применимо, если разность потенциалов намного выше критического потенциала, требуемого для коронного разряда, и протекающий ток имеет значительную величину.

Данные о подвижности ионов имеются в литературе¹. Для воздуха при 0°С и 760 мм рт.ст. $\lambda_{\text{ион}} = 2,08$ (см/сек)/(в/см) для отрицательных ионов. Положительные ионы имеют меньшую подвижность.

Теоретическое уравнение для расчета подвижности ионов газа (погрешность $\pm 50\%$) имеет вид²:

$$\lambda_{\text{ион}} = \frac{0,334}{dV(\delta^0 - 1)M} \quad (\text{III-39})$$

где δ^0 — диэлектрическая константа при 0°С и 760 мм рт.ст.; M — молекулярный вес (молекулярная масса) газа, кг/кмоль ; d — плотность газа по отношению к его плотности при 0°С и 760 мм рт.ст.

Вообще подвижность ионов обратно пропорциональна плотности газа. Скорость ионов в обычном электрофилтре ~ 30 м/сек.

Электрический ветер. Под действием переноса количества движения от ионов, движущихся в электрическом поле, к молекулам окружающего газа возникает циркуляция газа между электродами, называемая «электрическим» или «ионным» ветром. Скорость циркуляции газа в электрофилтрах составляет $\sim 0,6$ м/сек. В итоге, как следствие переноса количества движения, давление у осадительного электрода несколько выше, чем у коронирующего³.

Заряжение частиц⁴. На ион газа вблизи частицы действуют следующие силы: силы притяжения, обусловленные напряженностью поля и эффектом ионного отталкивания, и отталкивающие кулоновские силы. Для круглых частиц с диаметром > 1 мкм эффектом ионного отталкивания можно пренебречь. Тогда заряжение будет происходить в соответствии с балансом указанных выше сил. Заряд частиц при этом рассчитывается по уравнению:

$$N_0 = \frac{1}{300} \left(\frac{\zeta ED_{\text{ч}}^2}{4e} \right) \left(\frac{\pi \sigma e \lambda_{\text{ион}} \tau / 300}{1 + \pi \sigma e \lambda_{\text{ион}} \tau / 300} \right) \quad (\text{III-40})$$

где N_0 — число элементарных электрических зарядов, приобретаемых частицей;

$\zeta = 1 + 2 \frac{\delta - 1}{\delta + 2}$ — отклонение

от единицы для материалов с диэлектрическими константами $\delta = 1 \div 3$; E — электростатический градиент напряжения, в/см ; $D_{\text{ч}}$ — диаметр частицы, см ; e — элементарный электрический заряд; σ — плотность ионов (число ионов в 1 см^3); $\lambda_{\text{ион}}$ — подвижность ионов, $(\text{см/сек})/(\text{в/см})$; τ — время, сек .

Конечный заряд, приобретаемый частицей за доли секунды:

$$N_0 = \frac{1}{300} \cdot \frac{\zeta ED_{\text{ч}}^2}{4e} \quad (\text{III-41})$$

Для частиц диаметром < 1 мкм первоначальное заряжение будет происходить в соответствии с уравнением (III-40), а конечный заряд (значительно больший

¹ International Critical Tables, vol. 6. New York, 1929, p. 107.

² Loeber, Basic Processes of Gaseous Electronic, Berkeley and Los Angeles, 1955, p. 53.

³ Whitehead, Dielectric Phenomena — Electrical Discharge in Gases, Princeton, 1927, p. 167.

⁴ Deutscher, Ann. Phys., 68 (4), 335 (1922); 9 (5), 249 (1931);

10 (5), 847 (1931). — Ladenburg, Ann. Phys., 4 (5), 863 (1930). — Mierdel, Z. tech. Phys., 13, 564 (1932).

¹ Ladenburg, Ann. Phys., 4 (5), 863 (1930).

² Whitehead, Там же.

вследствие эффекта ионного отображения) может быть определен с погрешностью $\pm 30\%$ по эмпирической формуле:

$$N_0 = AD_ч T_r \quad (III-42)$$

где T_r — температура газа; $D_ч$ — диаметр частиц.

Величины N_0 для различных размеров частиц приведены в табл. III-32.

ТАБЛИЦА III-32

Заряд и движение сферической частицы в электрическом поле при 20° С ($\xi = 2$; $E = E_{н. п} = E_{п. у} = 3000$ в/см)

$D_ч$, мкм	N_0	$u_{0. э}$, см/сек	$D_ч$, мкм	N_0	$u_{0. э}$, см/сек
0,1	10	8,2	2,5	655	8,0
0,25	25	4,6	5,0	2 620	15,2
0,5	50	3,7	10,0	10 470	30,0
1,0	105	3,4	25,0	65 500	73,0

Подвижность частиц. Приравнивая электрическую силу, действующую на частицу, сопротивлению, возникающему от трения о воздух (по закону Стокса), можно выразить подвижность частиц следующим образом: для частиц диаметром > 1 мкм

$$\lambda_ч = \frac{u_{0. э}}{E_{п. у}} = \frac{\xi D_ч E_{н. п} K_C}{12 \mu \cdot 300} \quad (III-43)$$

для частиц диаметром < 1 мкм

$$\lambda_ч = \frac{u_{0. э}}{E_{п. у}} = \frac{360 K_C e T_r}{\mu} \quad (III-44)$$

Здесь $\lambda_ч$ — подвижность частиц, (см/сек)/(в/см); $u_{0. э}$ — скорость частицы в направлении осадительного электрода, см/сек; $E_{п. у}$, $E_{н. п}$ — средний электростатический градиент напряжения в пространстве улавливания и в ионизированном пространстве, в/см; $D_ч$ — диаметр частиц, см; K_C — поправочный фактор Стокса — Каннингама; μ — вязкость потока, пз; e — элементарный электрический заряд; T_r — температура газа, °К.

Для одноступенчатых электрофильтров величины $E_{н. п}$ и $E_{п. у}$ могут рассматриваться как равные. Из уравнения (III-44) следует, что подвижность в электрическом поле будет почти одинакова для всех частиц диаметром < 1 мкм. Поэтому при отсутствии повторного увлечения пыли эффективность улавливания почти не зависит от размера частиц в этих пределах. Очень маленькие частицы будут иметь большую подвижность благодаря поправочному фактору Стокса — Каннингама.

Эффективность улавливания пыли. В одноступенчатом электрофильтре действительная подвижность частиц может быть значительно выше расчетной из-за действия электрического ветра. Однако электрический ветер действует до известной степени компенсирующе, и общий его эффект состоит, вероятно, в выравнивании концентрации частиц между электродами (аналогично действию нормальной турбулентности)¹. На этом

основании Дейч¹ вывел для расчета эффективности улавливания следующее уравнение:

$$\eta = 1 - e^{-(u_{0. э} A_{0. э} / V)} = 1 - e^{-K_э u_{0. э}} \quad (III-45)$$

где e — основание натуральных логарифмов ($e \approx 2,718$); $A_{0. э}$ — площадь осадительного электрода (со стороны осаждения), см²; V — объемный расход газа, см³/сек; $K_э$ — константа электрофильтра, сек/см.

Для осадителей типа концентрических цилиндров (или проволоки в цилиндре) $K_э = 4L_э / D_{вн} v_э$, для фильтров типа стержень — завеса или проволока — пластина $K_э = L_э / B_э v_э$ (здесь $L_э$ — длина осадительного электрода в направлении газового потока, см; $D_{вн}$ — внутренний диаметр трубчатого осадительного электрода, см; $B_э$ — расстояние между проводом и пластиной или между стержнем и завесой, см; $v_э$ — средняя скорость газа, проходящего через электрофильтр, см/сек). Уравнение (III-45) применимо только для частиц заданного размера, и общая эффективность улавливания должна быть получена методом интегрирования для конкретного распределения пыли. Впрочем, в ограниченных пределах производственных условий уравнение (III-45) дает достаточное приближение к общей эффективности улавливания при скорости движения частиц пыли, выраженной средними опытными цифрами. Такие значения, рассчитанные по общей эффективности улавливания, даны в табл. III-33.

ТАБЛИЦА III-33

Производственные данные для типовых одноступенчатых электрофильтров

Тип осадителя в электрофильтре	Вид пыли	Объемный расход газа, м ³ /мин	Средняя скорость газа, м/сек	Площадь осадительных электродов, м ²	Общая эффективность улавливания, %	Средняя скорость движения частиц, см/сек
Стержень — завеса	Плавленый дым	5100	2,44	4100	85	3,96
Карманный	Цемент	5770	2,9	2420	91	9,45
	Гипс (из печей)	710	1,07	353	99,7	19,5
Перфорированные пластины	Летучая зола	3060	2,44	1015	91	12,2

В двухступенчатых электрофильтрах с малым пространством между осадительными пластинами (см. рис. III-109 и III-111) газовый поток, по существу, ламинарный и электрический ветер отсутствует. Следовательно, пренебрегая повторным увлечением пыли, эффективность улавливания можно выразить следующим образом²:

$$\eta = \frac{u_{0. э} L_э}{v_э B_э} \quad (\text{для } \eta \leq 1,0) \quad (III-46)$$

На практике посторонние факторы могут быть причиной приближения эффективности улавливания к зна-

¹ Deutsch, Ann. Phys., 68 (4), 335 (1922); 9 (5), 249 (1931); 10 (5), 847 (1931).

² Penny, Electr. Eng., 56, 159 (1937).

¹ Mierdel, Z. tech. Phys., 13, 564 (1932).

чению, рассчитываемому по уравнению, подобному (III-45).

Рост давления увеличивает эффективность улавливания, хотя одновременно требуется более высокий потенциал (снижается подвижность ионов и, следовательно, увеличивается требуемый потенциал для короны и пробоя). Повышение температуры уменьшает эффективность улавливания, так как подвижность ионов увеличивается, снижая критический потенциал. А вследствие того, что вязкость газа при возрастании температуры увеличивается, скорость движения частиц уменьшается.

Применение. Теоретические соображения, изложенные выше, должны использоваться только для оценки порядка величин, поскольку на действительную производительность влияет много посторонних факторов. В промышленных установках применяется выпрямленный переменный ток, поэтому электрическое поле не постоянно, а меняется непрерывно в зависимости от формы волны выпрямителя. Однако Шмидт и Андерсон не считают форму волны главным фактором¹. Допуски на высокие концентрации пыли полностью не изучены, хотя Дейч² и представил теоретические вычисления. Кроме того, неровности на коронирующем электроде ведут к местным разрядам (неровности могут легко образоваться при осаждении пыли на коронирующих электродах). Высокая нагрузка фильтра по пыли увеличивает разность потенциалов, необходимую для образования короны, и уменьшает ток, зависящий от пространственного заряда частиц. Это ведет к уменьшению среднего заряда частиц и снижает эффективность улавливания.

Если осажденная пыль не является хорошим проводником, то может создаться высокая разность потенциалов в ее слое. Это не только уменьшает потенциал в потоке газа, но и может привести к образованию искрового разряда (с результирующей обратной ионизацией и повторным увлечением пыли). Шмидт и Андерсон³ утверждают, что это может быть контролирующим фактором при осаждении всех непроводящих пылей и туманов. Они установили, что увеличение относительной влажности на 5% может удвоить скорость осаждения вследствие влияния влажности на проводимость слоя осажденной пыли. Мирдель и Зелигер⁴ предлагают: избегать накопления толстого слоя пыли, применяя перфорированные или щелевые электроды; вводить влагу или проводящие соли с целью увеличения проводимости осажденного слоя пыли; изменять форму волны, используя для этого, например, переменный ток, наложенный на постоянный ток.

Бивер⁵, основываясь на работе Уайта, указывает, что критическое удельное сопротивление составляет 10^{10} ом·см. Для повышения проводимости в отдельных случаях успешно использовались пар, хлористый натрий, аммиак и другие вещества⁶.

Максимальное удельное сопротивление большинства пылей достигается при температуре ~ 95 — 120°C (температуры ниже 95°C и выше 260°C более выгодны, чем промежуточные)⁷. На рис. III-100 показано влия-

ние температуры и влажности на удельное сопротивление пыли. Влажность полезна по двум причинам: она уменьшает электрическое удельное сопротивление большинства пылей (исключением является пылевидная сера, которая, по-видимому, не абсорбирует воду) и увеличивает напряжение, которое может безопасно применяться без искрового пробоя (рис. III-99).

Чтобы достичь максимальной эффективности улавливания, электрические осадители работают под напряжением, близким к напряжению пробоя, но без заметного искрения. Практически $I=0,1 \div 1,0$ ма/м; $E=1500 \div 6000$ в/см; $\sigma=10^8$ — 10^9 см⁻³.

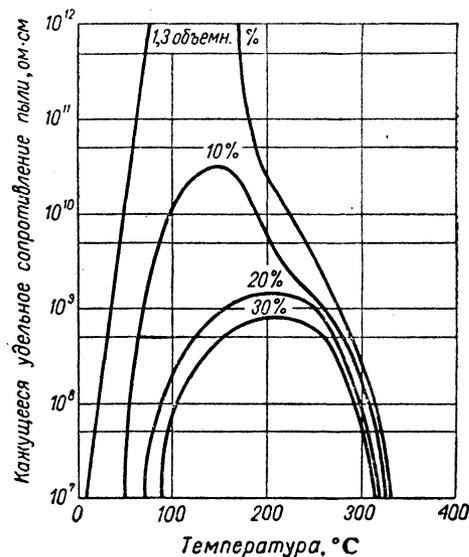


Рис. III-100. Зависимость кажущегося удельного сопротивления пыли из мартовской печи от температуры и влажности [Sproull, Nakada, Ind. Eng. Chem., 43, 1355 (1951)].

Одноступенчатые фильтры. Установки одноступенчатого типа, известные как осадители Коттреля, наиболее часто применяются для улавливания пыли или тумана из промышленных газов. Коронный разряд поддерживается во всем осадителе и, кроме предусмотренной начальной ионизации, служит для предупреждения повторного рассеивания осажденной пыли и для зарядки нейтрализованных или разряженных частиц. Осадители Коттреля можно разделить на два основных класса: 1) так называемый пластинчатый тип (рис. III-101), в котором осадительные электроды состоят из параллельных пластин, сеток или рядов стержней, цепочек или проволок и 2) трубчатый тип (рис. III-102), в котором осадительные электроды состоят из набора параллельных труб. Трубы могут иметь квадратную, круглую или любую другую форму. Разрядными или коронирующими электродами в обоих случаях являются провода или стержни (круглые, граненые), помещаемые между осадительными электродами или в центре труб и, в случае пластинчатых осадителей, параллельные или перпендикулярные потоку газа. В некоторых установках применяются коронирующие электроды, которые подобны колючей проволоке (рис. III-103, a). Чем острее профиль электрода, тем ниже напряжение, требуемое для получения данного

¹ Schmidt, Anderson, Electr. Eng., 57, 332 (1938).

² Deutsch, Там же.

³ Schmidt, Anderson, Electr. Eng., 57, 332 (1938). — Anderson, Physics, 3, 23 (July 1932).

⁴ Mierdel, Seeliger, Trans. Faraday Soc., 32, 1284 (1936).

⁵ Beaver, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 42, 251 (1946).

⁶ Welch, Trans. Am. Inst. Mining Met. Engrs, 121, 304 (1936).

⁷ Sproull, Nakada, Ind. Eng. Chem., 43, 1350—1363 (1951).

тока короны. Поскольку эффективность улавливания пыли находится в прямой зависимости от количества

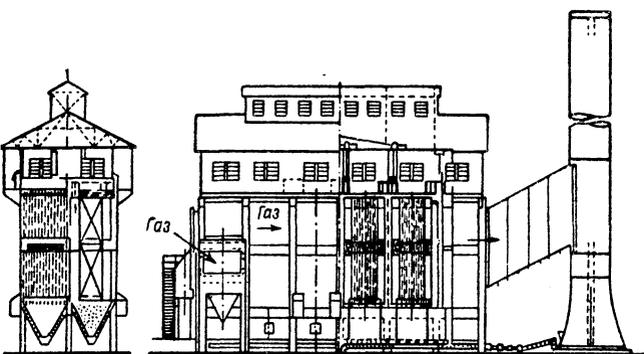


Рис. III-101. Пластинчатый фильтр с горизонтальным потоком, применяемый на цементном заводе.

электрической энергии, переданной газу, то считается, что этот тип электрода будет давать ту же самую эф-

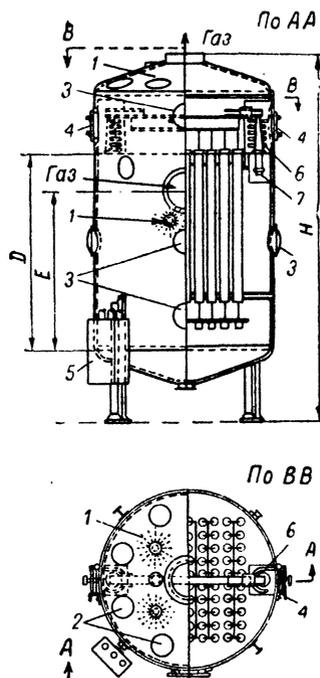


Рис. III-102. Трубчатый фильтр для доменной печи:

1 — разбрызгивающее сопло; 2 — люки; 3 — лазы; 4 — лазы электротехнические; 5 — камера управления водой; 6 — паровой змеевик; 7 — линия высокого напряжения.

Длина труб, мм	H, мм	D, мм	E, мм	Масса, т
3660	8660	4625	4625	32,5
4570	9550	4930	4930	35,0

фективность улавливания при более низком напряжении, что и электроды других типов (сравнительные величины приведены на рис. III-103, б). Данные из рис. III-103, б сведены на рис. III-103, с в одну кривую, представляющую затрату энергии в $\text{вт} \cdot \text{сек}/\text{м}^3$ обрабатываемого газа. Заводские испытания показали возможность наращивания непроводящей пыли на основной части проводов без изменения тока короны или ее распределения, так как острия остаются чистыми. Если

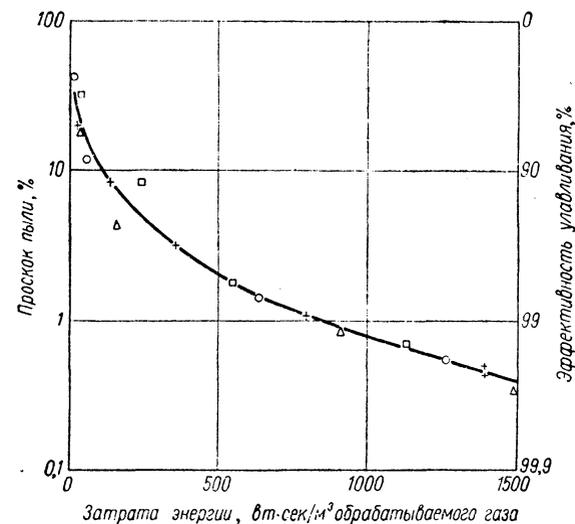
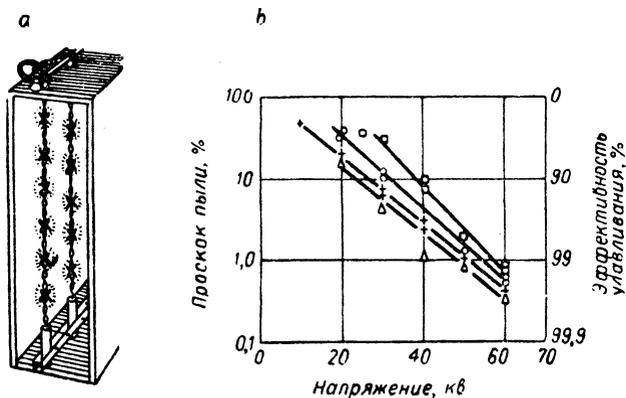


Рис. III-103. Проволочный коронирующий электрод с пучками:

а — сосредоточение короны у пучков; б — зависимость эффективности улавливания от напряжения для некоторых типов разрядных электродов; с — зависимость эффективности улавливания от затрат энергии.

□ — квадратная проволока; ○ — диски с промежутками; + — электрод с пучками (промежуток А); △ — электрод с пучками (промежуток В < А).

осадительные электроды изготовлены в виде сетки или завесы из стержней или проволок, то газы обычно направляют параллельно к ним в плане, а иногда и сквозь них. В трубчатых фильтрах газовый поток обычно направляют вверх по трубе, а в некоторых случаях сверху вниз. Фильтры трубчатого типа чаще всего применяются для удаления жидких частиц и возо-

ганных дымов^{1,2}, а пластинчатые фильтры в основном для улавливания пыли. В трубчатом фильтре коронирующие электроды обычно подвешены на изолированной раме и натягиваются с помощью груза. Кри² описывает применение электрофильтров для удаления смолы в газовой промышленности.

Осажденная пыль удаляется с электродов периодически или непрерывно механическим встряхиванием или очисткой, которые могут производиться автоматически или вручную. В случае пленочных фильтров, когда

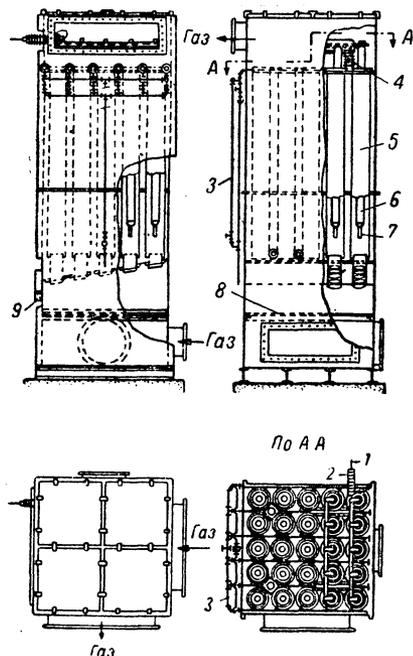


Рис. III-104. Двухступенчатый трубчатый фильтр с водной пленкой:

1 — линия высокого напряжения; 2 — вводный изолятор высокого напряжения; 3 — система притока воды; 4 — опорный изолятор; 5 — токопрямный электрод; 6 — осадительный электрод; 7 — ионизирующий электрод; 8 — распределительная пластинка; 9 — дренаж.

жидкость циркулирует по поверхности осадительных электродов (рис. III-104), осажденный материал удаляется непрерывно. Фильтры с перфорированными пластинами или стержневыми завесами часто встряхиваются без выключения газового потока и с электродами, находящимися под током. Это, впрочем, ведет к повторному увлечению осажденной пыли. Осадительные электроды в виде секционированных или составных пластин (иногда называемых пустотелыми, карманными или тюльпанными электродами) применяются для того, чтобы свести к минимуму повторное увлечение пыли при непрерывном удалении осажденного материала. В основном они предназначены для вертикального потока газа и сконструированы как осадительные электроды, содержащие мертвое воздушное пространство и снабженные горизонтальными выступающими прорезями, которые направляют пыль внутрь этого пространства (рис. III-105).

Полупроводники (такие как бетон, армированный проводящими стержнями) могут употребляться в качестве осадительных электродов для газов, у которых наблюдается тенденция к пробивному разряду при разности потенциалов более низкой, чем требующаяся для эффективного осаждения. Сопротивление электрода стремится подавить разряд и тем самым стабилизировать электрическое поле. В этом случае пыль может удаляться при выключенном газовом потоке с помощью очистительных цепей, протягиваемых по поверхности плиты. Фильтры с электродами этого типа иногда называют осадителями «ступенчатого сопротивления» из-за такого размещения армирующих стержней относительно разрядных электродов, которое обеспечивает максимальное электродное сопротивление в большом воздушном зазоре¹. Вообще такая конструкция электродов допускает большую производительность и большее накопление пыли по сравнению с другими конструкциями, так как в некоторых случаях пыль может накапливаться до тех пор, пока не отвалится под действием собственной тяжести. Однако эта конструкция не эффективна в случае хорошо проводящего газа или осаждаемого материала (очистка поверхности ведет к

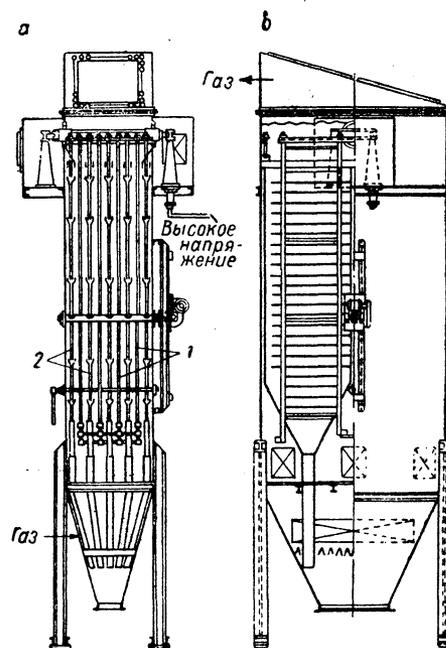


Рис. III-105. Вертикально-поточный фильтр с карманными пластинчатыми электродами:

а — поперечный разрез по осадительным электродам; б — продольный разрез по осадительным электродам.
1 — коронирующие электроды; 2 — осадительные электроды.

разрушению эффекта ступенчатого сопротивления). Кроме металлических осадительных электродов, применяются также и угольные. Если осаждаемый материал — жидкость, образующая проводящую пленку, то в качестве осадительных электродов употребляются такие материалы, как стекло, терракота, дерево.

¹ Beaver, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 42, 251 (1946).
² Cree, Am. Gas J., 162, 27 (March 1945).

¹ Schmidt, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 21, 11 (1928).

Выбор размера, формы и типа электрода базируется на экономических соображениях и обычно определяется характеристикой газа и твердого вещества, а также производственными возможностями. Зазор между осадительными электродами в осадителях пластинчатого типа и диаметр труб в фильтрах трубчатого типа обычно лежит в пределах от 150 до 375 мм. Чем меньше зазор, тем ниже требуемое напряжение и общие размеры оборудования, но тем больше трудности в регулировке процесса ввиду накопления осажденного материала. Большие зазоры обычно связаны с высокой концентрацией пыли. Для очень высоких концентраций пыли (например, в производствах, использующих псевдоожиженный катализатор) выгоднее применять большие зазоры в первой половине фильтра, чем во второй. Фильтры, особенно пластинчатого типа, очень часто изготавливаются с последовательными группами улавливающих электродов в общем корпусе. Ширина осадительных электродов 900—1800 мм, высота 3000—5400 мм в фильтрах пластинчатого типа и 1800—4500 мм в фильтрах трубчатого типа. Для достижения высокой эффективности улавливания необходимо, чтобы газ при прохождении через электроды был распределен равномерно. Это обеспечивается расширением газового ввода и направляющими лопатками, но чаще в тех же целях используются перфорированные пластины или решетки, помещенные на входе потока газа в электроды. Перфорированные пластины или решетки на стороне выхода устанавливаются редко.

Электрические фильтры рассчитываются на эффективность улавливания 90—99,9%. Потребление электрической энергии составляет 0,35—1,0 квт на 1000 м³/ч обрабатываемого газа, а перепад давления в установке обычно меньше 12 мм вод. ст. (но колеблется от 6 до 25 мм вод. ст.) и представляет главным образом потери в распределителе и на входе — выходе. Применяемый потенциал равен 30—100 кв. Скорости газа и время пребывания находятся, соответственно, в пределах от 0,9 до 3,0 м/сек и от 1 до 15 сек. Таким образом, чтобы избежать повторного увлечения пыли, скорости принимаются небольшими. Имеются, впрочем, фильтры для сажи, которые действуют как хлопьеобразователь пыли, так что сажа может быть уловлена затем в мультциклонах малого диаметра. Если диаметр осажденных частиц не лимитируется, то могут быть применены большие скорости при соответственно меньших капиталовложениях. В новой конструкции фильтра для летучей золы скорость газа достигает 12 м/сек (стр. 324).

Электрические фильтры питаются выпрямленным переменным током промышленной частоты. Напряжение повышается до требуемой величины посредством трансформатора, затем ток выпрямляется. Наиболее общий тип выпрямителя — это вращающийся механический выпрямитель с синхронизированным двигателем. Однако он требует тщательного ухода. Более новыми являются выпрямители с вакуум-электронной лампой и стационарные выпрямители с применением селена или кремния. Электрическое оборудование обычно устанавливается в отдельном помещении, в некоторых же случаях оно может быть заключено в отдельную ячейку внутри общего корпуса осадительной установки (рис. III-106).

Электродные изоляторы рассчитываются для заданных условий. Свойства пыли или тумана и газа определяют конструкцию изоляторов. Проводящие туманы требуют таких устройств, как масляные затворы, воздушное обдувание и т. д. При насыщенном газе часто применяются паровые змеевики (для предупреждения конденсации паров на изоляторах).

Электрофильтры применяются при обессмоливании производственного газа, удалении кислотного тумана и загрязнений на заводах контактной серной кислоты, улавливания тумана фосфорной кислоты, удалении пыли из газов от обжиговых печей, спекательных машин, цементных и известковых печей, доменных, сажевых печей, регенераторов в установках с псевдоожиженным катализатором, химических восстановительных

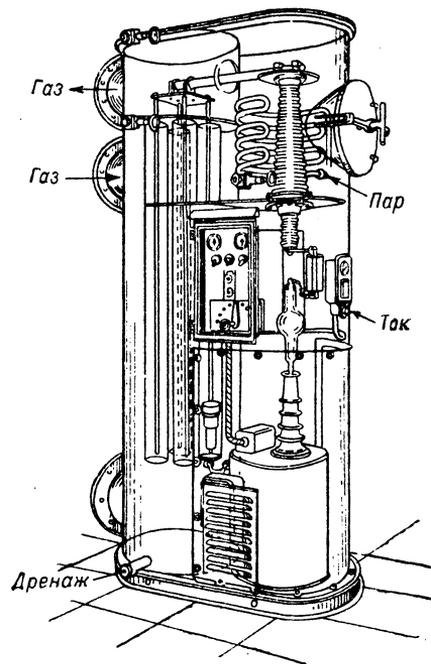


Рис. III-106. Трубчатый фильтр с встроенным внутри кенотронным силовым агрегатом.

печей для соды, аппаратуры для производства гипса¹. На рис. III-107 показан стальной пластинчатый фильтр с вертикальным током газа, аналогичный применяемому для улавливания катализаторной пыли на некоторых установках с псевдоожиженным катализатором.

Электрические фильтры являются, вероятно, наиболее удовлетворительными из всех пылеуловителей. Они могут быть применены в случае влажных или мокрых газов, при высоких температурах (до 650°С) и давлениях (до 10 ат). Главные их недостатки — большая цена и, во многих случаях, высокая стоимость обслуживания. Кроме того, при использовании этих фильтров должна обеспечиваться безопасность работы со взрывоопасными пылями.

Двухступенчатые фильтры. В двухступенчатых фильтрах коронный разряд создается в первой ступени между двумя электродами, образующими неоднородное поле (рис. III-108). Это достигается при помощи разрядного электрода из тонкой проволоки и приемного электрода большого диаметра. В первой ступени разность потенциалов должна быть выше, чем требуемая для коронного разряда. Во второй ступени (приблизи-

¹ Beaver, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 42, 251 (1946).

тельно однородное электростатическое поле) заряженные частицы движутся к осадительной поверхности. Эта ступень обычно состоит из параллельных пластин или из концентрических цилиндров с относительно малым зазором, сравнимым с их диаметром. Напряжение,

верхности следует предусмотреть какие-либо специальные меры.

На рис. III-104 показан один из ранних типов двухступенчатых электрофильтров, применяемых для очистки производственных газов.

Новой разработкой является двухступенчатый фильтр для летучей золы¹, который работает при скорости газа 12 м/сек. Установка промышленного масштаба (3400 м³/мин газа при 260—400° С и 1 ат) была спроектирована в Англии² (рис. III-109).

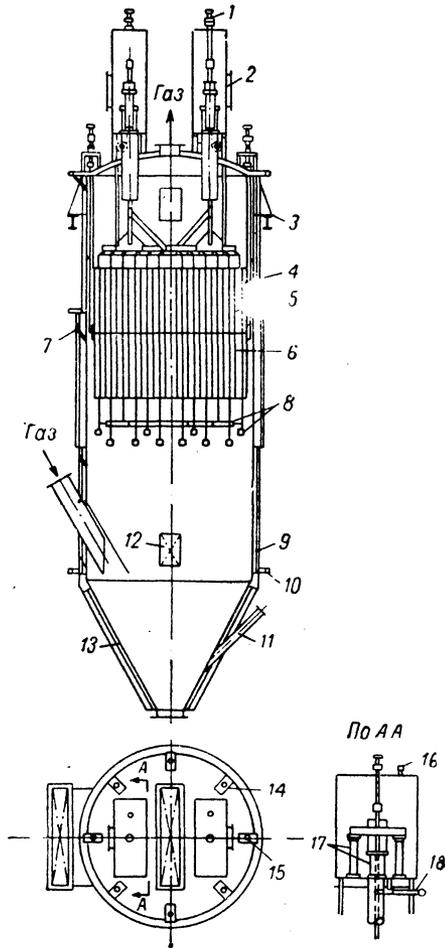


Рис. III-107. Специальный фильтр для удаления пыли из фосфорного газа, производимого в электрических печах:

1 — вибратор проводов; 2 — люк; 3 — опора подвеса электродов; 4 — коронирующий электрод; 5 — верхний осадительный электрод; 6 — нижний осадительный электрод; 7 — патрон для термопары; 8 — грузы коронирующих проводов и груз направляющей системы; 9 — изоляция; 10 — коробка проводов нагревателя; 11 — отверстие для прочистки бункера; 12 — лаз; 13 — нагревательный элемент; 14 — верхний вибратор осадительных пластин (4); 15 — нижний вибратор осадительных пластин (4); 16 — вентиль обдувки; 17 — кварцевые изоляторы; 18 — линия газа для обдувки.

создаваемое во второй ступени, должно быть таким, чтобы не происходил разряд. Так как осаждение осуществляется при отсутствии коронного разряда, здесь не произойдет новой зарядки разряженных и снова увлеченных частиц. Следовательно, чтобы предотвратить повторное увлечение частиц с осаждающей по-

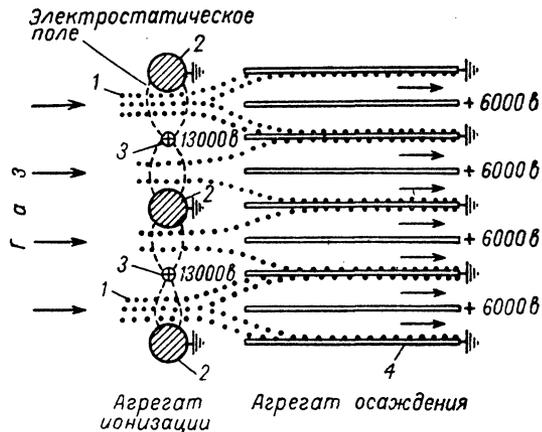


Рис. III-108. Принцип двухступенчатого электростатического осаждения:

1 — частицы пыли; 2 — заземленные приемные электроды; 3 — коронирующие электроды; 4 — осадительные пластины, попеременно заземленные и заряженные.

Найдено, что тонкая летучая зола может быть осаждена при скоростях газа до 15 м/сек в устройстве из двухступенчатых ионизирующих и осадительных труб, но только тогда, когда повторное увлечение и обратная эмиссия могут быть исключены за счет уменьшения толщины слоя осажденной пыли до минимума (<0,75 мм). Это обеспечивается периодической очисткой секции осадительных элементов посредством высокоскоростного (25—35 м/сек) продувочного газового потока в то время как другие секции фильтра находятся в работе. Продувочный газ выносит пыль во вторичный уловитель — циклон. Совместная эффективность фильтра и вторичного уловителя составляет ~95% для летучей золы со следующим распределением частиц по размерам:

D_p , мкм	0—10	10—20	20—30	30—40	40
Содержание, масс. %	45	27	11	7	10

Расчет по формуле (III-45) с использованием скорости осаждения для частиц диаметром 1 мкм приводит к расчетной эффективности 97,7%, которая соответствует рабочей эффективности двухступенчатого фильтра, равной 96%.

Применение в широком масштабе двухступенчатых фильтров связано с работами в области кондиционирования воздуха. Один из таких фильтров, предназначенный для очистки атмосферного воздуха, показан на

¹ Tigges, Karlsson, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 78, 305 (1956).

² Klempereger, Sayers, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. 78, 317 (1956).

рис. III-110. Ионизирующая и осадительная ступени фильтра выполнены в виде отдельных секций стандартных размеров, а составные агрегаты каждой ступени комплектуются параллельно. Ионизирующая ступень составлена из вертикальных заземленных труб (круглых или прямоугольных) диаметром 32 мм, размещен-

заряжена положительно. Положительный потенциал постоянного тока 6000 в поддерживается между прилегающими осадительными пластинами. Необходимое напряжение для ионизатора и осадительных пластин подается от компактной выпрямительной установки с полупериодной электронной лампой, работающей непо-

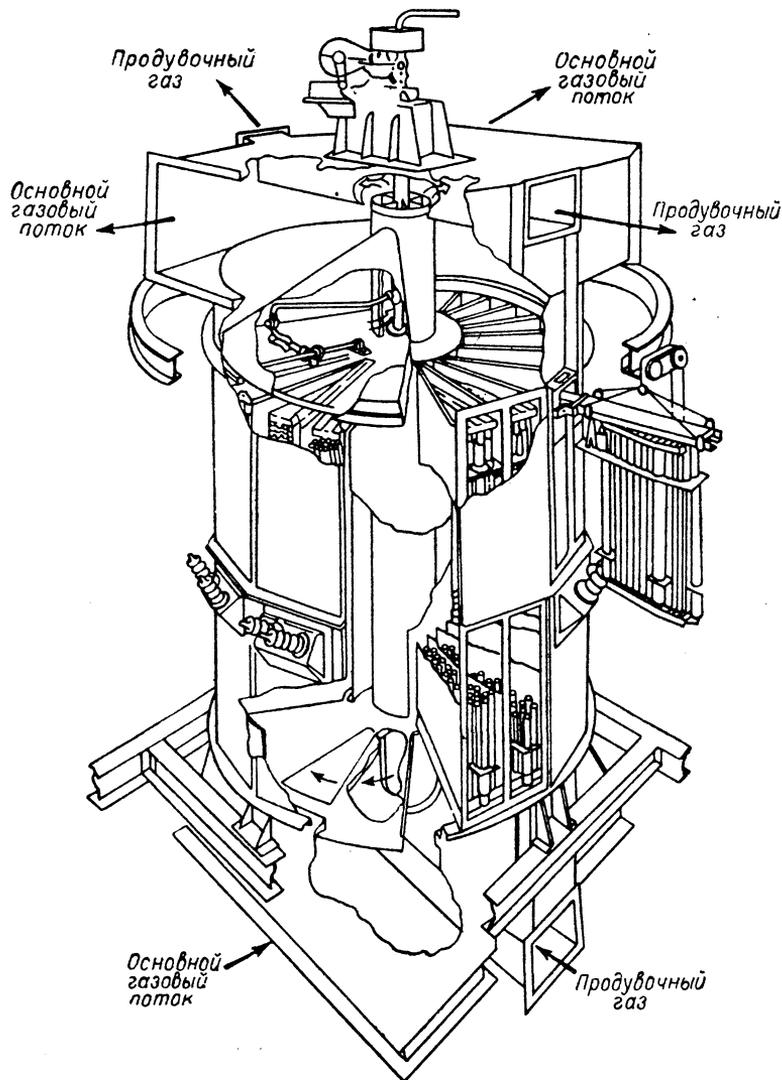
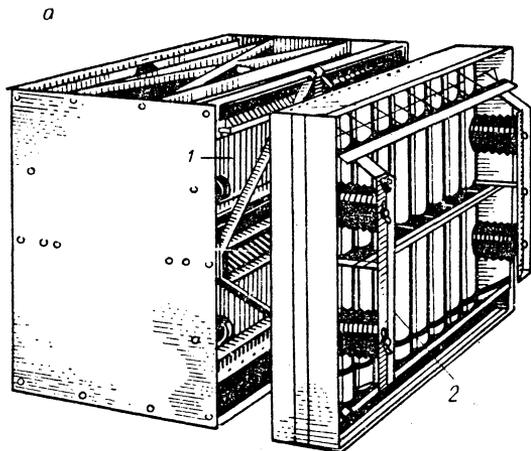


Рис. III-109. Фильтр для летучей золы.

ных с промежутками ~ 90 мм. Между этими трубами параллельно натянуты разрядные или ионизирующие электроды из вольфрамовой проволоки диаметром $\sim 0,2$ мм. Улавливающая ступень, помещенная далее за ионизирующей ступенью, состоит из пластин, поставленных параллельно газовому потоку (см. рис. III-108). Пластины попеременно заземлены и расставлены с промежутками ~ 8 мм. Изготавливаются пластины из оцинкованной стали или из алюминия. Между ионизирующей проволокой и трубками приложен потенциал постоянного тока 13 000 в, причем проволока

средственно от питающей линии 110 в переменного тока. Чтобы избежать повторного увлечения уловленной пыли, пластины смазаны вязким маслом. Когда толщина слоя пыли превысит 1,5 мм, секция пластин должна быть изъята, промыта и снова смазана. Имеются также автоматические средства для очистки и смазки на месте. В зависимости от концентрации пыли очистка производится один раз в период от 2 недель до 3 месяцев. Установки обычно снабжаются смотровыми люками; когда люки открывают, напряжение автоматически отключается. Если условия для подвода воздуха

плохие, может быть применен распределитель воздуха в виде перфорированной плиты. Установки рассчитаны на эффективность улавливания 85—90% и скорость газового потока 1,5—2,8 м/сек. Потребление электроэнергии составляет ~0,035 квт на 1000 м³/ч, перепад давления 2,5—5,0 мм вод. ст.



b

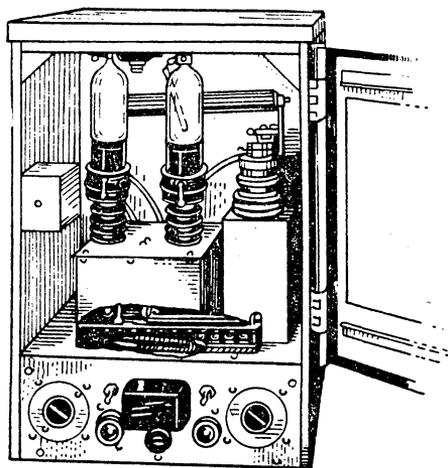


Рис. III-110. Двухступенчатый электрический фильтр, применяемый для очистки атмосферного воздуха:

а — ячейка установки „Преципитрон“; б — силовая камера.
1 — осадительные пластины; 2 — ионизирующие электроды.

Существуют установки, в которых электростатический осадитель скombинирован с сухим воздушным фильтром такого типа, как показанный на рис. III-113, б. В другой установке электростатическое поле используется в автоматическом фильтре, подобном представленному на рис. III-114, б. В этом случае ионизирующие провода помещены на входной стороне установки, а улавливающие электроды состоят из чередующихся неподвижных и вращающихся пластин (очистка автоматическая и непрерывная). Стоимость этих установок примерно в 3—5 раз выше стоимости установок без электрического питания. Применяют такие установ-

ки для очистки воздуха и непроводящих туманов. По сравнению с осадителями Коттреля они имеют меньшие размеры и потребляют меньше энергии.

Электрофильтры на переменном токе. Переменный ток высокого напряжения может быть применен для электрического осаждения. Коронный разряд питается непосредственно из сети, если последовательно с осадителем не включены искровые промежутки. Производительность оборудования при заданной эффективности в этом случае значительно ниже, чем для постоянного тока; кроме того, возникают трудности из-за индукции высокочастотных токов. Однако простота конструкции фильтров, работающих на переменном токе, позволяет вполне удовлетворительно применять их для лабораторных целей¹.

Воздушные фильтры

Описанное выше оборудование предназначено в первую очередь для применения в пылевых процессах. Воздушные фильтры употребляются для удаления атмосферной пыли. Разница заключается не столько в качестве пыли, сколько в ее количестве. Производственные концентрации пыли могут достигать нескольких сот граммов на 1 м³, хотя обычно не превосходят 1,5 г/м³. Концентрация атмосферной пыли вообще <12 мг/м³. Ниже приведены средние концентрации атмосферной пыли (в мг/м³), которые можно ожидать в различных районах и на производственных объектах²:

Сельские и пригородные районы	0,05—0,5
Столичные районы	0,10—1,0
Промышленные области	0,25—5,0
Обычные фабрики или рабочие помещения	0,5—10,0
Особо запыленные фабрики или рудники	10,0—900

При удалении атмосферной пыли обычно не делают попыток ее использовать. Поэтому для очистки воздуха применяются воздухопромыватели, но их устанавливают в первую очередь для увлажнения или охлаждения воздуха, а удаление пыли является второстепенной задачей.

Воздушные фильтры могут быть разделены на три группы: висциновые, сухие и автоматические.

Висциновые фильтры. Названы они так потому, что фильтровальная среда покрыта пленкой вязкого вещества для удержания пыли. Фильтры поставляются в виде элементов определенного размера (примерно 510×510 мм) для облегчения обслуживания и очистки. Каждый элемент состоит из ячейки, фильтровальной набивки и собственно рамы. Последнюю можно скреплять с рамой других подобных элементов для образования плотной фильтровальной перегородки (рис. III-111). Иногда применяются фетровые прокладки для уплотнения мест стыковки ячеек между собой. В некоторых конструкциях ячейки не имеют отдельных рам и собираются непосредственно в общий каркас.

Элементы промышленного висцинового фильтра показаны на рис. III-112. Набивка фильтра может состоять из одного или из ряда различных материалов, включая стеклянное волокно, шерсть, деревянную стружку, гофрированный фибровый патрон, рубленую

¹ Drinker, Thomson, Fitchet, J. Ind. Hyg., 5, 162 (Sept. 1923).

² Heating, Ventilating, Air Conditioning Guide, Am. Soc. Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engrs, New York, 1960, p. 77.

проволоку, просеянные частицы металла. Все это покрывается улавливающей пыль пленкой жидкости, такой как минеральное масло или другие жидкости высокой вязкости и температуры вспышки.

По способу обслуживания висциновые фильтры подразделяются на две группы. В большинстве установок с применением металлической фильтровальной среды

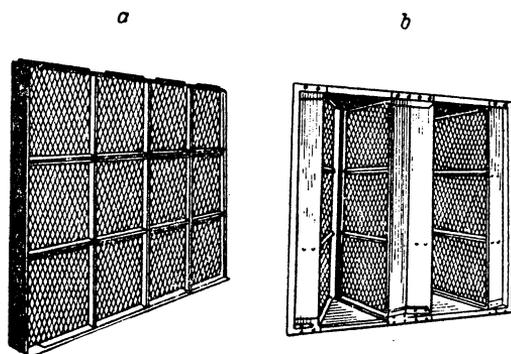


Рис. III-111. Фильтровальные перегородки:

a — плоская или L-образная; b — V-образная.

отдельные ячейки вынимаются и промываются или пропариваются, снова смазываются и устанавливаются для работы. В установках другого типа ячейка или набивка ячейки выбрасываются, как только набрался максимально допустимый слой пыли, и заменяются новыми.

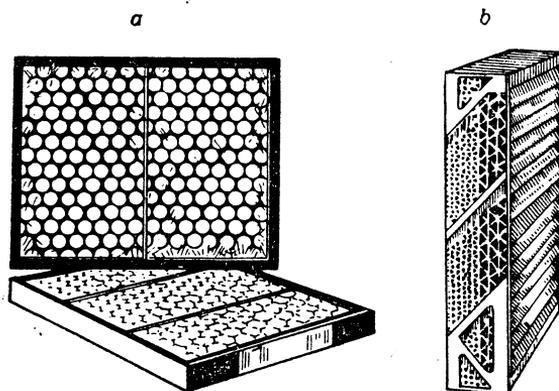


Рис. III-112. Типовые элементы висциновых фильтров:

a — сменный („Дустоп“); b — очищаемый.

Сухие фильтры. Эти фильтры состоят из элементов, похожих по размерам на элементы висциновых фильтров, но толщина их обычно больше. Используемые в сухих фильтрах фильтровальные среды имеют, как правило, меньший проход для воздушного потока, чем висциновые фильтры. Чтобы перепад давления не был значительным, применяются более низкие скорости воздуха. Последнее вызывает необходимость в большой поверхности фильтрования. Фильтровальный элемент обычно изготавливается в форме карманов, чтобы создать необходимую фронтальную поверхность при тех же габаритах.

Сухие фильтры показаны на рис. III-113. Фильтровальными средами являются, главным образом, листы бумажной массы, ткань, фетр или стеклянная пряжа. Фильтры с использованием фетра или подобных материалов восстанавливаются при помощи вакуума или сухой очистки. Когда воздух содержит много сажи, обычно требуется сухая очистка. У фильтров с применением дешевого целлюлозного материала более экономично производить замену фильтровального материала. В комплекте с фильтром часто поставляются механические загрузочные приспособления для замены фильтровальных перегородок в рамах. В некоторых случаях ячейка целиком выбрасывается после достижения максимальной пылевой загрузки.

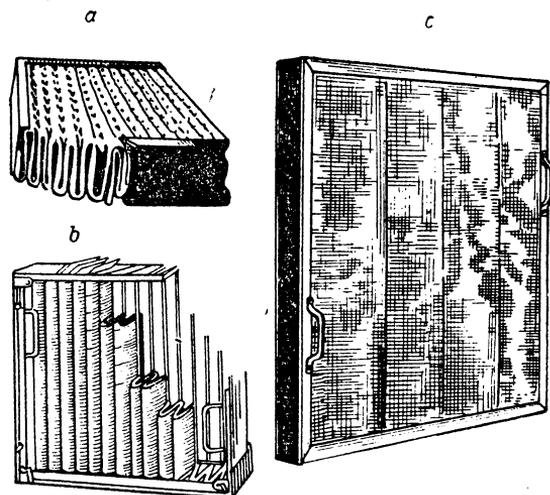


Рис. III-113. Сухие фильтры:

a — сменный („Айрплекс“); b — со сменной набивкой („Айрмат PL-24“); c — очищаемый („Амирглас“).

Автоматические фильтры. В этой группе воздушных фильтров очистка постоянная и автоматизированная. Большинство промышленных автоматических фильтров принадлежит к висциновому типу и состоит из перфорированных, гофрированных или плетеных перегородок, установленных последовательно. (рис. III-114, a и b). Отверстия размещены так, что воздух идет сначала через большие отверстия, а затем через малые. Сетчатые завесы движутся по замкнутому пути в вертикальном направлении, непрерывно или периодически. Масляная ванна служит для того, чтобы смыть пыль и покрыть сетки свежей пленкой масла. Пыль затем осажается в виде шлама на дне бункера.

Пылеуловитель «Айрмат» (рис. III-114, c) является сухим автоматическим фильтром. Впрочем, он может рассматриваться как автоматический в том случае, когда используются на липкой и легко отряхиваемой пыли. Он служит скорее пылеуловителем, чем воздушным фильтром, поскольку может выдерживать сравнительно высокие нагрузки по пыли. Воздушный поток прекращается или отводится во время очистки фильтра.

Проектирование и эксплуатация воздушных фильтров. Заметные достижения в области фильтрования воздуха были достигнуты в течение 1942—1960 гг. В настоящее время появилась возможность оценивать по теоретическим и эмпирическим соотношениям приблизительноную

эффективность улавливания, перепад давления и срок службы фильтра¹.

Чен² дает всесторонний обзор теории и опыта по фильтрованию воздуха. Эффективность изолированного волокна, по его мнению, зависит от инерционного отделения, пересечения поточных линий, диффузионного отложения и критерия Рейнольдса. При этом он делает

фузии и пересечения. Для расчета эффективности улавливания пыли одиночным волокном в слое нитей Чен выводит следующее эмпирическое соотношение:

$$\eta_{\text{сл}} = \eta_0 [1 + k(1 - \varepsilon)] \quad (\text{III-47})$$

где $\eta_{\text{сл}}$ — эффективность улавливания пыли отдельным волокном в слое; η_0 — эффективность улавливания пыли единичным (изолированным) волокном; k — константа пропорциональности; ε — порозность слоя.

Это означает, что близость других волокон увеличивает эффективность улавливания пыли изолированными волокном. Значение k составляет примерно 4,5 при $\varepsilon = 0,9 \div 0,99$. Экстраполяция для значений ε ниже 0,9 ведет к существенным ошибкам.

Подсчет общей эффективности улавливания пыли η фильтром с тканью из переплетенных волокон производится по следующему уравнению:

$$\ln \left(\frac{1}{1 - \eta} \right) = \frac{4}{\pi} \eta_{\text{сл}} \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right) \left(\frac{D_{\text{в.л}}}{D_{\text{в.п}}^2} \right) \quad (\text{III-48})$$

где $D_{\text{в}}$ — средний диаметр волокна, м; $D_{\text{в.п}}$ — средний диаметр волокна с учетом его поверхности, м; l — толщина фильтровальной волокнистой ткани, м.

Теоретическое значение η сравнивалось затем с измеренной эффективностью. Установлено, что первая величина завышена в широком интервале значений инерционного параметра и занижена в широком интервале диффузионного параметра.

В обширном исследовании волокнистых фильтров для кондиционирования воздуха (в авиации) было найдено¹, что основными параметрами являются инерция, диффузия и пересечение. Изучались три аэрозоля. Два из них были составлены из сравнительно однородных сферических частиц (диаметр соответственно 0,3 и 1,4 мкм) переохлажденной жидкости. Третьим был гетерогенный твердый аэрозоль с усредненным диаметром частиц 1,2 мкм. Применялись стеклянные и вольфрамовые волокна диаметром от 3 до 30 мкм. Скорость фильтрования находилась в пределах 0,09—30 м/сек. Для чистой незагруженной набивки экспериментальные данные сравнивались с теоретическими. Данные по эффективности извлечения для жидких аэрозолей хорошо совпадали с расчетными даже при высокой скорости (21 м/сек), когда была достигнута эффективность 98% при незагруженной набивке. Данные по твердому аэрозолю сравнимы с данными по жидким аэрозолям при скоростях < 0,3 м/сек. В случае более высоких скоростей эффективность была значительно ниже ожидаемой (для незагруженной набивки и скорости > 3 м/сек преобладала эффективность 20%). Это, очевидно, было следствием разрыва слоя твердых частиц, прилипших к фильтру. Когда набивка оказывалась загруженной частицами, эффективность извлечения и перепад давления возрастали. Расчет показывает, что фильтр, имеющий в незагруженном состоянии эффективность 57% и установленный для работы на жидком аэрозоле, будет иметь среднюю эффективность 98% из-за фильтрующего действия уловленного аэрозоля.

Характеристики различных типов воздушных фильтров приведены в табл. III-34. Перепад давления в фильтре увеличивается по мере накопления пыли. Фильтр должен быть заменен, если перепад давления начинает расти слишком быстро или производительность по воздуху резко падает. Максимально допустимый

¹ Wright, Stasny, Lapple, WADC Tech, Rept 55-457, ASTIA, AD-142075, Oct. 1957.

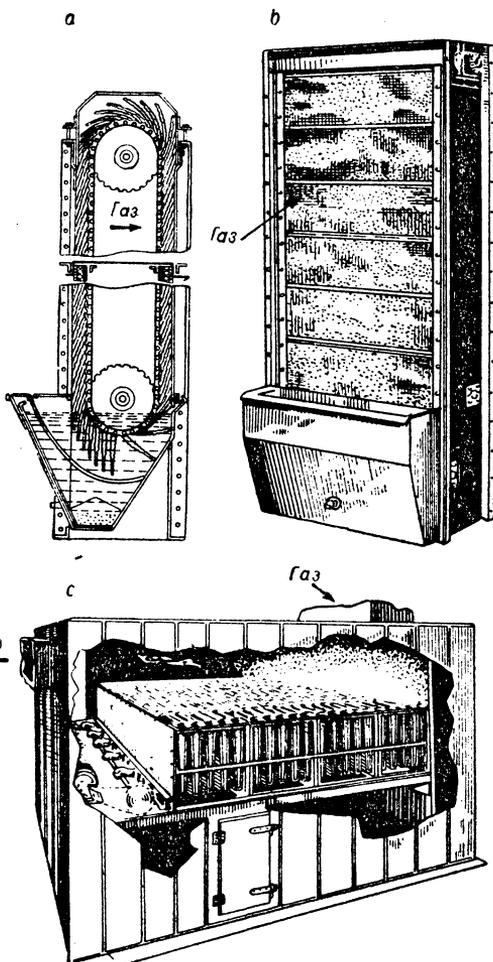


Рис. III-114. Автоматические воздушные фильтры:

а — многопанельный фильтр; б — фильтр „Стай-Нью“ (модель А); в — сухой тип (пылеуловитель „Айрмат“).

допущение, что эффективность изолированного волокна равна сумме эффективностей, обусловленных комбинированным действием инерции и пересечения или диф-

¹ Blasewitz, Judson, Chem. Eng. Progr., 51, G-J. (1955). — Davies, Proc. Phys. Soc. (London), B63, 268 (1950); Proc. Inst. Mech. Engrs (London), B1, 185 (1952). — Langmuir, OSRD Rept. 865, 1942. — Ramskill, Anderson, J. Colloid Sci., 6, 416 (1951). — Ranz, Tech. Rept 3, Contract AT-(30-3)-28 University of Illinois, 1951. — Chen, Ann. Rept. Contract DA 18-108-CML-4789, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Jan. 30, 1954. Chem. Revs., 55, 595 (1955). — Wright, Stasny, Lapple, WADC Tech. Rept 55-457, ASTIA, AD-142075, Oct. 1957.

² Chen, Chem. Revs., 55, 595 (1955).

рис. III-110. Ионизирующая и осадительная ступени фильтра выполнены в виде отдельных секций стандартных размеров, а составные агрегаты каждой ступени комплектуются параллельно. Ионизирующая ступень составлена из вертикальных заземленных труб (круглых или прямоугольных) диаметром 32 мм, размещен-

заряжена положительно. Положительный потенциал постоянного тока 6000 в поддерживается между прилегающими осадительными пластинами. Необходимое напряжение для ионизатора и осадительных пластин подается от компактной выпрямительной установки с полупериодной электронной лампой, работающей непо-

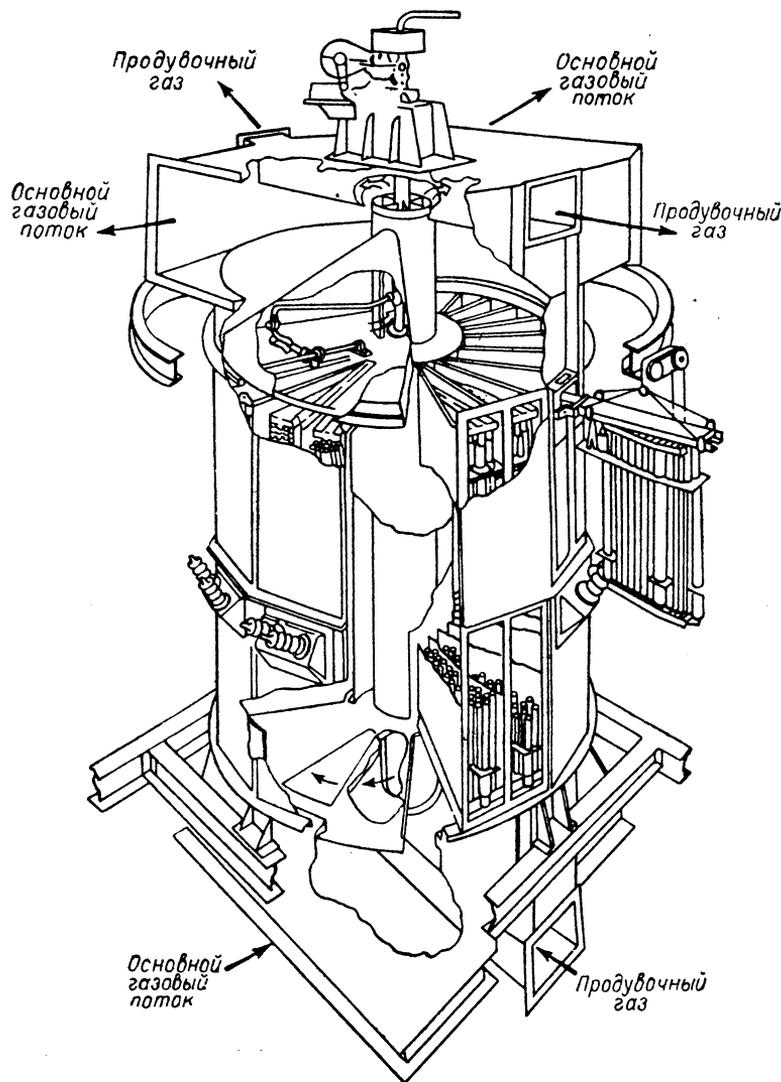


Рис. III-109. Фильтр для летучей золы.

ных с промежутками ~ 90 мм. Между этими трубами параллельно натянуты разрядные или ионизирующие электроды из вольфрамовой проволоки диаметром $\sim 0,2$ мм. Улавливающая ступень, помещенная далее за ионизирующей ступенью, состоит из пластин, поставленных параллельно газовому потоку (см. рис. III-108). Пластины попеременно заземлены и расставлены с промежутками ~ 8 мм. Изготавливаются пластины из оцинкованной стали или из алюминия. Между ионизирующей проволокой и трубками приложен потенциал постоянного тока 13 000 в, причем проволока

средственно от питающей линии 110 в переменного тока. Чтобы избежать повторного увлечения уловленной пыли, пластины смазаны вязким маслом. Когда толщина слоя пыли превысит 1,5 мм, секция пластин должна быть изъята, промыта и снова смазана. Имеются также автоматические средства для очистки и смазки на месте. В зависимости от концентрации пыли очистка производится один раз в период от 2 недель до 3 месяцев. Установки обычно снабжаются смотровыми люками; когда люки открывают, напряжение автоматически отключается. Если условия для подвода воздуха

Продолжение

	Ячейковые фильтры				Автоматические фильтры
	висциновые		сухие		
	с очищаемыми ячейками	со сменными ячейками	со сменными ячейками	с очищаемыми ячейками	
Рабочий цикл	—	1. Пригодны для кратковременной работы (меньше 10 ч в сутки) благодаря относительно низкой стоимости	—	—	Пригодны для длительной непрерывной работы
		2. Рабочий цикл 1—2 месяца для обычного кондиционирования воздуха производственных помещений		2. Рабочий цикл 2—4 недели для обычного кондиционирования воздуха производственных помещений	
Метод очистки	Промывка паром, горячей водой или растворителями и последующая подача свежей пленки масла	Фильтровальная ячейка заменяется. Длительность работы в отдельных случаях может быть увеличена встряхиванием или вакуум-очисткой, но часто это не дает результатов	Вакуум-очистка, продувка сжатым воздухом или механическая очистка		При возможном засорении автоматического фильтра — очистка продувкой сжатым воздухом
Потребность в площади	1. Легко размещаются в помещениях малых размеров 2. Форма фильтровальной камеры легко приспособляется к любой конфигурации помещения 3. Должна быть предусмотрена площадка для рабочего при съеме ячеек фильтра для очистки или замены 4. Необходимо помещение для промывки, замены смазки и дренажа	—	4. В некоторых случаях необходимо место для загрузочного механизма		1. Требуют большой высоты помещения 2. Занимают меньшую площадь пола, чем другие фильтры
Фильтровальный материал	Гофрированный, дробленый или плетеный металл, стеклянное волокно, деревянная стружка, войлок, покрытые маслом	1. Целлюлозная масса, фетр, тканая сетка, стеклянная пряжа 2. Сухая среда не может подвергаться прямому смачиванию. Среды, пропитанные маслом, пригодны, чтобы противостоять влаге и предупредить унос волокон			Металлические сетки, насадка или отражатели
Характер пыли	1. Мало пригодны для волокнистой пыли 2. Пригодны для очистки воздуха производственных помещений и зернистых материалов	—	1. Мало пригодны для пыли, содержащей масла 2. Хорошо подходят для волокнистых материалов 3. Более пригодны для тонкой пыли, чем другие типы		Не пригодны для липкой волокнистой пыли

Сравнительная характеристика воздушных фильтров

	Ячейковые фильтры				Автоматические фильтры
	висциновые		сухие		
	с очищаемыми ячейками	со сменными ячейками	со сменными ячейками	с очищаемыми ячейками	
Производительность по пыли	Пригодны для больших нагрузок (вплоть до $4,5 \text{ мг/м}^3$), связанных с высокой производительностью по пыли		Пригодны для небольших и умеренных нагрузок по пыли (меньше $2,5 \text{ мг/м}^3$)		Пригодны для самых больших нагрузок по пыли (свыше $4,5 \text{ мг/м}^3$)
Размеры фильтровального элемента	1. Обычный размер ячейки фильтра $510 \times 510 \text{ мм}$. Номинальная производительность $22,5 \text{ м}^3$ воздуха в минуту 2. Фронтальная скорость $90\text{--}120 \text{ м/мин}$				1. Автоматические висциновые фильтры обычно изготавливаются на производительность $28 \text{ м}^3/\text{мин}$ и выше 2. Фронтальная скорость $110\text{--}230 \text{ м/мин}$
Скорость воздуха	1. Номинальная скорость воздуха $90\text{--}120 \text{ м/мин}$ 2. При очень высоких скоростях воздуха может происходить унос масла		1. Номинальная скорость воздуха $3\text{--}15 \text{ м/сек}$ (в некоторых типах стеклянных фильтров до 90 м/мин) 2. Более высокие скорости воздуха ведут к прорыву фильтровальной среды		Номинальная скорость воздуха для висциновых фильтров $110\text{--}230 \text{ м/мин}$, для сухих фильтров $3\text{--}15 \text{ м/мин}$
Сопротивление фильтра	1. Сопротивление чистого фильтра $1,25\text{--}7,5 \text{ мм вод. ст.}$, загрязненного $10\text{--}12,5 \text{ мм вод. ст.}$ 2. Когда сопротивление превосходит данные значения, ячейки должны быть замечены или регенерированы 3. Крупные фильтры с определенным циклом работы ячеек сохраняют почти постоянное сопротивление 4. Повышение сопротивления при чрезмерных нагрузках по пыли ведет к проскокам и снижению эффективности улавливания				Сопротивление фильтра $7,5\text{--}10 \text{ мм вод. ст.}$
Эффективность улавливания	1. Эффективность различна и зависит для каждого данного фильтра от величины его сопротивления 2. Эффективность уменьшается с повышением нагрузки по пыли и увеличивается с возрастанием скорости воздуха до определенного предела		1. Эффективность вообще выше, чем у висциновых фильтров, особенно при тонкой пыли 2. Эффективность повышается с увеличением нагрузки по пыли и понижается с увеличением скорости воздуха		—

перепад давления лежит в пределах 5—12 мм вод. ст. в зависимости от типа фильтровальной среды. Применение автоматических фильтров более рационально, когда возрастает концентрация пыли в воздухе, поскольку производительность по пыли является важным фактором для таких фильтров. Рабочий цикл или срок службы фильтровального элемента τ (в сутках) может быть определен по уравнению:

$$\tau = \frac{m}{1440cV\eta} \quad (\text{III-49})$$

где m — производительность по пыли ячейки воздушного фильтра, g ; c — концентрация пыли во входящем или подводящем воздушном потоке, g/m^3 ; V — объемный расход воздуха через ячейку фильтра, $m^3/мин.$

Производительность фильтровального элемента по пыли обычно находится в пределах 225—1800 g (для стандартного элемента размером 510×510 мм). Срок службы фильтра висцинового типа при обработке воздуха «среднего» города составляет 2—5 месяцев, а фильтров сухого типа 1—3 месяца. Для «среднего» химического предприятия срок службы фильтра равен $1/3$ — $1/2$ вышеприведенных величин, а иногда может быть еще меньше в результате более высокой загрузки по пыли. Общее время восстановления промываемого висцинового фильтра ~24 ч. Если времени для дренирования было недостаточно, то фильтруемый воздух может увлекать масло.

Улавливание пыли в висциновых фильтрах происходит при столкновении частиц с поверхностями фильтра, где вязкая пленка служит для предотвращения уноса осажженной пыли. Эффективность извлечения увеличивается, если скорость газа возрастает. Однако эта скорость не должна быть столь высокой, чтобы пыль повторно увлеклась с вязкой пленкой. Таким образом, эффективность улавливания будет уменьшаться с увеличением количества накопленной пыли вследствие насыщения вязкой пленки пылью.

Обычно воздушные фильтры имеют низкую эффективность при улавливании частиц диаметром <1 мкм. Для частиц размером >10 мкм эффективность улавливания для большинства фильтров превышает 85%.

Фильтры могут быть выполнены из нержавеющей стали, оцинкованного железа, стали, покрытой кадмием, латуни или алюминия. В литературе можно найти достаточно полные количественные и сравнительные эксплуатационные данные¹, а также информацию по эксплуатационным расходам². Примерная стоимость промышленных стальных фильтров приведена в табл. III-3.

Оборудование различных воздушных фильтров. На рис. III-115 показана установка для удаления пыли и увлажнения воздуха, в которой вода разбрызгивается по ячейке фильтра из стекловолокна. За увлажняющими ячейками следуют уловители уноса, которые представляют собой маты из стекловолокна толщиной 25 мм или зигзагообразные металлические пластины. Вода подается в количестве 40 л/мин на 100 м³/мин обрабатываемого воздуха при избыточном давлении ~0,4 ат. Скорость воздуха в ячейке ~90 л/мин.

Воздухоочистители, содержащие до 6 мокрых ячеек, подобных показанным на рис. III-115, и 3 установленных последовательно сухие набивки из стеклянной шерсти были разработаны для удаления мелких радиоактивных частиц со средним диаметром 0,6 мкм¹.

Разработано несколько установок, в которых очистка воздуха производится посредством либо самого электростатического поля, либо в соединении с фильтровальной средой (сухой или с висциновой пленкой). При

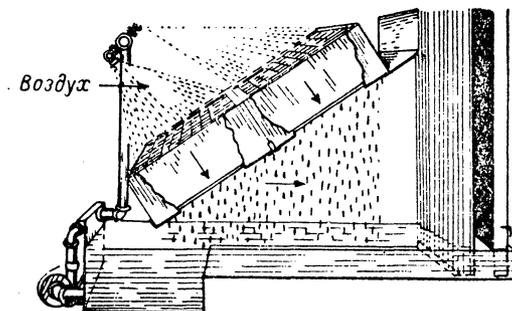


Рис. III-115. Фильтр из смоченных стеклянных нитей (капиллярный кондиционер).

извлечении частиц диаметром <5 мкм эти установки значительно более эффективны, чем сухие или висциновые воздушные фильтры.

Выпускаются фильтры специальной формы для установки на линии всасывания воздуха в двигателях и компрессорах, для удаления пыли, окалины и масла в сжатом воздухе или трубопроводах («трубопроводные» фильтры), а также бытовые установки электростатической очистки воздуха.

Другие типы пылеуловителей

Высокоинтенсивные акустические колебания могут вызвать столкновение частиц, а поэтому и тенденцию к укрупнению дымов и туманов, после чего частицы могут быть легко уловлены в обычной аппаратуре. Имеется оптимальная частота в пределах от 1000 до 10 000 циклов в секунду, ниже и выше которой не наблюдается эффективного укрупнения (зависящего от размера и плотности частиц, от вязкости и плотности среды.)

Проводились исследования в области ультразвука². До тех пор, пока не будет найден экономичный источник акустической энергии, этот принцип не получит широкого промышленного применения. Газо-сиреновый генератор конвертирует энергию сжатого газа в акустическую при эффективности от 50 до 70% в установках с акустической мощностью до 100 квт. Этот генератор, потребляющий сжатый газ с избыточным давлением 0,4 ат, применяется при атмосферном давлении; частота может изменяться плавно. Весь предел частот от 1000 до 200 000 циклов в секунду может быть пройден в несколько ступеней. Потребление мощности для агломерации аэрозолей составляет обычно от 1,2 до

¹ American Railroad Association, Mechanical Division, Report on Relative Performance of Air Filters, Chicago, Jan. 15, 1938.—Rowley, Jordan, Heating, Piping, Air Conditioning, 7, 293—299 (1935); 10, 539 (1938); 11, 388, 633 (1939); 12, 61, 699 (1940); 13, 99, 246, 304, 524 (1941); 14, 19, 438 (1942); 15, 487 (1943).

² Carrier, Chern, Grant, Roberts, Modern Air Conditioning, Heating and Ventilating, 3 ed., ch. XV, New York, 1959.

¹ Hammond, Leary, Los Alamos Scientific Laboratory, Rept LAMS-970, Oct. 1949.—First, Moschella, Silverman, Berly, Ind. Eng. Chem., 43, 1363 (1951).

² St. Clair et al., US Bur. Mines Rept Invest., 3400, May 1938; 4218, March 1948; Mining et Met., 18, 244 (1937); Ind. Eng. Chem., 41, 2434 (1949).

	Ячейковые фильтры				Автоматические фильтры
	висциновые		сухие		
	с очищаемыми ячейками	со сменными ячейками	со сменными ячейками	с очищаемым ячейками	
Температурные условия	Все металлические фильтры могут применяться до температуры 125° С при выборе соответствующего масла. Фильтры, использующие целлюлозные материалы, могут работать до 80° С		Ограничены температурой 80° С, исключая стеклянные ткани, которые могут применяться до 370° С при соответствующих рамах и прокладках		Висциновые фильтры могут применяться вплоть до 125° С, если используется соответствующее масло. Сухие типы ограничены температурой 80° С
Начальная стоимость	Стоимость выше, чем стоимость фильтров со сменными ячейками		Относительно низкая	Стоимость выше, чем стоимость фильтров со сменными ячейками	Наиболее высокая
Стоимость эксплуатации	<p>1. Расходы на электроэнергию приблизительно равны для всех типов</p> <p>2. Расходы на рабочую силу для очистки и установки ячеек сопоставимы со стоимостью замены ячеек в установках среднего размера (280—1400 м³/мин)</p>		<p>2. Стоимость замены ячеек сопоставима со стоимостью обслуживания фильтров с очищаемыми ячейками в установках среднего размера (280—1400 м³/мин)</p>	<p>2. То же, что для висциновых фильтров с очищаемыми ячейками</p>	<p>1. Расходы на электроэнергию выше по сравнению с другими типами</p> <p>2. Расходы на рабочую силу для осмотра, смены масла или фильтровального материала весьма незначительны</p> <p>3. Стоимость амортизации и обслуживания наибольшая</p>
Стоимость аппарата на 1000 м ³ /мин, долл. (цены 1960 г.)	350—1250	175—350	175—350 (для комплектно заменяемых единиц); 280—1050 (для установок с заменяемыми ячейками)	250—1400	1250—3500

Глава четвертая

СИСТЕМЫ ГАЗ—ГАЗ, ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО—ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО

Ш. Вейденбаум (Sh. S. Weidenbaum), В. Блочер (F. W. Bloecher),
Э. Кокрелл (E. E. Cockrell), В. Бронкала (W. J. Bronkala),
Ф. Девани (F. D. DeVaney), В. Диренфорт (W. P. Dyrenforth),
М. Же (M. C. Sze), Г. Вильсон (G. O. Wilson)

Системы газ—газ — перевод и редакция А. А. Медведева

Грохочение (перевод Н. И. ПЛЮШКИНОЙ), классификация, разделение в плотных средах,
отсадка, обработка материалов на концентрационных столах
(перевод А. Г. САМСОНОВА) — под редакцией А. А. МЕДВЕДЕВА

Магнитная и электростатическая сепарация, флотация —
перевод А. В. ПЛИССА под редакцией П. Г. РОМАНКОВА

3,0 квт на 1000 м³/ч обрабатываемого газа. Звуковое осаждение ограничивается случаями, когда концентрация частиц превышает 2,3 г/м³. Для случаев более низкой концентрации частиц звуковое осаждение эффективно только тогда, когда концентрацию увеличивают вводом добавочных частиц.

В настоящее время изготовлены или находятся в стадии разработки пилотные или промышленные установки для извлечения сажи, тумана серной кислоты, цементной пыли, летучей золы и т. п. Ведется исследовательская работа по осаждению тумана из атмосферы аэропортов. Необходимо отметить, что звуковое осаждение все еще находится в стадии развития. Некоторые установки были демонтированы после короткого периода работы, когда стало ясно, что интенсивная вибрация вредно отражается на здоровье людей¹. Хотя монтаж и эксплуатация системы циклонов со звуковой агломерацией на 20% дешевле электростатических фильтров той же производительности, необходимость тщательной звуковой изоляции значительно увеличивает их стоимость². Подробнее см. литературу³.

Соударения молекул создают тенденцию к отталкиванию дисперсных частиц от нагретого тела. В термическом осаждении этот принцип использован для очистки газа от взвешенных частиц при прохождении его сквозь или над нагретой решеткой при низкой скорости⁴. Хотя этот метод еще не нашел применения для извлечения промышленной пыли, но он уже успешно применяется для борьбы с атмосферной пылью.

¹ Walter, Staub, 36, 228 (1954).

² Pilpel, Brit. Chem. Eng., 5, 550 (1960).

³ Jones, J. Acoust. Soc. Am., 48, 371 (1946). — Porter, Chem. Eng., 55, 100, 101, 115 (March 1948). — Pilpel, Ind. Chem., 32, 327 (1956). — Crawford, Ultrasonic Engineering, London, 1955.

⁴ Blaetin, J. Soc. Chem. Ind., 58, 334 (1939). — Watson, Trans. Farad. Soc., 32, 1073 (1936).

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Anderson, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 16, 69 (1924). — Dalla Valle, Micromeritics, New York, 1953. — Drinker, Match, Industrial Dust, 2 ed., New York, 1954. — Gibbs, J. Soc. Chem. Ind., 41, 189T (1922). — Green, Lane, Particulate Clouds: Dusts, Smokes and Mists, New York, 1957. — Knowles, Trans. Am. Soc. Heating Ventilating Engrs, 24, 165 (1918). — Lapple, Heating, Piping, Air Conditioning, 16, 410, 464, 578, 635 (1944); 18, 108 (1946); Chem. Eng. Progr., 53, 385 (1957). — Larcombe, Mining Mag., 66, 143, 206, 256 (1942); Ind. Chemist, 18, 433, 477 (1942); 19, 25 (1943). — Miller, Chem. a. Met., 45, 132 (1938). — Pilpel, Brit. Chem. Eng., 5, 542 (1960). — Powers, Rock Prods, 45, 58 (Febr. 1942); 45, 46 (April 1942); 45, 48, 49, 51 (Sept. 1942); 46, 66 (March 1943); 46, 70, 72 (June 1943); 47, 74, 94 (May 1944); 47, 50 (July 1944); 48, 92, 94 (June 1945); 48, 84, 94 (July 1945). — Roberts, Power, 83, 345, 392 (1939). — Anon., Sheet Metal Worker, 31, 51 (1940). — Stairmand, J. Inst. Fuel, 29, 58 (1956); Heating Ventilating Air Conditioning Guide, Am. Soc. of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, New York, 1960.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ III

М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим слоем, Изд. «Химия», 1968. — М. Лева, Псевдооживление, Гостоптехиздат, 1961. — Н. И. Сыромятников, В. Ф. Волков, Процессы в кипящем слое, Металлургиздат, 1959. — Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша, Основы техники псевдооживления, Изд. «Химия», 1967. — И. С. Сегаль, Машины и оборудование для пневматического транспорта, Машгиз, 1960. — Методика расчета установок пневматического транспорта, Труды ВНИИПТМАШа, вып. 2 (24), 1962. — Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов, Пылеулавливание и очистка газов, Металлургиздат, 1958. — И. В. Пискарев, Фильтровальные ткани. Изготовление и применение, Изд. АН СССР, 1963. — Циклоны НИИОГАЗ, Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации, Госхимиздат, 1956. — Циклоны НИИОГАЗ, Каталог № 22-А института «Гипрогазоочистка», Госхимиздат, 1961. — Батарейные циклоны, Руководящие указания по проектированию, монтажу и эксплуатации, Госхимиздат, 1955. — В. Н. Утов, Очистка промышленных газов электрофильтрами, изд. «Химия», 1967.

СИСТЕМЫ ГАЗ — ГАЗ

КОНТАКТНАЯ АППАРАТУРА

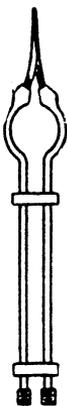
Струйные смесители

Струйные смесители (рис. IV-1) позволяют обеспечить взаимодействие отдельных струй газов при их столкновении друг с другом. Потoki в смеситель обычно подают под давлением. Такие аппараты используются иногда для смешения жидкостей, но наибольшее применение они нашли при смешении горючих газов непосредственно перед зажиганием.

Инжекторы

Смесители этого типа состоят из основной и вспомогательной труб, а также распылителя, сопла и патрубка (или диафрагмы), через которые в основной поток впрыскивается так называемый вторичный поток. Определяющей

Рис. IV-1. Струйный смеситель для газов:



скоростью может быть скорость потока как в основной, так и во вспомогательной трубе. Для быстрого и тщательного перемешивания двух газов необходимо, чтобы массовая скорость вспомогательного потока в инжекторе была в 2—3 раза выше массовой

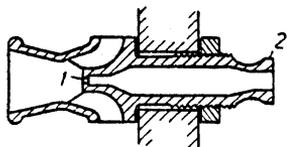


Рис. IV-2. Инжекторный смеситель:

1 — отверстие (канал); 2 — буртик для стандартного фланца.



Рис. IV-3. Струйный компрессор.

Струйный компрессор со встроенным в него контрольным клапаном (рис. IV-3) широко применяется для смешения пропана и воздуха. К преимуществам такого компрессора следует отнести сравнительную простоту конструкции и низкую стоимость, а также возможность проведения процессов смешения и сжатия в одном аппарате.

Смесители с отбойными перегородками

Смесители с отбойными перегородками (рис. IV-4) просты по конструкции и удобны при монтаже. Такие аппараты преобразуют энергию давления в энергию

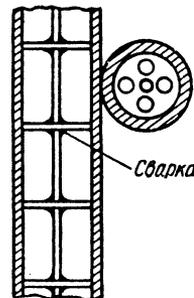


Рис. IV-4. Смеситель с отбойными перегородками.

турбулентного потока, что сопровождается сравнительно быстрым перемешиванием газов. Этим способом смешивают, например, аммиак с воздухом (подавая ~10% аммиака) при производстве азотной кислоты.

Вентиляторы и газодувки

Вентиляторы и газодувки перемешивают газы при непрерывной подаче их в требуемых соотношениях. Эти аппараты можно применять также для периодического смешения газов, устанавливая, например, вентилятор внутри камеры смешения. Из смесителей такого типа особо следует отметить пропеллерный вентилятор (рис. IV-5) и турбинную газодувку (рис. IV-6). Вентиляторы и газодувки позволяют работать при больших расходах газа и малых затратах энергии, однако они сложнее по конструкции, чем рассмотренные выше

скорости основного потока¹. Инжекторный смеситель показан на рис. IV-2.

¹ Chilton, Genereaux, Trans. Am. Inst. Chem. Engrs, 25, 102 (1930).

Системы газ — газ	
Контактная аппаратура	335
Струйные смесители	335
Инжекторы	335
Смесители с отбойными перегородками	335
Вентиляторы и газодушки	335
Смещение газов	336
Разделение газов	336
Низкотемпературная фракционная дистилляция	336
Разделение в абсорберах	336
Разделение в адсорберах, гиперсорберах и колоннах со взвешенным слоем	336
Газовая диффузия	336
Термическая диффузия	337
Электромагнитная сепарация	338
Разделение газов в центрифугах	339
Масс-диффузия	340
Хроматография	340
Разделение в конденсаторах	341
Разделение в химических реакторах	342
Литература	342
Системы твердое вещество — твердое вещество	
Грохочение	342
Сита	344
Виды грохотов	344
Производительность и эффективность	346
Особенности процессов грохочения	347
Контрольные сита	348
Лабораторные грохоты (встряхиватели)	348
Классификация	348
Немеханические классификаторы	349
Механические классификаторы	349
Гидравлические классификаторы	354
Литература	354
Разделение в плотных средах	355
Работа установки, использующей плотную среду	355
Типы разделительных аппаратов (сосудов)	356
Тонкая очистка в циклонных сепараторах с плотной средой	356
Литература	358
Отсадка	358
Типы отсадочных машин	358
Производительность отсадочных машин	359
Расход энергии и воды при отсадке	359
Стоимость отсадки	359
Литература	359
Обработка материалов на концентрационных столах	359
Мокрые столы	359
Сухие столы	361
Агломерационное концентрирование на столах	361
Литература	361
Магнитная сепарация	362
Магнитные сепараторы для удаления крупных железных примесей	362
Магнитные сепараторы для обогащения и очистки	363
Материалы для магнитных сепараторов	365
Литература	365
Электростатическая сепарация	366
Контактная электризация	366
Индукционная электризация	367
Электризация с помощью ионной бомбардировки	368
Промышленное применение электростатической сепарации	368
Литература	368
Флотация	369
Флотационные реагенты	369
Модификаторы	369
Промышленное применение флотации	370
Флотационные машины	370
Экономика	373
Литература	374

корню квадратному из молекулярных масс газов. Для разделения смеси некоторых газов используют диффузию через пористую перегородку. В этом случае пространство с низким давлением обогащается легким компонентом смеси. Для разделения изотопов обычно применяют каскадный метод с рециркуляцией. Теория процесса газовой диффузии и рекомендации по проектированию аппаратуры приведены в гл. VII и IX первого тома.

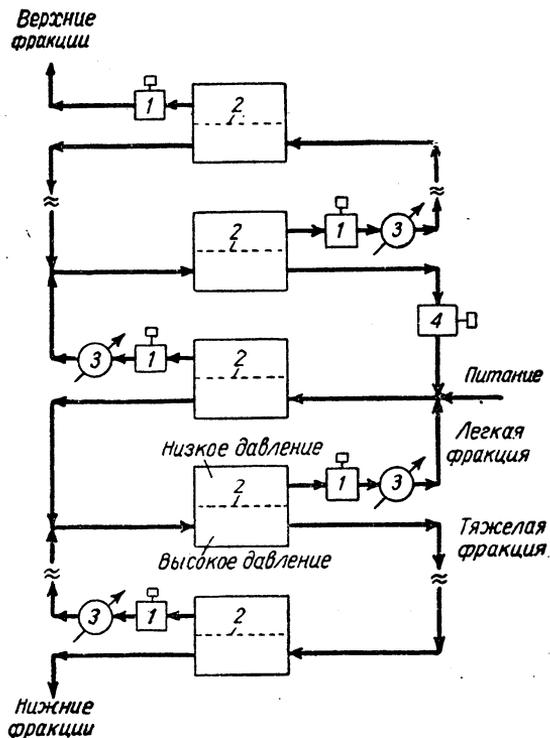


Рис. IV-8. Каскад газовой диффузии [Venedict, Pigford, Nuclear Chemical Engineering, New York, 1957]:

1 — компрессоры; 2 — диффузионные (пористые) перегородки; 3 — холодильники; 4 — вспомогательный компрессор.

На рис. IV-8 дана упрощенная схема каскада газовой диффузии. Исходная смесь (питание) поступает в диффузионную ступень и движется вдоль перегородки. Часть этой смеси, проходящая через диффузионную (пористую) перегородку в область низкого давления, представляет собой продукт диффузии первой ступени, обогащенный легким компонентом. Этот промежуточный продукт поступает на питание расположенной выше ступени каскада. Газ, не прошедший через перегородку, обогащается тяжелым компонентом и поступает в расположенную ниже ступень. На каждой ступени газ, прошедший через перегородку, сжимается компрессором в требуемых пределах давлений и выделяемое при этом тепло отводится с помощью холодильника. Для выравнивания давления в каскаде используется также вспомогательный компрессор.

В промышленности способ газовой диффузии применяется, например, при выделении $U^{235}F_6$ из природной смеси $U^{235}F_6$ и $U^{238}F_6$. К используемой в этом процессе

диффузионной перегородке предъявляется ряд особых требований¹. Чтобы основная часть потока газа могла пройти через перегородку путем истинной диффузии, поры перегородки должны быть очень малыми (диаметр пор — порядка средней длины свободного пробега молекул газа, т. е. $\sim 0,01$ мкм при атмосферном давлении). Перегородка должна быть достаточно прочной, чтобы выдержать значительную разность давлений по обе ее стороны, а также устойчивой к UF_6 , чтобы не закупориться в результате коррозии. Так как средняя длина свободного пробега молекул газа увеличивается с понижением давления, чистый $U^{235}F_6$ получают при работе под вакуумом, что обуславливает дополнительные повышенные требования к герметичности оборудования. Валы высокоскоростных газовых насосов обычно снабжаются специальным уплотнением. Вакуум-насос с возвратно-поступательным движением рабочего органа имеет, например, сильфонное уплотнение между штоком поршня и цилиндром. Требование герметичности относится также ко всем клапанам и трубопроводам установки.

Термическая диффузия

Если в гомогенной газовой смеси создать градиент температуры, то возникнет диффузионный поток (один из компонентов будет перемещаться в том же направлении, что и тепловой поток, другой — в противоположном). Этот эффект весьма незначителен, поэтому он не мог быть использован до тех пор, пока Клузиус и Диккель² не разработали конструкцию термодиффузионной колонки (рис. IV-9). Поступающую на разделение газовую смесь направляют в пространство между двумя вертикальными цилиндрами, один из которых (внутренний) нагревается, а другой (наружный) охлаждается. Легкий компонент газовой смеси концентрируется в нагреваемой зоне, примыкающей к внутреннему горячему цилиндру; устанавливается конвекция (направление которой на рисунке показано стрелками). Наличие противотока повышает разность концентраций, обеспечиваемую простой термической диффузией и дает возможность использовать этот способ в практике для разделения газов. Более подробно теория термической диффузии изложена в гл. IX первого тома.

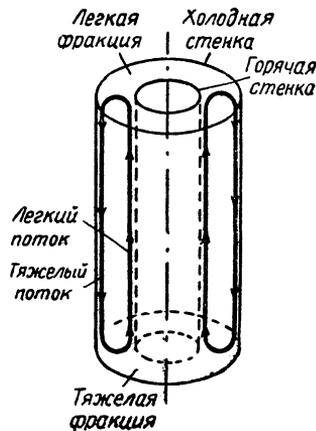


Рис. IV-9. Термодиффузионная колонка (Venedict, Pigford, Nuclear Chemical Engineering, New York, 1957).

Термическую диффузию применяют главным образом при разделении смеси изотопов (хлора, водорода, углерода, кислорода и благородных газов) на небольших установках, так как в этом случае термодиффузионные

¹ Hogerton, Chem. Eng., 52, 98 (1945). — Keith, Chem. Eng., 53, 112 (1946).

² Clausius, Dicker, Z. phys. Chem., B44, 397, 451 (1939).

газовые смесители, и нуждаются в механическом приводе. Широкое промышленное применение такие аппараты нашли, например, при рециркуляции горячих газов в сушилках и дымовых газов в печах. В генераторах инертного газа, где газ и воздух смешиваются с помощью газодувки, соотношение их автоматически

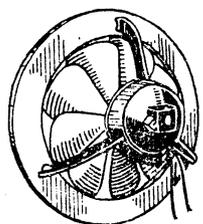


Рис. IV-5. Пропеллерный вентилятор.

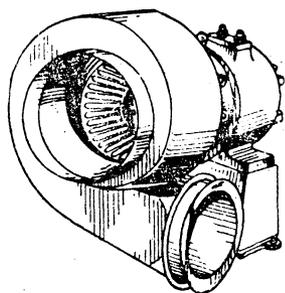


Рис. IV-6. Турбинная газодувка.

в газодувке, соотношение их автоматически

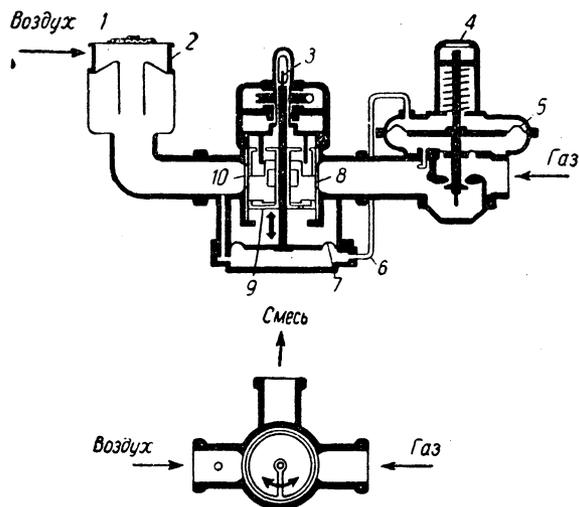


Рис. IV-7. Клапан смешения:

1 — воздушный фильтр и глушитель; 2 — элемент фильтра; 3 — указатель объема; 4 — регулятор расхода газа; 5 — диафрагма основного газового регулятора; 6 — линия управления давлением; 7 — диафрагма клапана смешения; 8 — отверстие, обеспечивающее постоянный проход газа; 9 — подвижный поршень (клапан), автоматически устанавливающий необходимый объем; 10 — отверстие, обеспечивающее постоянный проход воздуха.

контролируется клапаном смешения (рис. IV-7), установленным на всасывающей линии газодувки.

СМЕШЕНИЕ ГАЗОВ

Непрерывное перемешивание газов осуществляется с помощью рассмотренных выше смесителей. Если необходимо смешать малое количество одного газа со сравнительно большим количеством другого неподвижного или движущегося с небольшой скоростью газа, то для гомогенизации газовой смеси используются специаль-

ные распределительные устройства. В периодических процессах, особенно в тех случаях, когда газы существенно отличаются по плотности, целесообразно применять механическое перемешивание, например пропеллерным вентилятором.

РАЗДЕЛЕНИЕ ГАЗОВ

Газовые смеси обычно разделяют с помощью процессов, в основе которых лежит различие в физико-химических свойствах веществ (например, различие по давлению паров, растворимости, средству к твердому адсорбенту, молекулярным и атомным массам, коэффициентам диффузии, плотности и т. д.).

Ниже кратко рассмотрены некоторые способы разделения газов.

Низкотемпературная фракционная дистилляция

В технике разделения газов широко используют низкотемпературную фракционную дистилляцию. Основная особенность используемых при этом колонн — малые расстояния между тарелками и небольшие барботажные колпачки (см., например, табл. IV-1) даже в крупных по диаметру аппаратах. Теория процессов дистилляции изложена в гл. V первого тома.

ТАБЛИЦА IV-1

Промышленные тарелки для разделения воздуха

Тип тарелки	Размер отверстия или диаметр колпачка, мм	Расстояние между тарелками, мм
Ситчатая	0,8—0,9	90—100
Колпачковая	8,8—10,2 25,4	54—60 101,6—152,4

Разделение в абсорберах

Основы абсорбционных процессов разделения газов рассмотрены в гл. VI первого тома справочника, аппаратура для проведения таких процессов в системе газ — жидкость описана в гл. I настоящего тома.

Разделение в адсорберах, гиперсорберах и колоннах со взвешенным слоем

Такое разделение проводят с помощью твердого адсорбента. Адсорбционные процессы разделения газов, осуществляемые обычно в аппаратах с неподвижным, движущимся¹ и взвешенным слоем², описаны в предыдущей главе.

Газовая диффузия

В смеси двух газов с различной плотностью средняя скорость движения молекул обратно пропорциональна

¹ Berg, Fairfield, Multer, Petrol. Refiner, 28, 113 (1949).

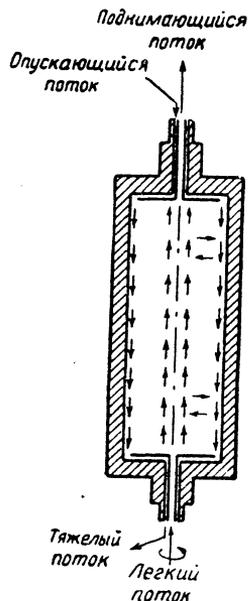
² Etherington, Fritz, Nicholson, Scheeline, Chem. Eng. Progr., 52, 274 (1956).

состоянии можно нагреть до температуры, достаточной для того, чтобы вызвать его испарение (сублимацию). Ресиверы или коллекторы обычно охлаждаются настолько, чтобы сконденсировать фракцию изотопа. Когда продуктом разделения является газ, в коллекторе должно быть некоторое количество материала, способного удержать продукт в нелетучей форме (например, графитовые коллекторы с магнем используют, чтобы удержать азот в виде нитрида магния). Такой материал должен легко отделяться от продукта химическим путем.

Электромагнитный сепаратор работает периодически (рабочий цикл состоит из периодов пуска, разделения и охлаждения). Иногда продукт для повышения степени чистоты направляют в сепаратор повторно. Достаточно надежно электромагнитный сепаратор работает при разделении малых количеств изотопов. В этом случае фактор разделения обычно высокий. Однако такой аппарат неэкономичен для крупных производств: производительность его ограничена и, кроме того, требуется химическая регенерация продукта.

Разделение газов в центрифугах

Смесь газов удается разделить на компоненты в вертикальном цилиндре, вращающемся с большой угловой скоростью вокруг своей оси. Компонент с более высокой молекулярной массой концентрируется около стенки цилиндра. Движение потоков в противоточной газовой центрифуге показано на рис. IV-12.



Легкий поток движется вверх, вблизи оси, а тяжелый — вниз, у стенок цилиндра. Чем длиннее цилиндр, тем большее различие в составе газа можно наблюдать при прочих одинаковых условиях. Скорость и степень разделения двух компонентов в газовых центрифугах зависит от разности молекулярных масс, а не от корня квадратного из их отношения, как в диффузионных процессах. В газовых центрифугах лучше разделяются смеси изотопов тяжелых элементов, поэтому такие аппараты могут быть достаточно экономичны при разделении изотопов урана (в крупных производствах).

Газовая центрифуга для разделения изотопов представлена на рис. IV-13. Ротор центрифуги изготовлен из прочного алюминиевого сплава. Вал ротора полый, что позволяет подавать через него газ. Ротор

Рис. IV-12. Распределение потоков в противоточной газовой центрифуге.

вращается электродвигателем мощностью 2,1 кВт при $n=60\,000$ об/мин. Наружный диаметр ротора равен 150 мм, толщина его стенки 8 мм, длина 700 мм. Центрифуга испытана при разделении изотопов ксенона, криптона, селена и урана. Установлено, что высокой степени разделения можно добиться, если в качестве питания одновременно подавать в центрифугу смесь изотопов и водород. Присутствие водорода, имеющего

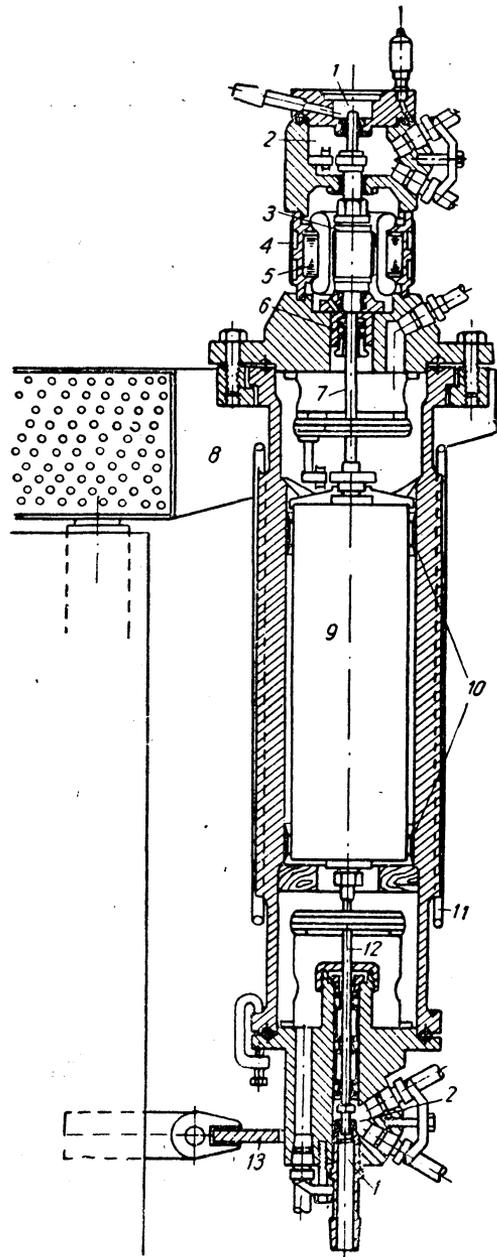


Рис. IV-13. Газовая центрифуга [Beyerll, Groth, Proceedings of the Symposium on Isotope Separation, Interscience, New York, 1958]:

1 — газовые камеры; 2 — изоляционные камеры; 3 — электродвигатель; 4 — охлаждающая рубашка статора; 5 — статор; 6 — изолирующая муфта (втулка); 7 — верхний трубчатый вал; 8 — опорная стойка; 9 — ротор; 10 — удерживающие кольца; 11 — охлаждающий змеевик; 12 — нижний трубчатый вал; 13 — предохранительное приспособление против скручивания.

колонки, как правило, наиболее просты и дешевы. Для обеспечения высокой разности температур, а следовательно, и максимальной производительности внутренний цилиндр часто снабжают электронагревом (особенно в тех случаях, когда разделяемые газы не разделяются при температуре раскаленной поверхности).

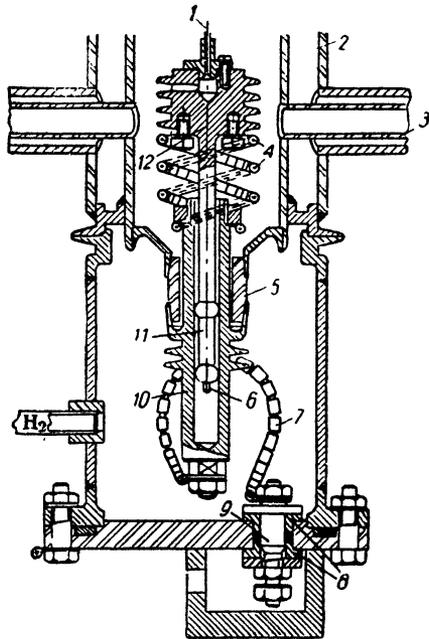


Рис. IV-10. Элементы нижнего электрического затвора термодиффузионной колонки [Voogman, Kronberger, Proceedings of the International Symposium on Isotope Separation, Interscience, New York, 1958]:

1 — тонкая проволока; 2 — водная рубашка; 3 — трубка конвектора, 4 — изолированные медные спирали; 5 — керамический изолятор; 6 — вольфрамовый кончик; 7 — витая медная проволока, покрытая керамическими бусами; 8 — изоляторы; 9 — вакуумнепроницаемый изолирующий электрический зажим (втулка); 10 — центральная втулка; 11 — центрирующий палец; 12 — груз.

Внешний цилиндр может быть изготовлен в виде металлической трубки с водной рубашкой. Высота термодиффузионной колонки достигает 3 м и более, внутренний диаметр наружной трубки обычно равен 0,012—0,05 м. Такие колонки часто работают последовательно, при этом низ предыдущей колонки соединяют трубками с верхом последующей. Любое удаление нагревателя от центра колонки ухудшает фактор разделения, поэтому правильной центровке (расположению вставок) необходимо уделять особое внимание¹. Центральная трубка (нагреватель) расширяется при нагреве и может деформироваться. Чтобы удержать нагреватель в тугонатянтом состоянии с учетом термического расширения, к нему прикрепляют груз (рис. IV-10). Электрический затвор (запорное устрой-

ство) термодиффузионной колонки заканчивается керамическим изолятором, присоединенным к металлическому корпусу. Электроэнергия подводится через полую центральную втулку по медным спиральям к грузу, соединенному с нижней частью провода. Это устройство позволяет сохранять центральное положение проволоки при ее расширении от нагрева (до 850°С). Электрический затвор достаточно прочен и герметичен. Оптимальное рабочее давление при термодиффузионном разделении большинства газов обычно несколько меньше атмосферного.

Электромагнитная сепарация

Для разделения изотопов часто применяют электромагнитный сепаратор. Если простые вещества или их соединения ввести в виде паров в ионизационную находящуюся под вакуумом камеру, то соединения диссоциируют, а незаряженные частицы ионизируются потоком электронов, испускаемым, например, раскаленной вольфрамовой или танталовой нитью. Полученные положительно заряженные ионы движутся ускоренно под действием разности потенциалов. Пройдя через щели в ускоряющих электродах, ионы направляются на ту сторону магнитного поля, где они вынуждены двигаться по круговой орбите. Радиус орбиты каждого иона пропорционален корню квадратному из его массы. Максимум разделения ионов различной массы достигается после того, как они пройдут 180°. В коллекторе сепаратора собираются отдельные фракции изотопов.

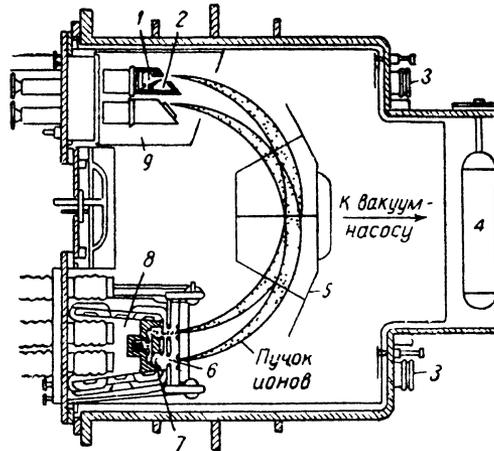


Рис. IV-11. Электромагнитный сепаратор „Калутрон“ с двумя ионизационными дугами [K e i t, J. Appl. Phys., 24, 1259 (1953)]:

1 — приемник тяжелых изотопов; 2 — приемник легких изотопов; 3 — смотровые окна; 4 — охлаждаемая ловушка; 5 — отбойная перегородка; 6 — ускоряющие электроды; 7 — ионизационная камера; 8 — источник ионов; 9 — сборник ионов.

На рис. IV-11 приведена схема электромагнитного сепаратора «Калутрон» с двумя ионизационными камерами и двумя параллельными сборниками продукта (коллекторами), помещенными внутри вакуум-резервуара с большим магнитом. На сепарацию подают газы или летучие вещества (такие как хлориды многих металлов). Рабочее давление в камере $\sim 2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. При этом давлении любое вещество в твердом

¹ Watson, Proceedings of the International Symposium on Isotope Separation, Interscience, New York, 1958.

их перемещения в колонке тоже будет различна. Состав выходящего потока определяют чувствительным прибором, позволяющим установить присутствие компонента как качественно, так и количественно. Эффективность хроматографического метода разделения очень высока.

В качестве неподвижной фазы может быть использована либо жидкость с твердым материалом, либо твердый материал. В табл. IV-2 приведены материалы, обычно применяемые при хроматографии в качестве неподвижной фазы (твердый «носитель» жидкости — обычно огнеупорный материал).

ТАБЛИЦА IV-2

Жидкости и твердые вещества, применяемые в качестве неподвижной фазы при газовой хроматографии

Неподвижная фаза	Разделяемые газы
Диметилсульфоланы (на огнеупорном материале)	Легкие углеводороды
Трикрезилфосфат (на огнеупорном материале)	Хлорзамещенные углеводороды
Сквален (на огнеупорном материале)	Легкие углеводороды
Палладиевая чернь (на асбесте)	Изотопы водорода
Активированный древесный уголь	O_2 , N_2 , CO , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6
Силикагель	То же

Внутренний диаметр колонн для аналитических аппаратов равен обычно 4—8 мм при длине 1,8—18 м. Аппараты могут быть вертикальными или горизонтальными, но обычно их изготавливают изогнутыми в виде змеевика. Змеевиковые аппараты погружают в термостат.

В качестве газа-носителя в хроматографии чаще всего используют гелий, водород, азот и двуокись углерода.

Дифференциальные детекторы позволяют сравнивать физические свойства газа-носителя без транспортируемого компонента и при его наличии. Действие наиболее распространенных дифференциальных детекторов основано на сравнении теплопроводности.

Разделение в конденсаторах

Газовую смесь из двух компонентов со значительно различающимися температурами кипения можно разделить путем конденсации одного из компонентов. Ниже даны примеры промышленного применения метода конденсации для разделения газовых смесей.

Выделение гелия из природного газа. Природный газ, поступающий на промышленную переработку, обычно содержит <2% гелия. Таким образом, при получении гелия надо сконденсировать ~98% исходного газа, чтобы получить остаток газов в виде сырого гелия и азота с небольшим количеством метана. Конденсацию природного газа проводят в кожухотрубных теплообменниках, изготовленных из меди и ее сплавов¹. При соединении труб малого диаметра с трубными решет-

ками используют сплавы олова и свинца. Это позволяет обеспечить надежное уплотнение при рабочем давлении 14—21 ат в интервале температур от —145 до —151°С.

Получение фталевого ангидрида. Фталевый ангидрид получают путем окисления нафталина или о-ксилола воздухом в паровой фазе в присутствии катализатора (пятиокиси ванадия). Выходящий из реактора поток с парами фталевого ангидрида обычно охлаждают воздухом в прямоугольных камерах, при этом фталевый ангидрид выкристаллизовывается в виде длинных игл (иглочатых кристаллов). По мере роста кристаллов они падают на дно камер и периодически удаляются.

Система для конденсирования фталевого ангидрида включает 15 комплектов сборников-камер в ряду

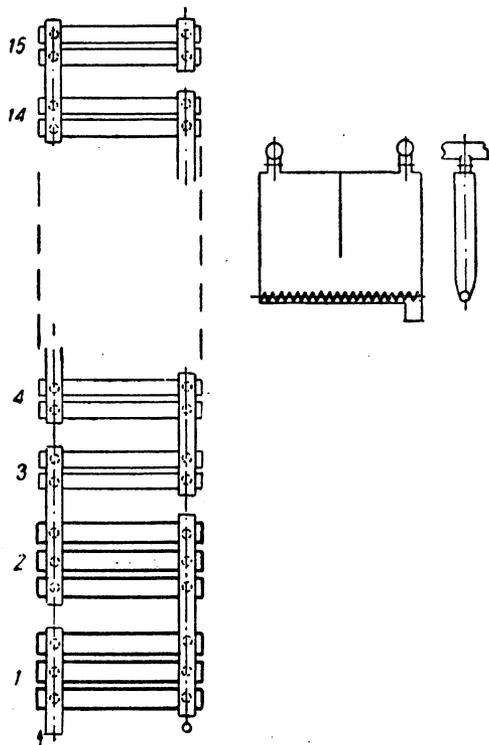


Рис. IV-16. Система конденсаторов для сырого фталевого ангидрида.

(рис. IV-16). Каждая такая камера (длина 5,47 м, высота 3,65 м и ширина 0,608 м) разделена перегородкой. Первые два комплекта камер охлаждаются водой, а остальные 13 — воздухом. Так как по крайней мере две камеры в каждом комплекте соединены параллельно, то одну из них можно очищать, а из другой выгружать продукт. Установленный внизу камеры шнек транспортирует продукт к разгрузочному желобу.

На построенном в Англии заводе кристаллизацию фталевого ангидрида осуществляют на наружной поверхности труб, которые охлаждают циркулирующим внутри маслом¹. Температуру масла периодически повышают и плавят кристаллы фталевого ангидрида. Таким образом, когда на одних конденсаторах продукт

¹ Mullins, Chem. Eng. Progr., 44, 567 (1948).

¹ Riley, Chem. a. Ind., 1956, 1464.

малую молекулярную массу, снижает до минимума радиальные градиенты давлений. Газовая центрифуга может работать при различных температурах в верхней и нижней ее частях. Температурный градиент обеспечивает конвективную циркуляцию внутри центрифуги.

Масс-диффузия

Центральной частью установки для масс-диффузионного разделения газов¹ (рис. IV-14) является цилиндрическая ячейка, состоящая из двух кольцевых

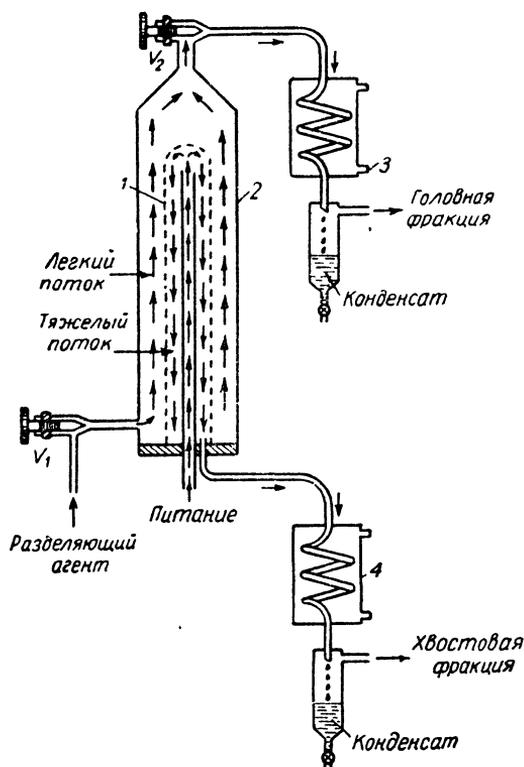


Рис. IV-14. Схема установки для масс-диффузионного разделения газов [Maier, J. Chem. Phys., 7, 854 (1939)]:

1 — масс-диффузионное сито; 2 — масс-диффузионная ячейка; 3 — головной конденсатор; 4 — хвостовой конденсатор.

камер, разделенных цилиндрической масс-диффузионной перегородкой. Исходная газовая смесь (питание) подводится по центральной трубе в верхнюю часть кольцевой камеры. Разделяющий агент представляет собой пар, который может быть селективно сконденсирован. Этот пар не реагирует с поступающими на разделение газами. Поступает пар в кольцевую камеру с внешней ее стороны (между корпусом и перегородкой). Исходная смесь движется вниз во внутренней камере и захватывается разделяющим агентом, диффундирующим через перегородку. Так как легкий компонент диффундирует с большей скоростью, чем тяже-

лый, то поток во внутренней кольцевой камере постепенно обогащается тяжелым компонентом. По той же причине разделяющий агент, движущийся вверх во внешней камере, обогащается легким компонентом. Тяжелый и легкий потоки удаляются соответственно снизу и сверху масс-диффузионной ячейки. Для конденсации разделяющего агента каждый поток затем охлаждается.

Степень разделения при масс-диффузии обычно выше, чем при термодиффузии, но меньше, чем при газовой диффузии через пористую перегородку. Масс-диффузионная перегородка может быть изготовлена в виде металлического (проволочного) сита с большим числом отверстий. При необходимости отдельные ячейки можно собрать в каскад¹. Однако термодинамическая эффективность разделения газов в каскаде невелика (намного меньше, чем при газовой диффузии).

Хроматография

Хроматографию можно представить как физический метод разделения компонентов, распределяющихся между двумя фазами, одна из которых представляет собой неподвижный слой материала с сильно развитой поверхностью, а другая является жидкостью, движущейся через этот слой или вдоль него². Хроматографию широко используют для аналитических исследований и, кроме того, для концентрирования малых количеств неочищенных редких изотопов³.

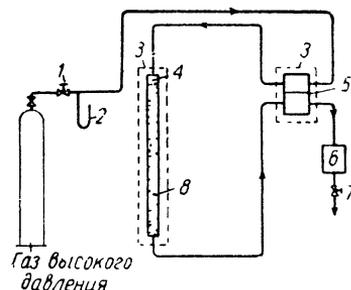


Рис. IV-15. Схема установки для газовой хроматографии [Keulemans, Gas Chromatography, New York, 1959]:

1 — вентиль для точной регулировки газа; 2 — манометр; 3 — термостат; 4 — устройство для ввода пробы; 5 — дифференциальный детектор; 6 — мокрый газовый счетчик; 7 — вентиль для точной регулировки газа; 8 — неподвижный слой.

Схема установки для газовой хроматографии представлена на рис. IV-15. Разделяемую смесь газов вводят в переднюю часть колонки. Через колонку (температура ее поддерживается постоянной) пропускают также поток инертного газа-носителя. Этот газ переносит компоненты смеси в виде пара или газа. Вследствие того, что компоненты смеси задерживаются материалом в различной степени, эффективная скорость

¹ Benedict, Boas, Chem. Eng. Progr., 47, 51, 111 (1951).

² Keulemans, Gas Chromatography, New York, 1959.

³ Glueckauf, Kitt, Gas Chromatographic Separation of Hydrogen Isotopes, Proceedings of the Symposium on Isotope Separation, Amsterdam, Interscience, New York, 1958.

¹ Maier, J. Chem. Phys., 7, 854 (1939); US Bur. Mines Bull., 431, 1940.

ТАБЛИЦА IV-4

Системы сит ¹

По ГОСТ 2851-45 3826-47, 3924-47, 3584-53 ²		Сита Тайлера	Бюро стандартов США LS-584 и ASME-11		Британский стандарт BS-410 : 1943		ИММ ³		Германский стандарт DIN-1171	
№	сторона отверстия в свету, мм	меш	№	сторона отверстия в свету, мм	№	сторона отверстия в свету, мм	№	сторона отверстия в свету, мм	№	сторона отверстия в свету, мм
—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	6,00
5	5	3 ¹ / ₂	3 ¹ / ₄	5,66	—	—	—	—	—	—
—	—	4	4	4,76	—	—	—	—	—	—
4	4	5	5	4,00	—	—	—	—	—	—
—	—	6	6	3,36	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	5	3,353	—	—	—	—
3,3	3,3	7	7	2,83	—	—	—	—	2	3,00
—	—	—	—	—	6	2,812	—	—	—	—
2,8	2,8	—	—	—	—	—	5	2,540	—	—
—	—	—	—	—	7	2,411	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	2 ¹ / ₂	2,40
2,3	2,3	8	8	2,38	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	8	2,057	—	—	—	—
2	2	9	10	2,00	—	—	—	—	3	2,00
1,7	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	10	12	1,68	10	1,676	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	8	1,600	—	—
—	—	12	14	1,41	12	1,405	—	—	4	1,50
1,4	1,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	10	1,270	—	—
1,2	1,2	14	16	1,19	14	1,204	—	—	5	1,20
—	—	—	—	—	—	—	12	1,059	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	6	1,02
1	1,0	16	18	1,00	16	1,003	—	—	—	—
085	0,85	—	—	—	18	0,853	—	—	—	—
—	—	20	20	0,84	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	16	0,795	—	—
—	—	24	25	0,71	—	—	—	—	8	0,75
07	0,70	—	—	—	22	0,699	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	20	0,635	—	—
06	0,60	—	—	—	25	0,599	—	—	10	0,60
—	—	28	30	0,59	—	—	—	—	—	—
05	0,50	32	35	0,50	30	0,500	—	—	11	0,54
—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	0,49
042	0,42	35	40	0,42	36	0,422	30	0,424	14	0,43
—	—	—	—	—	—	—	—	—	16	0,385
0355	0,355	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	42	45	0,35	44	0,353	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	40	0,317	—	—
03	0,30	48	50	0,297	52	0,295	—	—	20	0,300
025	0,25	60	60	0,25	60	0,251	50	0,254	24	0,25
021	0,21	65	70	0,21	72	0,211	60	0,211	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	0,20
018	0,18	80	80	0,177	85	0,178	70	0,180	—	—
—	—	—	—	—	—	—	80	0,160	—	—
015	0,15	100	100	0,149	100	0,152	—	—	40	0,150
—	—	—	—	—	—	—	90	0,139	—	—
0125	0,125	115	120	0,125	120	0,124	100	0,127	—	—
0105	0,105	150	140	0,105	150	0,104	120	0,104	50	0,120

кристаллизуется, на других кристаллы продукта пла-
вятся.

Получение цинка. В промышленности цинк восстанавливают из окиси цинка углеродом в вертикальной на-
греваемой реторте. Продуктами реакции являются пары
цинка и окись углерода. Цинк отделяют в результате
конденсации в так называемых конденсаторах-распы-
лителях¹. Жидкий цинк находится в сборнике кон-
денсатора при постоянной температуре (в условиях
термостатирования). Через стенку конденсатора про-
ходит вал, оканчивающийся графитовым ротором. Ро-

руется на них. Жидкий цинк непрерывно стекает из
конденсатора через переточную наружную стенку. Теп-
ло отводится от цинковой бани посредством змеевика,
охлаждаемого водой с наружной стороны сборника.

Разделение в химических реакторах

Примеры промышленного применения химических ре-
акторов для разделения газовых смесей приведены в
табл. IV-3.

ТАБЛИЦА IV-3

Примеры промышленного применения химических реакторов для разделения газовых смесей

Удаляемый компонент	Химическая реакция	Аппаратура
O ₂ (малые количества или следы) из смеси с N ₂ или с 3H ₂ + N ₂	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	Колонны с катализатором (палладиевый катализатор при комнатной температуре, никелевый катализатор при ~175° C)
O ₂ из смеси с Ag в производстве Ag высокой чистоты	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	Колонны с насадкой и палладиевым катализатором
NH ₃ из коксового газа	$2NH_3 + H_2SO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4$	Одноступенчатая орошаемая камера или аппарат с барботажом через раствор (NH ₄) ₂ SO ₄ , (при избытке H ₂ SO ₄)
CO ₂ или H ₂ S из смеси с H ₂ или с синтез-газом	a) $HOOC_2H_4NH_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow (HOOC_2H_4NH_3)HCO_3$ $HOOC_2H_4NH_2 + H_2S \rightarrow (HOOC_2H_4NH_3)HS$ b) $K_2CO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow 2KHCO_3$ $K_2CO_3 + H_2S \rightarrow KHCO_3 + KHS$ c) $2NaOH + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$ $2NaOH + H_2S \rightarrow Na_2S + 2H_2O$	Противоточные абсорбционные колонны (насадочные или распылительные)
H ₂ S (малые количества или следы) из водяного газа или CO ₂	a) $Fe_2O_3 + 3H_2S \rightarrow Fe_2S_3 + 3H_2O$ b) $Fe_2S_3 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 3S$	Три — четыре камеры, разделенные прямоугольными секциями с насадкой
H ₂ S из водяного газа	a) $Na_4As_2S_5O_2 + H_2S \rightarrow Na_4As_2S_6O + H_2O$ b) $Na_4As_2S_6O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow Na_4As_2S_5O_2 + S$	Абсорбционные противоточные насадочные колонны
CO (малые количества) из синтез-газа	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$	Вертикальный цилиндрический насадочный реактор с никелевым или железным катализатором

тор погружен в жидкий цинк, который он распыляет на капли, заполняющие камеру конденсатора и промывающие его стенки. Парообразный цинк, соприкасаясь с капельками цинка и со стенками камеры, конденса-

¹ Bunce, Peirce, Eng. Min. J., 150, 56 (1949).

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Ruhemann, The Separation of Gases, New York, 1949.
 Benedict, Pigford, Nuclear Chemical Engineering, New York, 1957.
 Kistemaker, Bigeleisen, Nier (eds.), Proceedings of the International Symposium on Isotope Separation, Interscience, New York, 1958.

СИСТЕМЫ ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО — ТВЕРДОЕ ВЕЩЕСТВО¹

ГРОХОЧЕНИЕ

Грохочением (просеиванием) называют процесс разделения с помощью сит смеси твердых частиц (гранул зерен) различных размеров на две или несколько групп (фракций).

В результате грохочения получают продукты из более однородных по размерам частиц, чем исходная смесь, так как одна часть материала проходит через сито, а другая остается на нем. Ту часть материала, которая проходит через предыдущее сито, но задерживается на следующем, называют промежуточным продуктом.

Грохочение применяют в следующих целях: 1) для удаления мелких частиц (чтобы избежать чрезмерного

¹ Рассмотрены процессы обработки твердых веществ. — Прим. ред.

проходят через отверстия сита, а частицы большего размера выгружаются снизу. Производительность такого грохота относительно невелика.

Качающиеся грохоты. Механические качающиеся грохоты состоят из прямоугольного каркаса, который поддерживает металлическую сетку или перфорированную пластину, расположенную под небольшим углом и закрепленную на раме каркаса. Каркас опирается на гибкие рессоры, находящиеся в основании грохота, и движется возвратно-поступательно. Исходный материал, поступающий на просеивание, загрузается сверху и продвигается вперед по грохоту, сравнительно мелкие частицы проходят через отверстия сита.

Качающиеся грохоты с механическим транспортером используются как для просеивания, так и для транспортирования материала. Разделение на таких грохотах обычно рентабельно, но требует больших затрат в связи с использованием вибрационного опорного устройства.

Вибрационные грохоты. Такие аппараты обладают высокой производительностью, значительно превосходящей производительность прочих грохотов (особенно при просеивании очень мелких частиц). К другим их преимуществам следует отнести сравнительно точную классификацию продуктов по размерам, низкие затраты на 1 т обрабатываемого материала и достаточную экономичность. Такие аппараты можно разделить на две основных группы — механические и электрические. В механических грохотах используют разные виды вибрации. Например, для грубого разделения материалов обычно применяют вертикальные вибрации, создаваемые посредством эксцентрика или дебалансного груза. Большое распространение получил механический четырехосный наклонный грохот «Тай-Рок» (рис. IV-17).

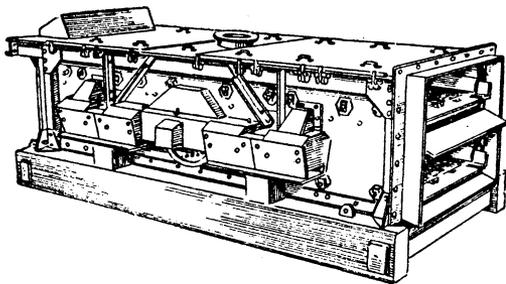


Рис. IV-17. Механический вибрационный грохот «Тай-Рок».

Этот грохот представляет собой сбалансированную круговую машину. Она смонтирована на раме и имеет свободно закрепленный корпус, установленный на резиновых опорах, которые смягчают удары тяжелых кусков материала и облегчают вращение вала. Двухосный грохот имеет такой же корпус, но у него отсутствуют два внешних подшипника и рама. Движение по кругу в двухосном аппарате вызывается эксцентрическими дебалансами на валу, а сам грохот удерживается верхними тягами (или нижними рессорами).

Грохоты, использующие вращение дебалансных грузов, имеют симметричный вал по всему корпусу с дебалансным маховым колесом на каждом конце. Противовесы на маховом колесе позволяют установить желаемую амплитуду колебаний.

Горизонтальный грохот приводится в действие эксцентриковым механизмом, который монтируется между боковинами рамы над корпусом аппарата.

Широкое распространение в химической промышленности получили электрические грохоты. Они используются при обработке легких и мелких сухих материалов, а также металлической стружки с размерами

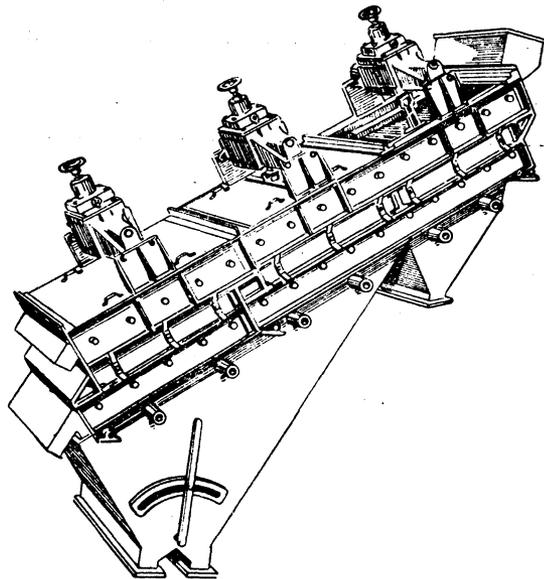


Рис. IV-18. Электрический вибрационный грохот «Гум-Мер» (тип. 38).

~0,04—5 мм (4—325 меш). Большинство таких грохотов работает при сравнительно высокой частоте колебаний (1500—7200 вибраций в минуту). Низкоамплитудная вибрация производится с помощью электромагнита.

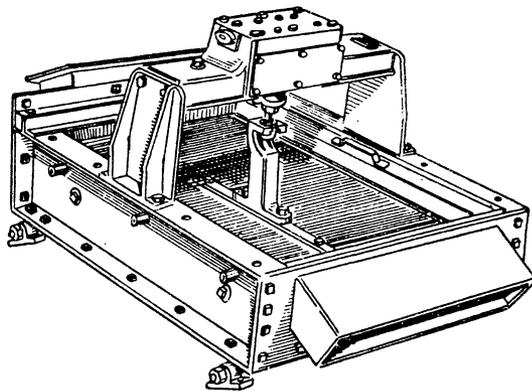


Рис. IV-19. Электрический вибрационный грохот «Гум-Мер» (тип. 38) для лабораторных испытаний.

На рис. IV-18 представлен один из электрических вибрационных грохотов, применяемых для обработки смесей химических удобрений, а на рис. IV-19 — аналогичный грохот, используемый для лабораторных испытаний.

Осцилляционные (колебательные) грохоты. Эти грохоты характеризуются низкой частотой колебаний (300—

Продолжение

По ГОСТ 2851—45 3826—47, 3924—47, 3584—52 ²		Сита Тайлера	Бюро стандартов США LS-584 и ASME-11		Британский стандарт BS-410 : 1943		IMM ³		Германский стандарт DIN-1171	
№	сторона отверстия в свету, мм	меш	№	сторона отверстия в свету, мм	№	сторона отверстия в свету, мм	№	сторона отверстия в свету, мм	№	сторона отверстия в свету, мм
—	—	170	170	0,088	170	0,089	—	—	60	0,102
—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	0,088
0085	0,085	—	—	—	—	—	150	0,084	—	—
0075	0,075	200	200	0,074	200	0,076	—	—	80	0,075
—	—	—	—	—	240	0,066	—	—	—	—
0063	0,063	250	230	0,062	—	—	200	0,063	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	0,060
0053	0,053	270	270	0,053	300	0,053	—	—	—	—
—	—	325	325	0,044	—	—	—	—	—	—
0042	0,042	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	400	400	0,037	—	—	—	—	—	—

¹ Таблица добавлена в процессе редактирования (Справочник химика, т. V, Изд. «Химия», 1966, стр. 436).

² В отечественной практике сита часто характеризуют размером отверстия сетки в микронах (без указания номера).

³ Институт горного дела и металлургии, Лондон (эта серия сит в большой мере заменена британскими стандартами).

измельчения их при последующей обработке материала в мельницах); 2) для получения готовых производственных материалов с частицами, размер которых находится в определенном диапазоне; 3) для удаления частиц, не подходящих по размеру (слишком больших или слишком малых).

Сита

Сита могут быть изготовлены из плетеной металлической сетки, шелка, а также из пластических материалов с просверленными или штампованными отверстиями.

Применяют несколько систем нормальных сит (сравнительная их характеристика приведена в табл. IV-4). Для каждой системы (шкалы) сит характерно постоянство отношений размеров данного сита к последующему. Это постоянное отношение называется модулем. Германские сита по нормам DIN основаны на следующей зависимости между диаметром проволоки сита d и размером отверстия a :

$$\frac{a^2}{(a+d)^2} = 0,36$$

Номер сита по DIN обозначает число отверстий на 1 см длины проволоки.

В английской системе сит (Тайлера) в основу положено следующее отношение размеров отверстий сит соседних номеров:

$$a_2/a_1 = \sqrt{2}$$

Таким образом, модуль системы равен $\sqrt{2}$, а отношение площадей отверстий соседних сит равно 2. Номер сита соответствует числу отверстий (меш) на 1 дюйме (2,54 см) длины проволоки. Иногда пользуются также промежуточными ситами, у которых отношение размеров отверстий соседних сит равно $2^{1/4}$.

Размер отверстия a , число меш M и диаметр проволоки d связаны между собой соотношением:

$$P = \frac{a^2}{(a+d)^2} \cdot 100 = (aM)^2 \cdot 1000$$

где P — площадь живого сечения сита (сумма площадей всех отверстий), %.

Виды грохотов

Грохоты можно разделить на пять основных классов: 1) колосниковые; 2) вращающиеся (барабанные); 3) качающиеся; 4) вибрационные; 5) осцилляционные (колебательные).

Колосниковые грохоты. Такие аппараты применяются преимущественно для удаления частиц размером ~ 50 мм и больше. Они состоят из ряда параллельных стержней (прутьев), находящихся друг от друга на определенном расстоянии.

В промышленности колосниковые грохоты широко используют на рудно-дробильных заводах для удаления мелких частиц перед тем, как руда или горная порода поступает на дробление. Эти аппараты могут иметь неподвижные или вибрирующие колосники (во избежание преждевременного износа колосники часто изготовляют из стали с добавкой марганца).

Грохот с неподвижными колосниками является одним из наиболее простых сепарирующих устройств. Такие грохоты применяют для грубого просеивания сухих материалов, но их можно использовать также для разделения сырых и липких материалов. Угол наклона грохота $20-50^\circ$.

Плоские горизонтально расположенные колосники часто устанавливают в верхних частях рудных и угольных бункеров для задержания слишком больших кусков материала.

Грохот с вибрирующими колосниками представляет собой простую решетку из прутьев установленную на эксцентриках, что позволяет создать возвратно-поступательное движение.

Вращающиеся (барабанные) грохоты. Такие аппараты ранее широко использовались для удаления частиц размером ~ 12 мм, но затем были вытеснены вибрационными грохотами.

Цилиндрический каркас вращающегося грохота обычно обтянут металлической проволоочной сеткой или перфорированным листом. Грохот открыт с двух сторон и имеет небольшой угол наклона. Скорость его вращения достигает $15-20$ об/мин. Исходный материал загружается в аппарат сверху, частицы нужного размера

где E — эффективность, %; R — количество мелких частиц, проходящих через сито, %; A — количество частиц тонкой фракции, более мелких по размеру, чем обозначено на сите, %; B — количество мелких частиц в исходном материале (питании), величина которых соответствует заданному размеру разделения, %.

Аналогично эффективность по материалу, сходящему с сита, можно выразить как отношение полученного количества крупных частиц к исходному количеству крупных частиц:

$$E = \frac{CD}{F}$$

где C — количество крупных частиц на грохоте, %; D — количество крупных частиц большего размера, чем обозначено на сите (больше, чем заданный размер частиц в остатке), %; F — количество крупных частиц, величина которых соответствует заданному размеру разделения (по питанию грохота), %.

Таггарт¹ приводит следующую формулу:

$$E = 100 \frac{100(e - v)}{e(100 - v)}$$

здесь e — количество тонких частиц в питании, %; v — количество тонких частиц в крупной фракции, %.

На практике для определения производительности грохотов применяют графические методы, в которых используют данные ситового анализа. Например, так поступают при обстоятельном исследовании процесса просеивания.

Обычно исходных данных для расчета производительности грохота недостаточно, поэтому приходится проводить лабораторные испытания.

Полезная емкость грохота и его производительность тесно связаны между собой, однако полезная емкость может быть большой при низкой производительности, что нежелательно. Если подача материала на грохот увеличивается сверх оптимальной, то производительность уменьшается.

При выборе грохота для того или иного вида просеивания необходимо учитывать:

- 1) вид и основные свойства материала, а также условия проведения процесса (истинную и насыпную плотность, твердость и размер частиц, влажность, температуру и т. д.);
- 2) данные нормальной и максимальной скорости подачи материала питателем к грохоту;
- 3) результаты полного анализа исходного материала по крупности и ситового анализа конечного продукта;
- 4) сведения о требуемом разделении и целях грохочения.

Важно также мокрым или сухим будет грохочение и какое количество воды требуется для увлажнения материала. Кроме того, имеют значение и способ подачи питания к грохоту, открытый или закрытый цикл грохочения, тип грохота и т. д.

Особенности процессов грохочения

Способ питания. Для обеспечения максимальной производительности грохота питание необходимо подавать равномерно. Исходный материал должен распределяться по всей ширине сита так, чтобы каждая частица могла передвигаться по поверхности грохота.

Поверхности грохочения. При выборе проволочной ткани для грохота нужно учитывать качество просеивания, площадь живого сечения и долговечность проволочного сита. Часто приходится использовать сито с отверстиями, несколько большими, чем самый мелкий принятый размер материала. Такое увеличение необходимо для того, чтобы обеспечить полное удаление материала требуемого размера.

Материал с плоскими частицами можно обрабатывать также на сите с прямоугольными отверстиями при условии, что в продукте допустимо содержание некоторого количества плоских частиц большего размера, чем при обработке на сите с квадратными отверстиями. Другими словами, те гранулы, которые могут пройти через сито с прямоугольными отверстиями и оказаться в продукте, не пройдут через сито с квадратными отверстиями.

Выбор материала для сит осложнен в тех случаях, когда разделяют удлиненные частицы, а также влажные материалы, склонные к слипанию, в углах квадратных или прямоугольных отверстий. Чем меньше диаметр проволоки, из которой изготовлено сито, тем большей удельной производительности грохота можно достигнуть, но тем менее долговечно сито.

Шелковую ткань для сит обычно изготавливают из крученого многониточного естественного шелка. В последнее время для сит стали использовать нейлон и другие синтетические материалы. Нейлоновые ткани характеризуются отверстиями, измеряемыми в микронах.

В штампованных пластинах отверстия могут иметь различную форму (круглую, квадратную, прямоугольную, шестиугольную). Перфорированное сито имеет большую жесткость и обычно служит дольше, чем проволочная ткань, но не обеспечивает такой же большой производительности на единицу площади. Поэтому применение штампованных перфорированных сит ограничено более грубыми процессами разделения.

Стержневые грохоты чаще всего применяют для обработки материалов с крупными и тяжелыми частицами. Такие грохоты изготавливают из стальных прутьев или стержней, расположенных в определенном порядке на распорках. Чтобы предотвратить заклинивание материала, толщину стержней по сечению обычно меняют (сужение сверху вниз и от одного конца к другому).

Наиболее высоких результатов в процессах грохочения можно добиться, применяя грохоты с одним стилем. В многонастильных грохотах материал обычно поступает на расположенные ниже сита неравномерно и полезная их площадь используется неэффективно.

Угол наклона. Оптимальным считается такой угол, который позволяет обрабатывать наибольшее количество материала по объему крупного продукта и удалить при этом тонкие частицы в соответствии со стандартом или заданием. Для того, чтобы разделить материал на грубые и тонкие фракции, толщину слоя материала необходимо ограничить. Вибрация, расслаивая тяжелые частицы, дает возможность тонким частицам подойти к поверхности сита и пройти через отверстия. При увеличении угла наклона повышается скорость движения частиц и уменьшается толщина их слоя. В вибрационном грохоте угол наклона должен согласоваться со скоростью и силой ударов частиц.

Амплитуда и частота вибраций. Эти величины должны быть такими, чтобы обеспечить тщательное перемешивание материала и не допустить залипания и забивания ткани сита. Они в некоторой степени зависят от размера и веса частиц обрабатываемого материала.

¹ Taggart, Handbook of Mineral Dressing, New York, 1953.

400 колебаний в 1 мин) в плоскости, параллельной расположению просеиваемого материала. Грохоты такого типа обычно снабжены ситами с размерами отверстий от 0,25 до 12,7 мм. Однако при разделении некоторых легких материалов можно получить частицы с размерами от 0,05 до 0,07 мм. В таких случаях применяют сита из шелковых тканей.

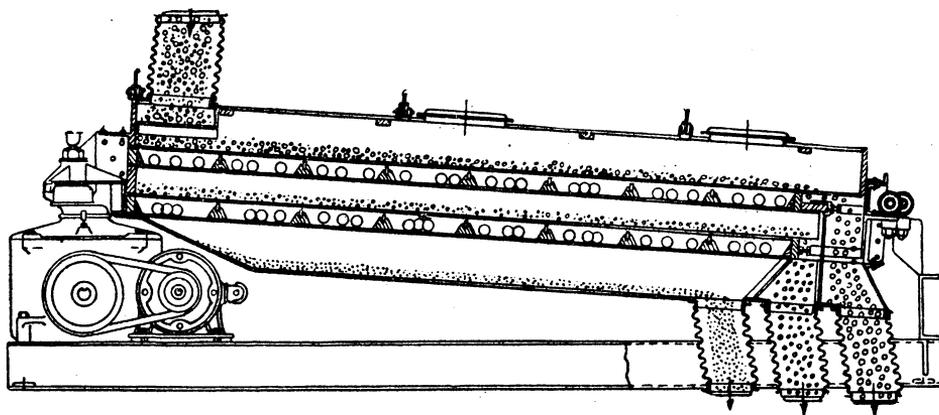


Рис. IV-20. Грохот с возвратно-поступательным движением.

Широкое применение в химической промышленности нашли возвратно-поступательные грохоты (рис. IV-20). Раму грохота заставляет колебаться эксцентрик, делающий 500—600 об/мин. Так как грохот наклонен примерно на 5°, то возникает вторичная вибрация с амплитудой ~2,5 мм, нормальной к основной вибрации. Вторичная вибрация вызывается ударами исходного материала о грохот.

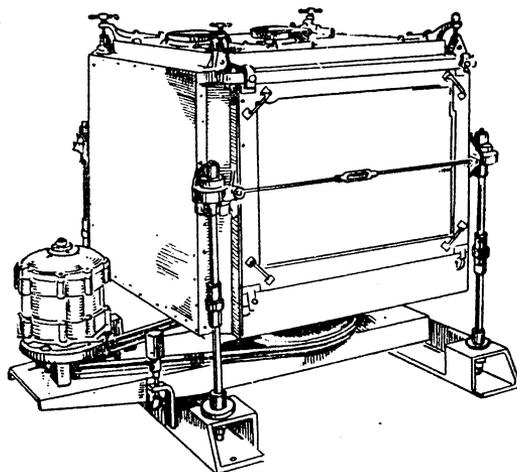


Рис. IV-21. Вращательно-колебательный грохот.

Такие аппараты используются при обработке материалов с частицами размером ~0,05 мм (различные химикаты, металлические порошки и ряд других порошкообразных и гранулированных материалов). В многотоннажных производствах, например, при разделении горных пород, гравия, их не применяют.

Нашли также применение вращательно-колебательные грохоты (круглые и квадратные) с рядом сит, расположенных одно над другим. Круговое колебательное движение обеспечивается в данном случае эксцентриками или противовесами. Многие вращательно-колебательные грохоты получают дополнительные вибрации, вызываемые специальными ударами по раме сита.

Показанные на рис. IV-21 и IV-22 грохоты приводятся в движение с помощью электродвигателя, соединенного с опорным валом аппарата.

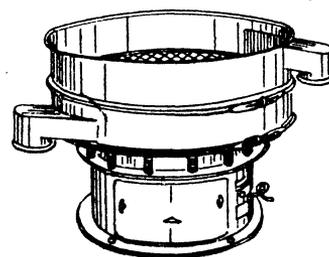


Рис. IV-22. Виброэнергетический сепаратор.

Осцилляционные грохоты являются наиболее дешевыми и экономичными аппаратами для просеивания шихты.

Производительность и эффективность

Единой методики для определения производительности грохотов пока нет. Один из методов, позволяющих оценить производительность, можно найти в справочной литературе¹. Эффективность грохочения может быть рассчитана по нескольким формулам. Эффективность по материалу, проходящему через сито, определяется как отношение количества конечного продукта к количеству исходного продукта питания:

$$E = \frac{RA}{B}$$

¹ Sieve Handbook, № 53, Cleveland, Ohio.

3) скорость осаждения твердых частиц снижается при увеличении вязкости и плотности жидкой среды.

Существует точка, соответствующая такому состоянию (разбавлению), когда понижение плотности или вязкости при добавлении большего количества жидкости создает скоростной эффект, т. е. увеличивает нормальную скорость осаждения при классификации, что сопровождается более грубым разделением. В этой точке меньшее количество жидкости изменяет вязкость и подъемную силу настолько, что ухудшает разделение.

К основным технологическим задачам, которые приходится решать средствами мокрой классификации, можно отнести следующие:

1) концентрирование малых по размеру, но тяжелых частиц в продукте, содержащем более крупные легкие частицы;

2) простое разделение песка и шлама с получением двух продуктов;

3) промывка с последующим обезвоживанием, репульпированием в более слабом растворе и еще одним обезвоживанием;

4) сортировка твердых тел на части, каждая из которых имеет небольшой предел размеров по ситам;

5) контроль замкнутого цикла мельницы.

Классификацию используют преимущественно при обработке сырья, поступающего в дальнейшем на химическую переработку. Этот процесс представляет особый интерес для инженера-химика в том случае, когда необходимо получить продукты строго определенного размера, плотности, чистоты и влажности. Для разделения сырья применяются аппараты различных типов. Классификаторы могут быть изготовлены из кислото- или щелочестойчивой нержавеющей стали или из стали, покрытой резиной (стоимость аппарата при этом повышается). Классификаторы рассчитаны на 24-часовую непрерывную работу и почти всегда имеют приспособления, предотвращающие их перегрузку. По данным табл. IV-5 можно выбрать необходимый тип классификатора.

Немеханические классификаторы

Конусный классификатор. (рис. IV-26). Классификаторы конусного типа — одни из старейших и недорогих аппаратов, которые все еще применяются для сравнительно грубого разделения. Они имеют большую высоту (наклон сторон равен 60°), но настолько просты, что их можно изготовить на месте. Такие классификаторы не подходят для пульпы, твердые частицы которых склонны к заиванию или образованию шлама. Эксплуатация этих аппаратов часто более сложна, чем некоторых классификаторов механического типа.

Гидроциклон (рис. IV-27). Аппараты такого типа получили очень быстрое распространение.

К достоинствам их следует отнести низкую стоимость, возможность обеспечения особо тонкого разделения и разделения при высоком содержании твердого вещества в сливе.

Гидроциклон работает под давлением, создаваемым посредством статического напора или насоса. Исходная смесь (питание) поступает в цилиндрическую часть аппарата тангенциально. Это обуславливает создание в гидроциклоне центрифугирующего эффекта и завихрений. Через крышку аппарата проходит труба, предназначенная для удаления верхнего продукта (слива). Крупные твердые частицы движутся в направлении постепенно сужающегося конуса и удаляются из него в частично обезвоженном виде.

Известно много различных по конструкции и размерам гидроциклонов. Например, пластмассовые гидроциклоны «Дорр Клоун» имеют размер карандаша диаметром ~ 10 мм. Изготавливаются также гидроциклоны диаметром до 1200 мм из мягкой стали, защищенной резиной, или из нержавеющей стали. Широкое применение находят фарфоровые аппараты диаметром от 25

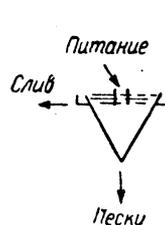


Рис. IV-26. Конусный классификатор.

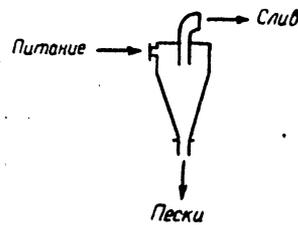


Рис. IV-27. Гидроциклон.

до 100 мм. В пищевой промышленности США введены стандарты на специальные типы гидроциклонов диаметром 6 дюймов (152 мм) из нейлона. Небольшие аппараты для тонкого разделения, соединенные с помощью труб, обычно работают параллельно (до 480 циклонов диаметром 10 мм). Большие аппараты можно использовать по отдельности или при необходимости соединять их наружным трубопроводом.

При измельчении с замкнутым циклом (особенно для процессов с повторным дроблением и тонким разделением) гидроциклон может заменить более дорогие чановые классификаторы. Можно его использовать также для разделения, соответствующего 0,2—0,3 мм при разломе с замкнутым циклом.

Гидроциклоны получили широкое применение в химической промышленности, например, при получении известкового молока, удалении углеродсодержащего материала в производстве фосфорной кислоты, при промывании тонких урановых пульпы в открытом цикле, при классификации кристаллов в магме и т. п. Стоимость таких аппаратов колеблется от нескольких долларов для одиночных аппаратов диаметром 10 мм до нескольких тысяч долларов для батарейных установок в закрытых корпусах. При отсутствии в аппарате статического напора к стоимости циклона следует добавлять стоимость насосной установки.

Механические классификаторы

Скребокый классификатор (рис. IV-28). Долгое время для классификации и осушки применяли наклон-

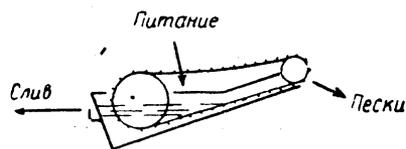


Рис. IV-28. Скребокый классификатор.

ные корыта, снабженные движущимся бесконечным ремнем или цепью с поперечными скребками. Новый классификатор «Хардинг Оведрайн» также является

При выборе частоты и амплитуды вибраций необходимо учитывать угол наклона и тип поверхности сита.

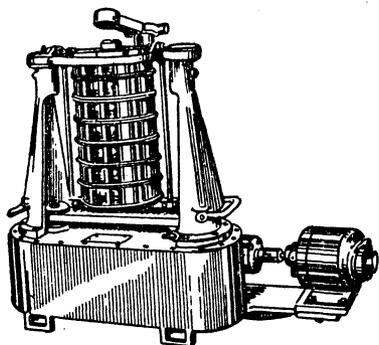


Рис. IV-23. Качающийся грохот «Ро-Тап».

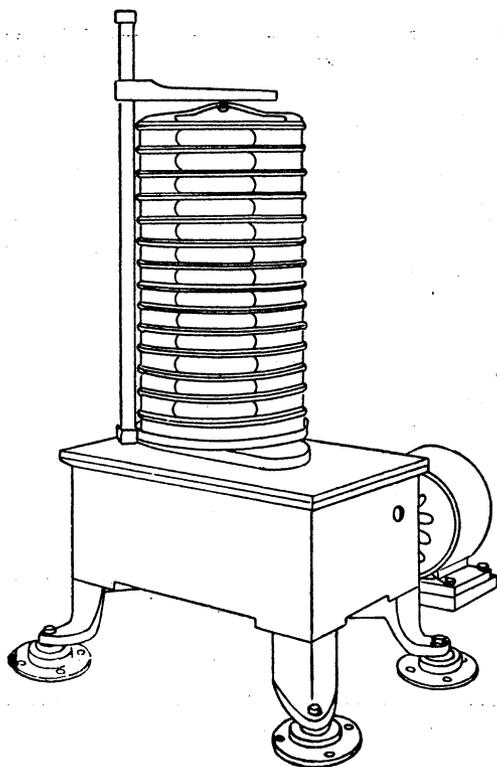


Рис. IV-24. Качающийся грохот «Энд-Шак».

Контрольные сита

Контрольные сита используют главным образом при определении эффективности работы грохотов, дробилок и мельниц. Стандартные сита с соответствующими отверстиями применяют для ситовых анализов. Время просеивания и метод перемешивания материала на сите также должны соответствовать стандартам.

Лабораторные грохоты (встряхиватели)

Качающийся грохот «Ро-Тап» (рис. IV-23) с системой сит Тайлера широко используется для проведения процессов опытного просеивания. Сита приводятся в круговое движение и встряхиваются от удара. Скорость движения сит и удары согласованы и регулируются, что дает возможность проводить сравнения ситовых анализов. Одновременно в грохоте можно установить от 1 до 13 сит. Грохот снабжен прибором, регулирующим продолжительность просеивания (испытания автоматически прекращаются по истечении установленного времени).

Для опытного просеивания используются также механические грохоты «Энд-Шак» (рис. IV-24) и «Динамик» (рис. IV-25), а также некоторые электровибрационные грохоты. Последние следует применять только в тех случаях, когда не требуется проводить сравнительные испытания, так как нельзя быть уверенным в том, что они обеспечивают одинаковую интенсивность вибраций.

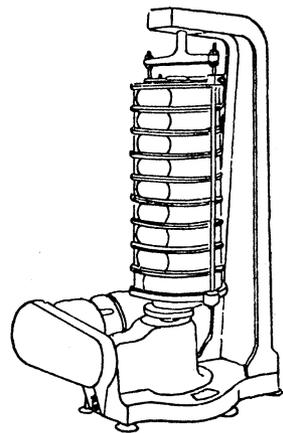


Рис. IV-25. Качающийся грохот «Динамик».

КЛАССИФИКАЦИЯ

В этом разделе рассматривается так называемая мокрая классификация, т. е. разделение твердых частиц на фракции по размерам и плотности. В основе мокрой классификации лежат методы, принципиально отличные от описанного выше метода просеивания. В результате мокрой классификации обычно получают два продукта: 1) частично осушенную фракцию, содержащую грубый, крупный материал («пески») и 2) тонкую фракцию вместе с оставшейся частью жидкости («слив»).

Исходную пульпу подают в аппарат для классификации (классификатор) с таким расчетом, чтобы твердые частицы могли непрерывно оседать и удаляться под действием силы тяжести, давления или с помощью специальных механических устройств.

Аппараты для классификации подразделяют обычно на немеханические, механические и гидравлические. Классификаторы первых двух указанных групп отличаются друг от друга только способом удаления песков. В гидравлических классификаторах разделение связано с явлением несвободного оседания, обусловленного действием воды. Эффективность этого разделения в значительной мере определяется различием скоростей оседания грубых и тонких (или тяжелых и легких) частиц в жидкости. Скорости оседания можно регулировать в определенных границах посредством слабого перемешивания (при наличии несвободного оседания) или действием центробежной силы (в центробежных аппаратах).

Из основных положений теории классификации необходимо отметить следующие:

- 1) грубые частицы имеют большую скорость оседания, чем тонкие частицы той же плотности;
- 2) тяжелые частицы имеют большую скорость оседания, чем легкие частицы того же размера;

ТАБЛИЦА IV-5

для мокрой классификации

Максимально допустимый размер частиц на линии питания, мм	Концентрация твердых частиц, %		Мощность электро- двигателей, квт	Применение
	в сливе	в песках		
6,3	5-30	35-60	...	Удаление ила, обезвоживание
1,4-0,044	5-30	55-70	См.**	Среднее и тонкое разделение при размоле в замкнутом цикле
38,1	5-30	70-83	0,736-7,36	Удаление ила при размоле в замкнутом цикле
25,4	5-30	75-83	0,37-18,4	Промывание, обезвоживание, удаление ила при размоле в замкнутом цикле
12,7	5-25	75-80	0,37-5,5 (чаша)	Разделение при размоле в замкнутом цикле
12,7	1-15	75-83	0,736-18,4 (рейка) 0,736-7,36 (чаша) 3,7-18,4 (рейка)	Извлечение тонких фракций песка, известняка, угля и фосфоритов при большой производительности
6,3	1-20	30-50	0,736-11	Тонкое разделение
6,3	1-40	10-70	11-110	Тонкое фракционирование
25,4	5-15	75-80	3,7-7,36	Удаление ила, обезвоживание большого количества песка
76,2	5-30	75-83	1,8-18,4	Разделение песка и ила, промывание при размоле с замкнутым циклом
4,75	1-10	40-60	0,736-1,47 (для воздушного дутья)	Получение нескольких продуктов с очень чистыми песками, фракционирование с узкими пределами фракций (минимальный расход воды 3 т на 1 т песка)
9,5	1-10	40-60	0,736 (для управления клапанами)	То же
25,4	1-10	40-60	...	Получение двух продуктов с очень чистыми песками, удаление ила (минимальный расход воды 2 т на 1 т песка)
12,7	5-30	75-83	2,2-7,36 (вибратор) 3,7-14,7 (рейка)	Получение двух продуктов с очень чистыми песками при низком влагосодержании, промывание (минимальный расход воды 0,5 т на 1 т песка)

Характеристика аппаратов

Группа и тип классификатора	Основные размеры, м			Производительность		Крупность разделения, мм
	ширина	диаметр	максимальная длина	т/ч	л/мин	
<i>Немеханическая группа</i>						
Конусный классификатор	.....	0,6—3,6	.....	2—100	.....	0,044—0,59
Гидроциклон	.....	0,01—1,2	2,7	.....	5680	>0,3*
<i>Механическая группа</i>						
Скребокый классификатор	0,3—3	.....	.....	5—350	.....	0,074—0,59
Реечный и спиральный классификаторы	0,3—6	.....	12	5—350	.....	0,074—0,84
Чашевый классификатор	0,45—6	1,2—2,5	12	5—200	.....	0,044—0,149
Чашевый отстойник	1,2—4,8	6—15	12	5—250	.....	0,044—0,149
Гидросепаратор	.....	3—45	.....	5—700	.....	0,044—0,149
Центрифуга-классификатор	.....	0,46—1,3	1,78	.....	38—2270	>0,074 ³ *
Промыватель песка	.....	2,1—3,3	.....	25—125	.....	0,21—0,59
Противоточный классификатор	.....	0,45—3	12	1—600	.....	0,149—0,5
<i>Гидравлическая группа</i>						
Многокамерный классификатор «Джет Сайзер»	0,45—6	.....	1,5—6	2—100	.....	0,105—2,38
Многокамерный классификатор «Супер Сorter»	1,8	.....	12	40—150	.....	0,105—2,38
Сифонный классификатор D—O	.....	0,9—9	.....	1—100	.....	0,105—1,19
Гидровибратор	1,2—3,6	1,2—4,2	12	5—250	.....	0,105—0,84

* Но не меньше 5 мм.

** Соответствует нацору 0,035—4,2 ат.

* Но не меньше 1 мм.

Вращающиеся лопасти отгребают осевший крупный материал к периферии чашевого отстойника. Отсюда выгруженный материал попадает в дренажное отделение. Длина консольной реечной конструкции в таких аппаратах обычно меньше, чем в чашевом классификаторе.

Стоимость аппарата, включая стальные резервуары и приводы, колеблется от 3500 до 4100 долл. в расчете на 1 м диаметра чаши в зависимости от производительности реечного отделения.

Гидросепаратор (рис. IV-33). Гидросепаратор представляет собой аппарат типа сгустителя-отстойника, в

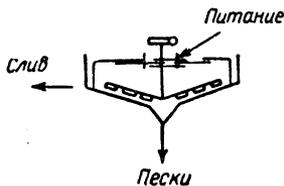


Рис. IV-33. Гидросепаратор.

который исходная смесь подается в большем количестве, чем можно осветлить на данной площади. Таким образом, в сливе здесь находятся мелкозернистые твердые частицы. Чем выше скорость движения потока на линии питания, тем более крупные твердые частицы вещества переходят в слив.

Эффективность разделения в гидросепараторе примерно такая же, как и в конусном классификаторе, но заметно ниже, чем в механических и гидравлических установках. Основное достоинство гидросепаратора — способность пропускать большие массы воды при низкой стоимости на единицу объема. Гидросепараторы применяют в основном для обезвоживания фосфоритов и силикатов вслед за мокрым разделением. При обогащении руды сепаратор используется главным образом для защиты сгустителей большого диаметра (удаляется материал крупностью $+0,21$ мм).

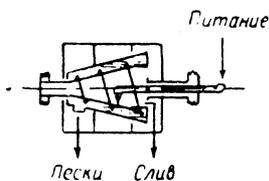


Рис. IV-34. Центрифуга-классификатор.

Стоимость аппарата колеблется от 18 до 54 долл. в расчете на 1 м² поверхности жидкости (сюда не входит стоимость резервуаров, которые могут изготовляться из стали, дерева или бетона).

Центрифуга-классификатор (рис. IV-34). В центрифуге, снабженной барабаном для классификации твердых частиц, ускорение центробежной силы превосходит ускорение силы тяжести примерно в 1800 раз. Это единственный тип центрифуги, применяемой для классификации.

В конструкции такого аппарата различают две вращающиеся части: внешнюю — барабан конической формы и внутреннюю — шнек (транспортёр в виде геликоидального винта, который вращается с несколько мень-

шей скоростью, чем конический барабан). Исходная суспензия подается через неподвижную трубу в шнек, откуда под действием центробежной силы попадает на вращающийся барабан. Жидкая масса располагается по периферии конусной оболочки большего диаметра. Отверстия для выгружаемого материала находятся ближе к оси вращения, чем отверстия для слива.

Под действием центробежной силы частицы определенных размеров осаждаются на стенке барабана, откуда транспортируются шнеком на выгрузку. Фракции слива движутся к отверстиям для выхода жидкости. Размер частиц в процессе классификации можно регулировать, изменяя скорость подачи исходной смеси и величину центробежной силы (число оборотов).

К достоинствам таких установок следует отнести высокие удельную производительность и степень разделения. Центрифуга применяется при классификации цементных мергелей и пигментов, сортировке абразивов и фракционировании реагентов.

Масса установки 13—14 т, стоимость, включая электродвигатели, 11 000—45 000 долл.

Промыватель песка (рис. IV-35). Такой аппарат имеет наклонное дно и лопасти, вращающиеся в плоскости,

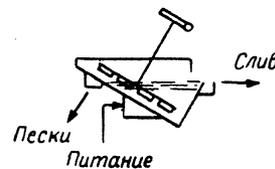


Рис. IV-35. Промыватель песка.

параллельной дну. Лопатки выгребают осаждаемый песок и выгружают его из аппарата (классификации подвергаются частицы размером 0,21—0,59 мм). Промыватель обычно применяют для удаления ила и глины из песка и песковых осадков грунтовых вод. Стоимость установки, включая привод, составляет в среднем ~2150 долл. на 1 м диаметра аппарата.

Противоточный классификатор (рис. IV-36). Такой классификатор представляет собой медленно вращающийся наклонный барабан цилиндрической формы с

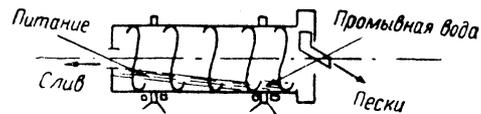


Рис. IV-36. Противоточный классификатор.

непрерывными спиральными выступами, прикрепленными к внутренней поверхности корпуса и образующими винтовые желоба. Направление вращения барабана должно быть таким, чтобы обеспечить движение материала по желобу к верхнему концу аппарата. В центре нижнего конца барабана имеется отверстие для слива. С верхним концом аппарата соединен элеватор для песков, вращающийся вместе с барабаном. Промывная вода, подаваемая у верхнего конца, перетекает спиральными выступами (барьеры) и движется противотоком по направлению к отверстию для слива.

Такой классификатор обычно применяют для разделения песка и ила. Необходимо отметить, что закрытая

ТАБЛИЦА IV-6

Характеристика речных и спиральных классификаторов

Тип классификатора	Режим работы	Основные размеры, м	Производительность при 1 ход/мин или 1 об/мин по твердому материалу ($\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$), т/ч	Масса аппарата, кг	Приблизительная стоимость аппарата на 1 м его ширины, долл.
Речной	Легкий	1,2×6,1	25	910	5400
	Средний	1,82×7,51	80	1180	5900
	Тяжелый	2,3×9,1	320	1680	8200
Спиральный	Тяжелый	∅0,91×6,1	110	4080	18000
	»	∅1,98×10,9	1130	23100	66000

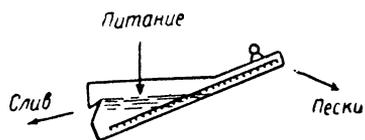


Рис. IV-29. Речной классификатор.

Речной и спиральный классификаторы (рис. IV-29 и IV-30). Классификаторы речного типа, например системы Дорра, и спиральные классификаторы, например системы Акинса, применяются для классификации уже в течение полувека. Названия «речной» и «спиральный» указывают на тип механизма, устанавливаемого в таких аппаратах с наклонным днищем. Это

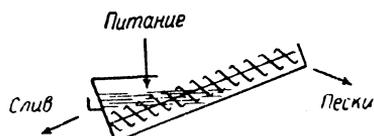


Рис. IV-30. Спиральный классификатор.

были первые классификаторы, применявшиеся в процессах дробления с замкнутым циклом. Они обладают достаточной механической прочностью и удобны в эксплуатации. В этих классификаторах удается осуществить разделение с тонной помола до 0,044 мм при пониженных скоростях загрузки. По всей вероятности, на таких аппаратах обрабатывается большее количество материалов, чем на всех других классификаторах вместе взятых.

Большое значение в речных и спиральных классификаторах имеет правильное регулирование расхода воды на процесс классификации, так как разделение на продукты (слив и пески) в значительной мере зависит от подъемной силы, вязкости и степени перемешивания.

Стоимость эксплуатации таких аппаратов, включая их установку, колеблется от 0,001 до 0,005 долл. на 1 т песков в зависимости от абразивных свойств материалов.

Сведения о речных и спиральных классификаторах приведены в табл. IV-5 и IV-6.

Чашевый классификатор (рис. IV-31). Конструкция чашевого классификатора предусматривает увеличение поверхности жидкости, необходимой для тонкого разделения в крупнотоннажных установках. Мелкая чаша с

вращающимися гребками помещается над речным или спиральным обезвоживающим отделением. Исходная смесь подается в центре чаши, а слив продукта с тонким твердым материалом производится у периферии аппарата. Грубый твердый материал, собираемый на дне чаши, подается к центру для выгрузки в обезвоживающее отделение, куда противотоком можно добавлять промывную воду.

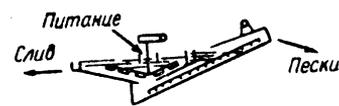


Рис. IV-31. Чашевый классификатор.

Чашевые классификаторы в значительной мере вытеснены жидкостными циклонами, для которых требуются более низкие капитальные затраты и меньшая площадь. Однако для получения осушенных песков (например, в рудообогатительной практике) их применяют и в настоящее время. Стоимость одного аппарата, включая баки и приводы, составляет ~3300—5000 долл. на каждый метр диаметра чаши, в зависимости от производительности речного отделения.



Рис. IV-32. Чашевый отстойник.

Чашевый отстойник (рис. IV-32). Этот аппарат обеспечивает гораздо большую поверхность жидкости, чем чашевый классификатор, размеры которого ограничены со стороны речного или спирального отделения. Чашевые отстойники используются для тонкого разделения в высокопроизводительных установках. Производительность речного отделения отстойника такого типа может изменяться в зависимости от условий разделения.

РАЗДЕЛЕНИЕ В ПЛОТНЫХ СРЕДАХ

Процесс разделения в плотных средах используется для обогащения многих минералов. Специально приготовленная жидкая суспензия с тонко распределенным твердым веществом повышенной плотности может обеспечить стабильную ванну для разделения. Применялось много различных твердых материалов для получения среды с высокой плотностью, но наибольшее распространение получили магнитные материалы — ферросилиций и магнетит. Эти два материала, отдельно или в сочетании, могут дать плотную среду с относительной плотностью $d_4^t = 1,25 \div 3,4$. Относительная плотность специально приготовленной среды с ферросилицием, частицы которого имеют сфероидальную форму, может достигать 3,7. Плотную среду можно использовать для обогащения любой руды, в которой плотность ценного компонента заметно отличается от плотности породы.

На установках, использующих плотную среду для грубого разделения руды, нижний предел размеров частиц питания из плотной среды составляет 1,7 мм, верхний — 305 мм.

Плотность магнитных сред выбирают в зависимости от индивидуальных характеристик руды. Относительная плотность применяемых в промышленности магнитных сред $d_4^t < 2,2$. Для области $d_4^t = 2,2 \div 2,9$ используют среду со смесью магнетита и ферросилиция, а при $d_4^t > 2,85$ — среду с ферросилицием. При $d_4^t > 3,4$ успешно применяют среду со сфероидальными частицами ферросилиция.

Процессы разделения с помощью плотных сред позволяют:

- 1) отсортировать пустую породу от концентрата для дальнейшего концентрирования;
- 2) получить концентрат и отсортированную пустую породу;
- 3) получить концентрат и низкосортные отходы для дополнительной обработки;
- 4) получить готовый концентрат, отходы и промежуточный концентрат, подвергаемый затем дополнительной обработке.

Работа установки, использующей плотную среду

Прежде всего следует отметить, что ил и мелочь нежелательны при разделении в плотной среде, так как в их присутствии среда разбавляется и вязкость ее увеличивается. Перед разделением ил необходимо удалять.

На рис. IV-41 приведена технологическая схема установки для очистки угля с использованием плотной среды. Для предварительной обработки исходный материал подают на сито 1, где происходит удаление мелочи и смачивание продукта. Избыточная вода испаряется стечь по этому сити до того, как материал поступит в аппарат 2, заполняемый средой с заранее подобранной плотностью. Материал, способный всплыть, поднимается к поверхности среды, переливается через порог и подается на сито 3. Тонущий материал удаляется выше поверхности среды транспортером 4. Плотную среду непрерывно подают из циркуляционного сосуда 5 и сборника 6. Всплывающие и тонущие продукты подают на разделительные промывочные сита 3 и 7 или (на некоторых небольших установках) в перегороденные отделения обычного промывочного сита.

Продукты сначала промывают рециркуляционной промывной водой и затем — струями свежей воды. Для продуктов с размером частиц +12,7 мм обычно требуется ~ 3,79 л/мин промывочной воды на 1 т/ч промываемого продукта и до 7,6 л/мин на 1 т/ч для материала с размером +1,7 мм. Разделенные продукты обезвоживаются на соответствующих ситах.

Среда, отмытая от продуктов на ситах 3 и 7, разбавляется водой настолько, что ее нельзя возвращать сразу же в разделительный резервуар. Поэтому разбавленную среду собирают в сборнике 8 и затем перекачивают насосом 9 в питающий бак барабанного сепаратора 10, снабженного постоянным магнитом и используемого для восстановления среды. Восстановленную среду возвращают через размагничивающую катушку 11 в сборник плотной среды 6. Поступающий с магнитного сепаратора магнитный концентрат обладает достаточно высокой плотностью и может быть направлен непосредственно в сборник. Отходы с сепаратора (хвосты) и слив можно использовать для промывки на сите 1. Для сохранения воды используют отстойники (или циклоны) 12, позволяющие осветлить воду, выходящую из-под сита 1. Осветленную воду вновь подают в цикл на промывные желоба насосом 13. Если промывную воду не удастся достаточно осветлить в отстойнике или циклоне, можно использовать сгустители.

Производительность разделительной установки с плотной средой ~ 100 т/ч угольного сырья на 1 м ширины аппарата при крупности питающего материала +6,3 мм. Разделительные аппараты других типов могут иметь такую же или иную производительность, номинальные значения которой зависят от характеристик руды. Оптимальная выше разделительная установка рассчитана на максимальный размер частиц до 300 мм (обычный их размер 75—150 мм).

Для обеспечения достаточно высокой эффективности процесса подача в разделительную установку большого количества материала с малым классом крупности или первоначально классифицированного (крупность ~ 3 мм) должна производиться при пониженных скоростях. В случае разделения угля крупностью 3—75 мм следует работать при подаче материала не более 66 т/ч на 1 м ширины разделительного аппарата (предполагается, что 50% материала имеет крупность 3—6 мм). При питании тонкими материалами увеличивается количество вспомогательных устройств для разделительного аппарата.

Так как плотность частиц тяжелых и легких фракций отличается от плотности рабочей среды в разделительном баке, то так называемая неэффективность разделения, измеряемая как масса случайно попавших частиц, уменьшается. Анализ тонущего и плавающего продуктов показывает обычно одинаковое процентное содержание случайно попавших частиц (~ 0,9%) при относительной плотности 1,342. В этом случае количество случайно попавших частиц в обоих продуктах составляет 0,9% и эффективность разделения равна 99,1%. При обработке угля крупностью +12,7 мм при отмеченных выше условиях эффективность разделения составляет 99,5%. Эффективность уменьшается до 98% для угля крупностью +3,2 мм.

В эксплуатационные расходы разделительной установки следует включить затраты, связанные с ее обслуживанием одним аппаратчиком и потреблением энергии насосами, ситами и т. д., а также затраты на восстановление потерь магнитной среды (0,14—0,45 кг магнетита на 1 т обрабатываемого угля). Стоимость такой установки (без оборудования для предварительного

конструкция аппарата позволяет ограничить потери тепла и продуктов химического взаимодействия (дымов). Масса аппарата 450—48 000 кг. Приблизительная стоимость установки, включая приводы, колеблется от 1,25 до 3,8 долл. на 1 кг массы.

Гидравлические классификаторы

Многокамерный классификатор (рис. IV-37 и IV-38). Классификатор такого типа относится к аппаратам, использующим несвободное оседание частиц в процессе отстаивания.

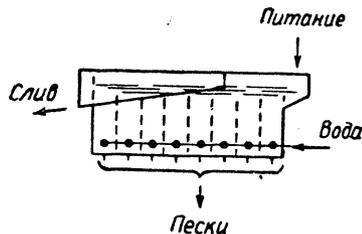


Рис. IV-37. Многокамерный классификатор «Джет Сайзер»

Отдельные камеры аппарата располагаются так, чтобы обеспечить последовательный переток жидкости по мере ступенчатой классификации. Количество воды должно быть таким, чтобы в каждой последующей камере наиболее крупные частицы удерживались в состоянии несвободного оседания, а более мелкие частицы (тонкие фракции) проходили дальше для аналогичной обработки. Обычно две камеры захватывают 90%

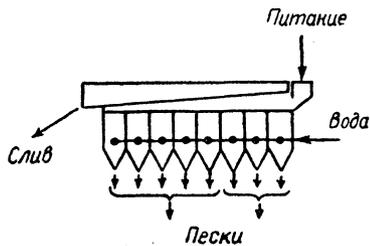


Рис. IV-38. Многокамерный классификатор «Супер Сorter».

фракции, соответствующей размерам двух сит. Выгрузку регулируют посредством специальных клапанов (пневматических или механических), приводимых в действие электродвигателем. Фракции несков можно отбирать из каждой камеры отдельно или из нескольких камер одновременно.

Многокамерные классификаторы применяют для тщательной сортировки кварцевого песка, фосфоритной руды, абразивов и других веществ.

Приблизительная стоимость аппарата — 1500 долл. за камеру.

Сифонный классификатор D — O (рис. IV-39). Это высокоэффективный гидравлический аппарат, созданный первоначально для промывания и сортировки фосфоритов. При обогащении руды в таком аппарате обычно получают два продукта, но при использовании колонны, перекрытой сверху и открытой снизу, можно получить три продукта: грубую, промежуточную и тон-

кую фракции. Для обеспечения несвободного оседания частиц в аппарат снизу подают воду. Пески содержат достаточно крупные частицы. Тонкие фракции уходят на слив или, если в установке необходимо получить три продукта, поступают в колонну. Пески выгружаются с помощью сифонов, опущенных в нижнюю зону несвободного оседания. Регулирование действия сифона

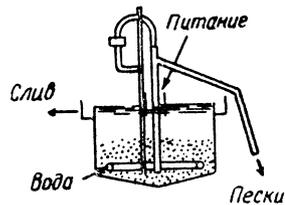


Рис. IV-39. Сифонный классификатор D — O.

осуществляется гидростатически управляемым клапаном, который может включать и выключать сифон в зависимости от состояния зоны суспендирования. Промежуточную фракцию из колонны отводят с помощью дополнительных сифонов. В таких аппаратах потребляется значительно меньше воды, чем в многокамерных классификаторах.

Средняя стоимость установки, включая стальные резервуары, составляет ~2300 долл. на 1 м диаметра.

Гидровибратор (рис. IV-40). В гидровибраторе сочетается гидравлическое действие воды с механической вибрацией. Это позволяет снизить расход воды на разделение. Используя такой аппарат, можно получить

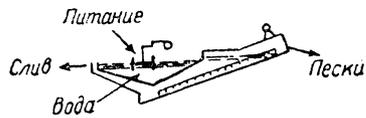


Рис. IV-40. Гидровибратор.

пески, исключительно чистые и значительно лучше осущенные, чем в других гидравлических установках.

Внешне гидровибратор напоминает чашевый классификатор. Однако внутри него находится вибрирующая пластина, почти равная по диаметру чаше. Эта пластина перфорирована, вследствие чего вода, проходящая через осевший материал, может перетекать вверх, вызывая состояние полунесвободного оседания в движущемся слое. Слив удаляется через порог, а пески проходят под порогом в наклонное отделение для обезвоживания.

Прежде гидровибратор использовался в установках для измельчения медных и железных руд с замкнутым циклом, но в последнее время его стали применять для промывания и сортировки фосфоритов в установках с открытым циклом.

Стоимость гидровибратора, включая резервуары и приводы, в среднем составляет ~9200 долл. на 1 м диаметра чаши.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Taggart, Handbook of Mineral Dressing, New York, 1953.
 Richards, Locke, Textbook of Ore Dressing, New York, 1940.
 Gaudin, Principles of Mineral Dressing, New York, 1939.
 Fitch, Johnson, Operating Behavior of Liquid-Solid Cyclones, Min. Eng. (March 1953).
 Dahistrom, Chem. Eng. Progr., Symp. Ser., 15, 41 (1951).

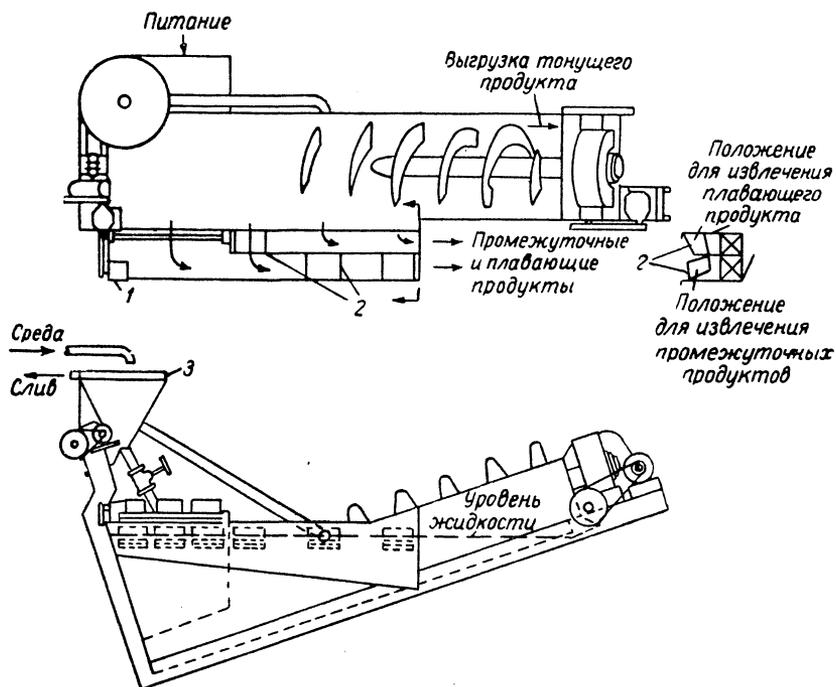


Рис. IV-42. Модифицированный аппарат спирального типа для разделения материалов с использованием плотной среды:

1 — механизм для снятия плавающего продукта; 2 — селективные желоба; 3 — бак для среды с постоянным напором.

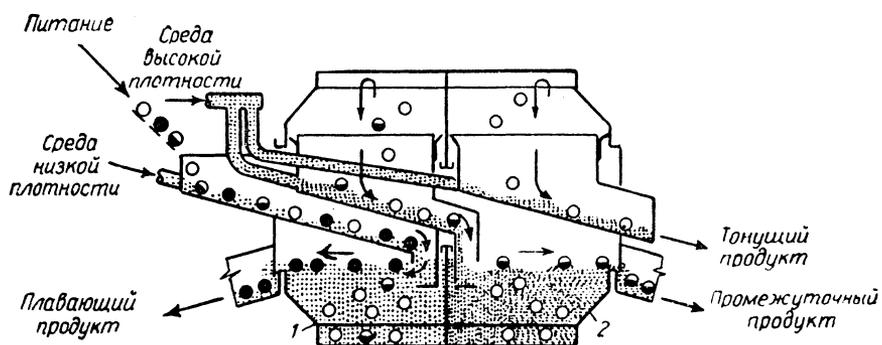


Рис. IV-43. Вращающийся аппарат барабанного типа для разделения материалов с использованием плотной среды:

1 — камера со средой низкой плотности; 2 — камера со средой высокой плотности.
Обозначения материала: ● — плавающий; ◐ — промежуточный; ○ — тонущий.

сухого просеивания и без загрузочных приспособлений) составляет 800—1500 долл. на 1 т/ч (для установок производительностью от 100 до 400 т/ч).

Типы разделительных аппаратов (сосудов)

При работе с плотной средой наибольшее применение нашли разделительные аппараты трех основных

имеет вихревой приемник 3, который препятствует короткой циркуляции внутри циклона. Разделение происходит в конической части 4 под действием центробежных и центростремительных сил. Более тяжелый материал выходит из циклонного сепаратора через нижнее отверстие 5, а более легкий материал — через верхнее отверстие 6.

На четкость отделения минерала от породы влияют следующие факторы: 1) плотность и чистота среды;

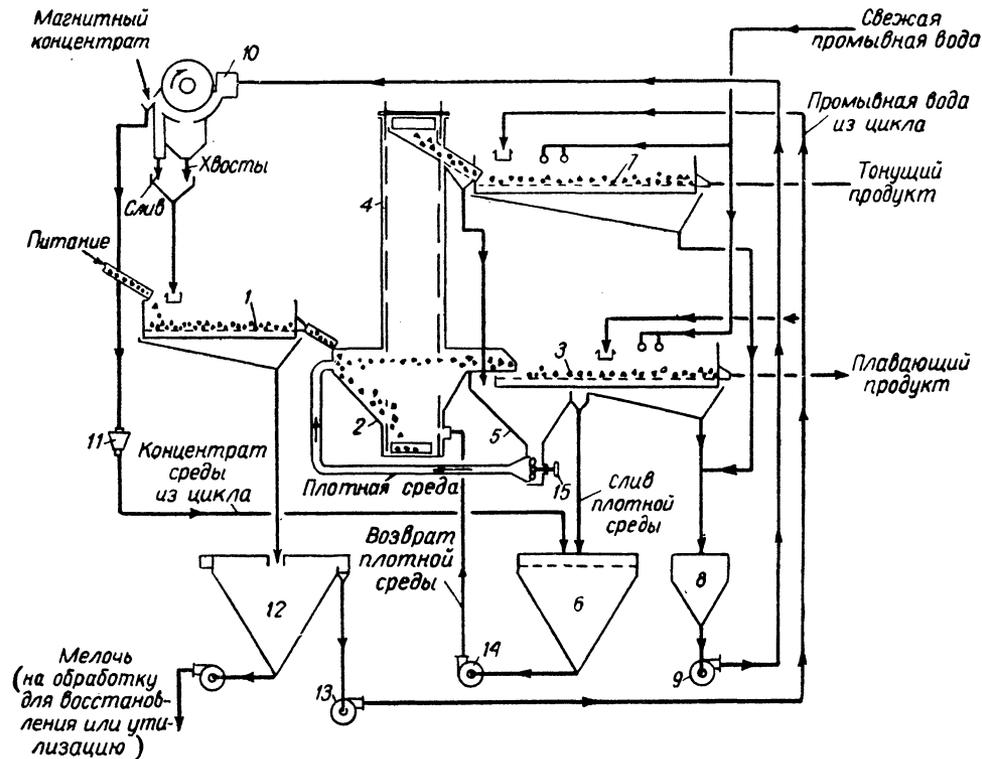


Рис. IV-41. Технологическая схема установки для очистки угля с использованием плотной среды:

1 — сито для предварительной обработки; 2 — аппарат для разделения; 3 — сито для осушки и промывки легкого материала; 4 — транспортер для тяжелого (тонущего) материала; 5 — циркуляционный сосуд; 6 — сборник плотной среды; 7 — сито для промывки тяжелого материала; 8 — сборник разбавленной среды; 9 — насос для разбавленной среды; 10 — магнитный сепаратор; 11 — размагничивающая катушка; 12 — отстойник (или циклон); 13 — насос для промывной воды из цикла; 14 — насос для плотной среды; 15 — циркуляционный насос низкого давления.

типов: модифицированный классификатор спирального типа (рис. IV-42); вращающийся аппарат барабанного типа (рис. IV-43); аппарат скребкового типа (рис. IV-44).

Аппараты спирального и барабанного типа широко используются при обработке железных руд. Аппарат со скребками применяется для обработки угля.

Тонкая очистка в циклонных сепараторах с плотной средой

Обрабатываемый материал, превращенный в пульпу вместе со средой, подается в циклонный сепаратор (рис. IV-45) тангенциально по трубе 1. Цилиндрическая часть 2 аппарата, в которую поступает пульпа,

2) размеры внутренних отверстий в циклонном сепараторе (у ввода питания, у вершины и у вихревого приемника), 3) давление, при котором пульпа подается в циклон.

Угол конуса у циклонных сепараторов с плотной средой, используемых в установках для разделения железной руды, составляет $\sim 40^\circ$. Обычно применяются малые конусы диаметром 250—300 мм.

Циклонные сепараторы с плотной средой в основном работают при избыточных давлениях 0,85—2,5 ат. Применение более высоких давлений позволяет увеличить производительность, но при этом ускоряется износ аппарата. Время пребывания частиц руды в циклонном сепараторе очень мало, поэтому на 1 т руды, подаваемую в циклон, приходится сравнительно большой объем

мер, отсадочная машина Гарца), ко второму — машины с ситами, движущимися в резервуаре с водой (например, машина Ханкока).

Одной из новых конструкций отсадочных машин с неподвижным ситом является отсадочная машина Джеффри, широко применяемая при обработке угля.

С 1950 г. для концентрирования таких материалов, как железные и баритные руды, и для удаления примесей (например, древесных и глинистых) из песка и гравия широко используют отсадочную машину «Вемко-Ремер». Особенность этой машины состоит в том, что на основное движение сит (ход 9,5 мм при 150 об/мин) накладывается вторичное движение с частотой 400 ходов в минуту. Отсадочные машины Ханкока, в которых сито движется вверх и вниз, в настоящее время используются относительно редко.

Широкое применение находят также высокоскоростная отсадочная машина «Денвер», выполненная целиком из стали и состоящая из двух отсеков с диафрагмами. Эту машину иногда применяют в размольном цикле на рудниках для восстановления тяжелых минералов, но в основном ее применяют для обработки золотоносных, вольфрамовых и хромовых руд.

При обработке угля на отсадочных машинах его подают, не отсортировав предварительно по размерам (крупностью примерно до 175 мм).

В практике размола металлических руд отсадку редко используют для материалов, размер которых превышает 19 мм. Отсадку при концентрировании металлических руд крупностью от —76,2 до +12,7 мм вытесняют другие методы разделения. Считается, что качающиеся столы эффективнее отсадочных машин при обработке руд тоньше 2 мм. На некоторых заводах отсадочные машины применяют из-за сравнительной простоты технологической схемы, позволяющей обрабатывать материалы в широком диапазоне размеров.

Производительность отсадочных машин

Отсадочная машина Джеффри-Баума может обработать ~32 т/ч угля крупностью —100 мм на 1 м² активной площади сита. Для тонких углей производительность уменьшается.

Стандартная отсадочная машина «Вемко-Ремер» (1,5×4,8 м) обрабатывает от 30 до 45 т/ч железной руды крупностью —9,5 мм. Производительность отсадочной машины Кули (вариант отсадочной машины Гарца), состоящей из 6 отделений размером 1,06×1,21 м, составляет 25—30 т/ч цинковой руды крупностью —12,7 мм.

Расход энергии и воды при отсадке

Расход энергии в процессе отсадки зависит от ряда величин и прежде всего от размеров обрабатываемого материала, глубины слоя, площади сита (живого его сечения), числа ходов в единицу времени и т. д. Энергия, потребляемая отсадочными машинами плунжерного типа при обработке материала крупностью —12,7 мм, составляет ~0,8 квт на 1 м² поверхности сита отсадочной машины.

На отсадочную машину Гарца необходимо подавать от 5700 до 9500 л воды на 1 т обрабатываемого материала. Расход воды для обработки железной руды крупностью —9,5 мм в цикле с отсадочной машиной «Вемко-Ремер» составляет ~4500 л воды на 1 т обрабатываемого материала.

Стоимость отсадки

Стоимость отсадки зависит от природы и размера обрабатываемого материала, от числа стадий отсадки, а также от производительности установки. На крупнотоннажных заводах, обрабатывающих уголь и железную руду, стоимость отсадки составляет от 0,04 до 0,15 долл. за 1 т материала, поступающего на переработку.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Taggart, Handbook of Mineral Dressing, New York, 1953.
 The Mechanism of Jigging, Mining Technol., March 1943.
 Kirchberg, Hentzschel, A Study of the Behavior of Particles in Jigging, Trans. Intern. Mineral Dressing Congr., 1957.
 Marincel, Use of Jiggs in the Concentration of Iron Ores, 14th Annual Mining Symposium, University of Minnesota, Minneapolis, 1953.
 Bogert, Fine Coal Cleaning with the Feldspar Jig, Mining Congr. J., July 1960.

ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ НА КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ СТОЛАХ

Мокрые столы

Для разделения различных материалов могут использоваться так называемые мокрые концентрационные столы, т. е. аппараты, позволяющие концентрировать материал в движущейся струе воды на плоской рифленной поверхности, слегка наклоненной к горизонту и встряхиваемой в направлении оси. Эффективность разделения зависит главным образом от различия в плотностях твердых частиц и в меньшей степени — от формы и размера частиц.

Процесс обработки на столах лучше всего проходит при концентрировании руды и угля, для которых характерно значительное различие между плотностями ценного продукта и отходов. Достаточно эффективно на столах обрабатывают металлическую руду с размерами частиц 6—150 мм. Столы можно также применять для обработки более легких материалов (таких, как уголь) со значительно большими размерами. Качающиеся столы впервые были созданы в 1896 г. Вильфлемом для концентрирования металлических руд. Максимальное их использование совпало с постройкой первых флотационных установок (приблизительно в 1914 г.). Разделение на концентрационных столах оказалось наиболее удачным в тех случаях, когда обрабатываемый материал содержит только один ценный продукт (независимо от размеров частиц), по плотности значительно отличающийся от отходов. Флотацию применяют для обработки сложных руд, содержащих несколько ценных минералов и требующих тонкого размола при небольшой разнице в плотностях минералов.

Поступающие на концентрационный стол тяжелые частицы подвергаются действию движущейся воды в меньшей мере, чем более легкие частицы. Тяжелые частицы собираются в канавках (рифлях), вдоль которых они движутся к концу стола. Более легкие частицы проходят над тяжелыми минералами и смываются поверх канавок к нижней стороне стола, где расположены желоба для улавливания различных продуктов по мере их выгрузки. Эти желоба снабжены подвижными приспособлениями для отделения концентратов от промежуточных продуктов и промежуточных продуктов — от хвостов. Таким способом можно осуществить быстрое регулирование при изменении скорости и сорта обрабатываемого материала.

циркулирующей среды. Потери среды в циклонных установках выше, чем в установках для разделения крупной руды. В первом случае они составляют 2,2—

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Taggart, Handbook of Mineral Dressing, New York, 1945.
Mitchell, Coal Preparation, AIME, New York, 1950.

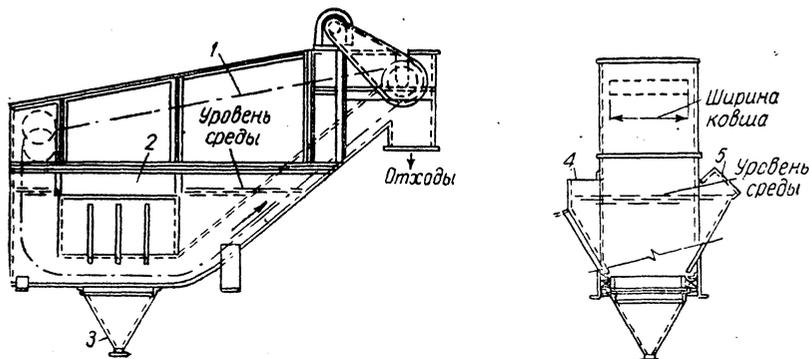


Рис. IV-44. Аппарат скребкового типа для разделения материала с использованием плотной среды:

1 — ковшевой транспортер; 2 — отверстия (шлюз); 3 — спускной патрубок; 4 — шлюз для выпуска; 5 — шлюз для впуска.

4,5 кг, во втором 0,22—0,66 кг на 1 т обрабатываемой руды. Два циклонных сепаратора с диаметром 250 мм

Lowc, Heavy Density Froth Sheets, Mining Congr. J., June, 1957.

ОТСАДКА

Отсадка — это механический метод разделения материалов по их плотности (удельному весу) в пульсирующем потоке жидкости, проходящей через слой материала в так называемых отсадочных машинах. При пульсации жидкость заставляет тяжелый материал двигаться вниз, а более легкий — подниматься вверх, в результате чего каждый продукт выводится раздельно.

Обогащение в отсадочных машинах является одним из старейших процессов, используемых для отделения концентрированных тяжелых минералов от более легкой пустой породы или для отделения концентрата (например угля) от его более тяжелых примесей. Отсадочные машины сравнительно просты. Их можно изготовить на месте при сравнительно низких экономических затратах. Следует отметить, что потребление энергии и воды, а также потери металлической руды в хвостах при отсадке обычно велики. Это накладывает определенные ограничения на использование отсадочных машин в процессах обогащения. Тем не менее, такие машины широко используются для обогащения (концентрирования) угля. Например, в США на отсадочных машинах ежегодно концентрируют свыше 50 млн. т угля. В меньшей степени их применяют для обработки свинцово-цинковых, железных и некоторых тяжелых неметаллических руд. Высокоскоростные отсадочные машины широко используют при извлечении ценных материалов на золотых приисках и олова из залежей вольфрама, а также для восстановления некоторой части ценных металлических материалов, выделенных при размоле шаровыми мельницами. Во многих случаях обогащение в отсадочных машинах вытеснено процессом флотации (часто с предварительным тонким помолом).

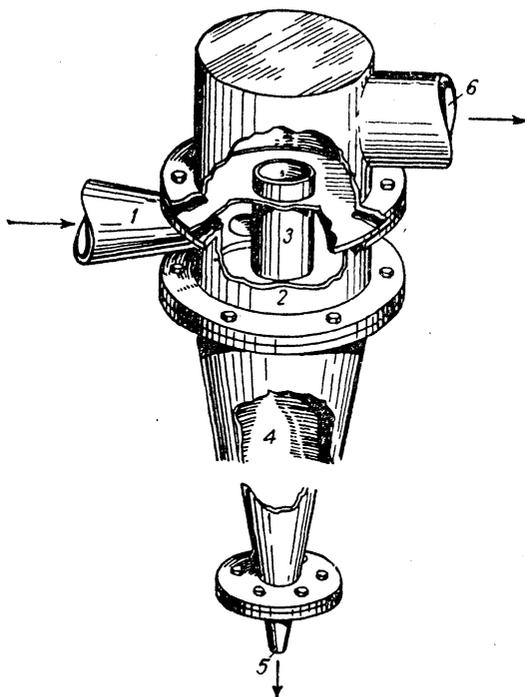


Рис. IV-45. Циклонный сепаратор:

1 — труба; 2 — цилиндрическая часть; 3 — вихревой приемник; 4 — коническая часть; 5 — нижнее отверстие; 6 — верхнее отверстие.

Типы отсадочных машин

Отсадочные машины разделяют на два основных типа. К первому из них относятся машины с неподвижными ситами и движением воды через сетки (напри-

могут обработать свыше 100 т/ч материала крупностью —6,3 мм на линии питания.

На столы подают как сортированный, так и не сортированный материал. Для обработки угольной мелочи, например, используют гидроциклоны, позволяющие удалить ил из материала и получить нижний продукт (около 40% твердого вещества), идущий на питание стола.

Разделение на концентрационных столах — сравнительно дешевый процесс: на больших установках затраты составляют ~0,02—0,06 долл. на 1 т исходного материала. Если питание равномерное, то одному человеку удается обслужить сразу несколько столов. Например, на столах с составными деками один аппаратчик может обрабатывать до 1200 т/ч угля. При обработке свинца и цинка аппаратчик может наблюдать сразу за 50 столами, общая производительность которых 200 т/ч. Потребление энергии и эксплуатационные расходы при обработке материала на концентрационных столах сравнительно низки. Стоимость стола, включая опоры и желоба, составляет от 6000 до 8000 долл. на одну деку.

Сухие столы

Концентрирование материалов можно провести на так называемых сухих столах, например, на столах Суттона и Стиле. Сухие столы движутся (качаются) подобно мокрым, но в них вместо воды в качестве распределяющей среды используется воздух (воздушное дутье через перфорированную деку). Такие столы применяют в тех случаях, когда желательно обрабатывать материал в сухом состоянии или когда вода достаточно дефицитна. Сухие столы как бы дополняют аппаратуру других немокрых методов концентрирования, таких как электростатический и электромагнитный. Преимуществом сухих столов является их способность обрабатывать более крупные материалы, чем это можно сделать на большинстве мокрых столов. Например, можно обрабатывать руды с крупностью примерно до 6,4 мм, а уголь — до 76 мм. Чтобы получить хорошие результаты на сухих столах, необходима тонкая сортировка. В последнее время сделаны попытки усовершенствования сухих методов сортировки тонких материалов.

Сухие столы используются для разделения многих минералов. Наиболее широко их применяют при переработке угля, вольфрамовых и медных руд, а также для очистки волокна, древесины, кофе, сахарного тростника и т. д. и сортировки карбида кремния по форме частиц.

Агломерационное концентрирование на столах

Агломерационным концентрированием на столах называют такой процесс, в котором создается селективная флокуляция или агломерация частиц посредством добавления какого-нибудь агломерирующего агента в кондиционере или в цикле шаровой мельницы. Полученную смесь, содержащую агломерированные частицы, обрабатывают на концентрационных столах. Крупные агломерированные частицы хлонуевидного строения, поверхность которых покрыта масляной пленкой, смываются через край стола поперечным потоком жидкости, а отдельные частицы сходят на выгрузочном конце. Покрытая масляной пленкой частица стремится всплыть на поверхность жидкости и поэтому уносится через край стола более легко, чем не покрытая пленкой частица. Агломерационное концентрирование широко применяется при обогащении фосфоритов. Проведены

также успешные опыты по использованию его для обогащения известняка, поташа и слюды. Агломерационное концентрирование применимо к материалам, более крупным (от 0,15 до 1,7 мм), чем обогащаемые путем флотации ($\geq 0,3$ мм). Лучшие результаты можно получить, если материал предварительно освободить от шлама и кондиционировать с агломерирующими реагентами при высоком процентном содержании твердой фазы ($\geq 65\%$). Для избирательного покрытия пленкой минерала, подлежащего агломерации, используют специальные вещества. При обработке фосфоритов и известняка в качестве такого вещества обычно берут дешевую жирную кислоту, при обработке поташа — аммины.

Приведем данные об агломерационном концентрировании на столах в процессах обработки фосфатов и поташа:

Номер стола (с диагональной декой)	6
Крупность частиц	0,3—1,7 мм
Производительность по питанию . .	2,5—3,5 т/ч
Скорость	295 об/мин
Ход	25,4 мм
Расход воды:	
с материалом	75,7—151,4 л/мин
для обогащения	30,3—56,8 л/мин
Приблизительный размер деки . . .	1950×4300 мм

Агломерационное концентрирование с успехом применяется при обогащении простых руд. Оно имеет некоторые преимущества перед обычной обработкой на столах в том случае, когда разница в плотностях двух минералов так мала, что одним гравитационным методом нельзя добиться эффективного разделения. Столы с агломерированным питанием имеют значительно большую производительность, чем столы с необработанным исходным материалом.

Использование пленкообразующих веществ в процессе агломерационного концентрирования связано с дополнительными экономическими затратами. Остаточная на продукте масляная пленка обычно нежелательна и поэтому должна быть выжжена.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Taggart, Handbook of Mineral Dressing, New York, 1953. — Kirchberg, Berger, Trans. Intern. Mineral Processing Congr., London, 1960. — Taggart, Lechmere-Oertel, Elements of Operation of the Pneumatic Table, Am. Inst. Mech. Engrs Tech. Publ., 196, 1929. — Dickson, Trepp, Nichols, Eng. Mining J., 160, 4 (1959). — Anon., Linka Mill Added to Nevada WO₃ Output, Mining World, June 1956. — McLead, Tungsten Milling and Current Metallurgy at Canadian Exploration Limited, Canad. Mining Met. Bull., March, 1957. — Anon., Automation Keys Two Stage Precision Washing at Moss, № 3, Coal Age, April 1959. — Anon., Upgrading Fragile Coal to Premium Metallurgical Product, Coal Age, Sept. 1959. — Stahl, Milling Practice of the St. Joseph Lead Co., Mining Technol., May 1943. — Mitchell, The Recovery of Pyrite from Coal Mine Refuse, Mining Technol., July 1944. — Burdick, Beneficiation of Scheelite Ores by Gravity Concentration, Mining Technol., Nov. 1942. — Ralston, Flotation and Agglomerate Concentration of Non-metallic Minerals, US Bur. Mines Rept Invest. 3397, p. 42, May 1938. — Diener, Clemmer, Cooke, Beneficiating Cement Raw Materials by Agglomeration and Tabling, US Bur. Mines Rept Invest. 3247, 1935. — Coghill, DeVaney, Clemmer, Cooke, Concentration of Potash Ores of Carisbad, N. M., by Ore Dressing Methods, US Bur. Mines Rept Invest. 3271, 1935. — Selective Oiling and Table Concentration of Phosphatic Sands in the Sand Pebble District of Florida, US Bur. Mines. Rept Invest. 3195, 1932. — O'Meara, Norman, Hammond, Bull. Am. Ceram. Soc., 18, 286 (1939). — Norman, O'Meara, US Bur. Mines Rept Invest. 3558, 1941.

На концентрационных столах за один проход редко удается получить четкое разделение материала на концентрат и хвосты. Некоторое количество промежуточного материала почти всегда присутствует в виде слоя между этими продуктами. Обычно такие промежуточные продукты возвращают (с дополнительным размолом или без него) на начальную стадию цикла для новой переработки. Количество рециркулирующего промежуточного продукта может составлять до 25% от массы подаваемого на стол материала.

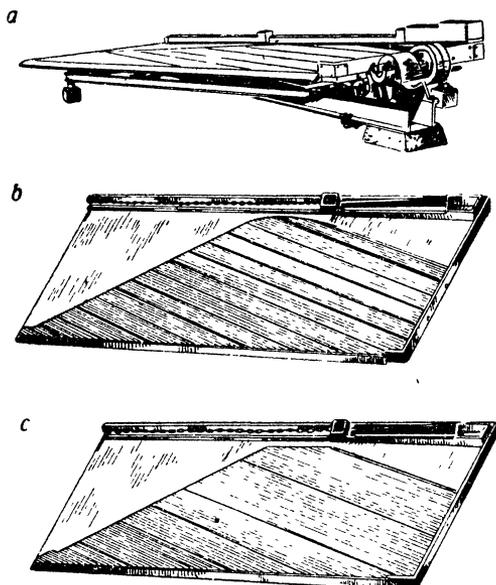


Рис. IV-46. Стол с диагональной деккой Дейстера-Оверстрома:

a — общий вид; *b* — диагональная дека с рифлением для песка, *c* — диагональная дека с рифлением для ила и мелкого песка.

Обычно столы покрывают тяжелым линолеумом или резиной. Канавки делают из сосны или полос резины. Ширина таких канавок ~9,5 мм. Они скошены от начала стола, куда подается исходный материал, к кон-

цу его, откуда продукт выгружается. Если стол предназначен для концентрирования крупного материала (-2,4 мм) канавки могут иметь высоту до 25,4 мм со стороны подачи материала. При разделении тонкого материала высота канавок на входе его не превосходит, как правило, 6 мм. Обычно используется наилучший для данного процесса разделения тип рифления стола. Распространенные виды рифления показаны на рис IV-46.

Когда на концентрационных столах нужно получить возможно более чистый концентрат, часть деки по диагонали в верхнем углу со стороны выгрузки оставляют нерифленой. Эта площадь деки известна под названием очистительной. Если необходимо получить только грубый концентрат и конечные хвосты, то увеличивают площадь рифления (это делают на многих заводах). Столы оборудованы регулируемым поворотным приспособлениями, позволяющими менять поперечный наклон. Дека изменяет направление своего движения с максимальным изменением скорости у одного конца хода. Быстрота возврата деки определяет движение материала в сторону выгрузки. Длину хода можно регулировать. Для материала грубого помола требуется ход большей длины (от 30,5 мм), чем для материала тонкого помола (до 12,7 мм). В настоящее время столы работают при значительно более высоких скоростях, чем раньше, причем скорости изменяются от 270 до 350 ходов в минуту.

В современной практике разделения на столах используют составные деки. Столы, состоящие из двух или трех дек, в свою очередь позволяют уменьшить производственные площади пропорционально числу используемых дек. Такие столы не требуют тяжелых опор, так как они поддерживаются подвесной монтажной арматурой. Использование составных столов позволяет уменьшить капитальные затраты (требуется всего один электродвигатель, а трубопроводов и желобов меньше, чем для установок с одной деккой). Основные данные для стандартных столов с одной деккой приведены в табл. IV-7.

Мощность электродвигателя для большого стола № 7 составляет 1,1 квт, для стола № 6 0,735 квт на одну декку.

Для правильной работы стола очень важно обеспечить равномерную подачу материала (не только по количеству материала, но и по его физическим свойствам). Наибольшие затруднения при эксплуатации вызывает неравномерная подача материала.

ТАБЛИЦА IV-7

Характеристика концентрационных столов с диагональной деккой

Номер стола	Питание	Крупность частиц, мм	Производительность по питанию, т/ч	Скорость, об/мин	Ход, мм	Расход воды, л/мин		Приблизительный размер деки, мм	
						с материалом	для обогащения		
6	Руда	До 0,42	2,0—10,0	275	31,7	113,6—568	37,8—378	1950×4300	
		0,1—0,42	1,0—2,5	285	19	60,6—151,4	18,9—75,6		
		—0,1	0,25—1,0	300	12,7	11,3—45,4	11,3—37,8		
7	Уголь	38,1	15,0—25,0	270	31,7	473—794	208—340		2250×5400
		19	10,0—15,0	280	25,4	227—321	75,6—132		
		12,7	7,5—12,0	285	25,4	158—245	68—117		
		3,2	5,0—7,5	290	19	102—158	45,4—68		
		1,6	3,0—5,0	290	19	66,7—106	31—15,4		

Пластинчатые магниты. Куски железа удаляются из массы твердого вещества с помощью намагниченной плиты при прохождении потока материала по наклонному желобу, причем пластину необходимо периодически очищать. Наклонные желоба рекомендуется устанавливать под углом 45° , а намагниченную пластину располагать при входе материала, пока скорость его движения мала.

Решетчатые магниты. Решетчатый магнит, состоящий из ряда намагниченных полос, применяется для удаления как крупных, так и мелких железных примесей. Примеси собираются на решетке, которая периодически очищается. Материал подается сверху вниз и проходит сквозь решетку. Обычно прутья решетки имеют 2,5 см в диаметре и располагаются на расстоянии между центрами 5 см.

Детекторы. В тех случаях, когда магнит не действует на металл, его обнаруживают с помощью электронных детекторов. Существуют также и магнитные детекторы; их применяют, когда нельзя установить сепаратор для удаления крупных примесей.

Магнитные сепараторы для обогащения и очистки

Существуют специальные конструкции для обогащения и для очистки твердых веществ.

Магнитные сепараторы для обогащения и очистки изготавливаются двух типов — мокрые и сухие.

Мокрые магнитные сепараторы. Обычно применяются барабанные сепараторы с постоянным магнитом и с электромагнитом или фильтры с постоянным магнитом и с электромагнитом. Мокрые барабанные сепараторы используются для извлечения частиц из плотной среды при обогащении магнитных железных руд. Магнитные фильтры обычно применяются для удаления тонких магнитных частиц из жидкостей или жидких суспензий. У мокрых магнитных барабанов предусматривается непрерывная разгрузка магнитов, тогда как магнитные фильтры накапливают притягиваемые частицы, которые надо периодически счищать.

Магнитные барабанные сепараторы применяются для обогащения тонкораздробленных сильномагнитных материалов. Распространены три основных типа барабанных обогатителей: 1) прямоточно действующие барабаны для крупной руды — размеры кусков до 6 мм, 2) вращающиеся (с противоположным направлением) барабаны для руд грубой обработки, с частицами размером 1,7 мм и 3) вращающиеся (с противоположным направлением) барабаны для тонкоизмельченных руд, с частицами размером 0,2 мм. Материал вводится в желоб, по которому и поступает в магнитное поле. Магнитные частицы из потока притягиваются магнитами к стенкам вращающегося барабана. Полюса стационарных магнитов, обращенные к стенке вращающегося барабана, чередуются, благодаря чему частицы, притянутые одним полюсом, сбрасываются со стенки при прохождении мимо следующего противоположного полюса. Принцип действия мокрого сепаратора с противоположным движением руды и самого барабана показан на рис. IV-47, а на рис. IV-48 представлена схема действия такого же сепаратора, но с движением руды и барабана в одну сторону.

Мокрые магнитные барабаны конструируются с постоянными магнитами и с электромагнитами. Барабаны с постоянными магнитами получили распространение благодаря их большей надежности и меньшим эксплуатационным расходам. Барабанами с электромагнитами

пользуются в тех случаях, когда требуется очень высокая интенсивность магнитного поля и необходима регулировка положения магнитов в широком интервале. В настоящее время регулировку постоянных магнитов можно осуществлять в пределах 30%. Диаметр ба-

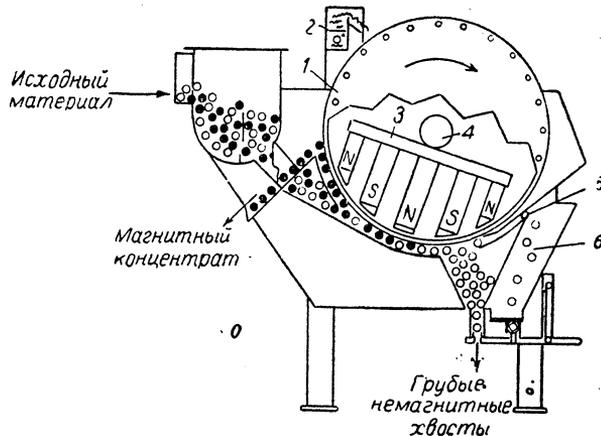


Рис. IV-47. Противоточный мокрый барабанный сепаратор:

1 — вращающийся барабан; 2 — промывка барабана; 3 — стационарные магниты; 4 — вал; 5 — уровень суспензии; 6 — перелив (уносит тонкие немагнитные хвосты).

● — магнитные частицы; ○ — немагнитные частицы.

рабанов составляет большей частью 750—900 мм, а ширина магнитов в них достигает 1,8 м. Сепараторы могут состоять из нескольких барабанов. Барабаны для крупного дробления обычно сдвигаются. Сепараторы

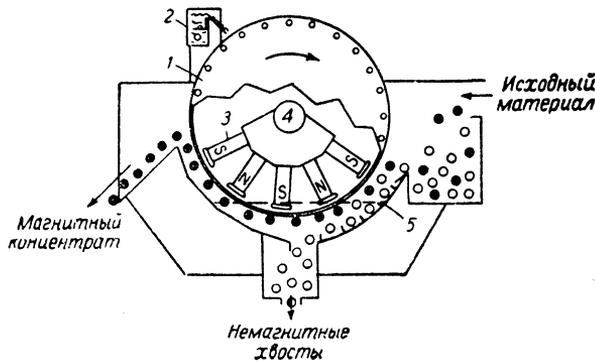


Рис. IV-48. Прямоточный мокрый барабанный сепаратор:

1 — вращающийся барабан; 2 — промывка барабана; 3 — стационарные магниты; 4 — вал; 5 — уровень суспензии.

● — магнитные частицы; ○ — немагнитные частицы.

для окончательного дробления состоит из двух или трех барабанов. Производительность сепараторов крупного дробления составляет 1,0—1,7 м³/мин, сепараторов грубого дробления — от 1,0 до 1,4 м³/мин и сепараторов тонкого (окончательного) дробления — от 0,5 до 0,8 м³/мин на 1 м ширины магнитов.

Эксплуатационные расходы для мокрого барабанного сепаратора обычно невелики, особенно при постоянных магнитах, но сильно колеблются, не превышая,

МАГНИТНАЯ СЕПАРАЦИЯ

Магнитное поле оказывает воздействие на помещенное в нем твердое тело. По магнитным свойствам твердые тела можно разделить на две большие группы: диамагнитные — не обладающие магнитной проницаемостью, и парамагнитные — обладающие магнитной проницаемостью и притягиваемые магнитом. Для практических целей наиболее часто встречающиеся парамагнитные вещества, в свою очередь, делят на сильномагнитные (ферромагнитные), слабомагнитные и немагнитные.

Разделение твердых веществ с помощью магнитного поля называют магнитной сепарацией. Различают две основных области применения магнитных сепараторов: удаление крупных железных примесей; обогащение руд и очистка.

Магнитные сепараторы для удаления крупных железных примесей

Эти сепараторы применяются для защиты действующего оборудования: дробилок, мельниц и транспортирующих систем. Материал должен быть сухим или он может иметь лишь поверхностную влагу. Крупными примесями считают куски железа размером >3 мм в поперечнике. Ниже рассматриваются наиболее распространенные типы этих сепараторов.

Ленточные сепараторы. Удаление крупных железных примесей осуществляется с помощью ведущего ленточного транспортера. Шкивы с электромагнитом или с постоянным радиальным полюсным магнитом изготовляются диаметром до 150 см при ширине ленточного транспортера тоже до 150 см (табл. IV-8).

Шкивами большего диаметра пользуются для достижения более высоких скоростей по сравнению с указанными в таблице. В случае наклонного транспортера применяют поправочные коэффициенты к скорости ведущего транспортера и производительности (табл. IV-9).

Подвесные магниты для улавливания железных примесей устанавливаются над транспортером или под углом к шкиву. Высота подвешивания определяется размерами частиц и нагрузкой транспортера. Номинальная высота слоя загрузки определяется по формуле:

$$H = 7,69 \frac{G}{WV}$$

где H — высота слоя загрузки на середине полосы на желобчатом транспортере с наклоном 20° , м; G — производительность, $м^3/мин$; W — ширина ленты, м; V — скорость ленты, $м/мин$.

Выбор магнита зависит от размеров удаляемых железных кусков. Высота слоя загрузки H плюс зазор 5—10 см над ней для удерживаемых кусков определяют высоту подвешивания магнитов.

Барабанные магнитные сепараторы. Магнитные барабаны устанавливают в тех случаях, когда из-за недостатка места нельзя воспользоваться магнитным сепаратором другой системы для удаления крупных загрязнений, содержащих железо, или когда для обработки потока материала наклонный желоб и труба предпочтительнее транспортера. Модель магнитного поля такого барабана очень похожа на модель поля радиального магнитного шкива. Наружный вращающийся цилиндр пронисит обрабатываемый материал сквозь магнитное поле, образуемое стационарными магнитами.

ТАБЛИЦА IV-8

Производительность (в $м^3/ч$) электромагнитных ленточных сепараторов для удаления железных примесей

Диаметр шкива, см	Ширина транспортера, см												Скорость транспортера, $м/мин$	
	30	35	40	45	50	60	75	90	105	120	135	150		
30	23,7	32,4	43,8	56,4	69,9	105,0								53
37,5	27,0	37,2	50,1	64,5	79,8	120,0	189,0							61
45	30,3	41,7	56,4	72,6	90,0	135,0	213,0	315,0						69
50		46,5	62,7	80,7	99,9	150,0	237,0	351,0	498,0					76
60			71,4	91,8	114,0	171,0	270,0	399,0	570,0	786,0				87
75				106,2	132,0	198,0	312,0	462,0	660,0	912,0				100
90					145,8	219,0	345,0	510,0	729,0	1008,0	1299,0			111
105						240,0	378,0	561,0	801,0	1104,0	1425,0	1770,0		122
120						261,0	408,0	609,0	870,0	1200,0	1548,0	1926,0		133
135								666,0	951,0	1311,0	1692,0	2103,0		145
150									999,0	1380,0	1779,0	2214,0		153

ТАБЛИЦА IV-9

Поправочные коэффициенты для наклонного транспортера

Градусы наклона	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Поправочный коэффициент	0,955	0,945	0,937	0,928	0,919	0,910	0,901	0,892	0,883	0,874	0,865	0,856	0,847	0,838	0,829	0,820

ноленточные сепараторы применяют для селективного обогащения. Их предпочитают, когда в руде содержится несколько магнитных минералов. Магнитные частицы извлекаются из измельченной руды на питающей ленте и разгружаются на сторону с помощью перекрестно движущейся ленты. Так как частицы руды поднимаются вверх, то концентрат освобождается от немагнитных примесей. Сепараторами с перекрестной лентой пользуются для обогащения вольфрамитов, монацитов и других дорогостоящих минералов. Производительность сепараторов с перекрестной лентой низка и стоимость их на единицу сырья поэтому высока: сепаратор с перекрестной лентой (шириной 45 см, с двумя магнитными полюсами) для обработки 2 т руды в час стоит около 15 000 долл.

Сепараторы с индукционными роликами применяются для обогащения и очистки химического и минерального сырья (рис. IV-49). Эти сепараторы изготавливаются с разнообразным расположением и числом роликов. Наибольшее распространение получил сепаратор для очистки шириной 750 мм с тремя магнитными полюсами; двоякая конструкция этого сепаратора имеет общую ширину для подачи материала 1500 мм. Такой агрегат очищает от 3 до 7,5 т продукта в час и стоит около 15 000 долл. Стоимость сепараторов с индукционными роликами на единицу перерабатываемого сырья невелика.

Сухие магнитные сепараторы со средней интенсивностью поля делятся на барабанные с чередующейся полярностью и барабанные однополюсные. Сепараторы с чередующимися полюсами магнитов предназначаются для обработки сырья, содержащего большие количества

притягиваемых магнитом минералов, с целью получения богатых концентратов (рис. IV-50). На этих аппаратах обрабатываются концентраты руды с размером частиц от 37 до 0,15 мм. Магнитное поле этого сепаратора в состоянии принять большую нагрузку магнитных частиц концентрата, создавая некоторое движение частиц во время обработки — достаточное, чтобы удалить примеси, захваченные при первоначальном магнитном воздействии. Производительность сепараторов чередующейся полярности изменяется обратно пропорционально размеру зерен руды. При грубоизмельченных рудах можно получить произво-

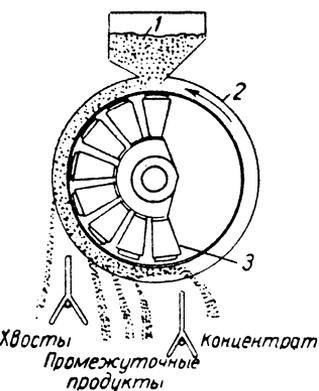


Рис. IV-50. Барабанные сепараторы Нортмана с чередующимися полюсами магнитов:

1 — исходный материал; 2 — вращающийся барабан; 3 — обмотки.

дительность примерно 30 т в час на 0,3 м ширины магнита. Сепаратор чередующейся полярности с диаметром барабана 750 мм и шириною магнитов 1500 мм стоит около 10 000 долл.

Однополюсные сепараторы («Юни-гэп») сконструированы так, чтобы создавать магнитную щель со средней интенсивностью поля по всей ширине барабана (в одном положении). Такие аппараты используются для удаления тонких магнитных частиц и применяются для материалов с размером частиц меньше 6 мм при пере-

работке примерно 3 т сырья в час на 0,3 м ширины магнита (или меньше).

Магнитные сухие сепараторы с полем низкой интенсивности применяются для частиц высокой магнитной проницаемости как для обогащения, так и для очистки от крупных частиц. Могут удаляться частицы и меньшей магнитной проницаемости, чем куски железа. Скорость подачи материала у сепараторов с полем низкой интенсивности меньше, чем у сепараторов для удаления железных примесей.

Высокоскоростные сухие магнитные сепараторы чередующейся полярности начали применяться в американской промышленности только в последние годы. Они предназначаются для обработки очень тонкоизмельченного материала (—0,15 мм и тоньше) и дают высококачественный магнитный концентрат, свободный от немагнитных загрязнений. Этими сепараторами пользуются для обогащения магнитных руд и т. п. Применяют несколько разных конструкций, принцип действия одной из них показан на рис. IV-51.

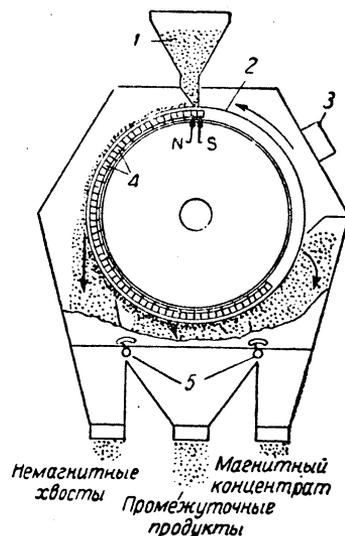


Рис. IV-51. Непрерывный сухой магнитный сепаратор для руд тонкого помола: 1 — приемник питания; 2 — барабан; 3 — коллектор щели; 4 — стационарные постоянные магниты; 5 — регулируемые направляющие.

Материалы для магнитных сепараторов

Магнитное поле в сепараторах создается электромагнитами и постоянными магнитами. Обмотки электромагнитов изготавливаются из изолированного медного провода, а сердечники из мягкого железа. Питание электромагнитов — от источника постоянного тока. Они не нуждаются в притоке энергии извне; после первоначального намагничивания электромагниты создают поле непрерывно. Специальные сплавы для магнитов весьма разнообразны, но наиболее интенсивное поле создает сплав альинико V, которым пользуются с 1958 г. Новейшим материалом является феррит бария, по производительности эквивалентный сплаву альинико V. Сепараторы со щелочноземельными элементами в составе магнита гораздо легче и, возможно, найдут применение.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Dean, Davis, Magnetic Separation of Ores, US Bur. Mines, Bull. 425, 1941.

Taggart, Handbook of Mineral Dressing, New York, 1953.

De Vaney, Proc. Intern. Mineral Processing Congr., Institution of Mining & Metallurgy, London, Paper 31, Group VI, April 1960.

Forcia, Hendrickson, Palasvirta, Magnetic Separation in Beneficiation of Mesabi Range Magnetic Taconite, Mining Eng., Dec. 1958.

однако, в год 3—5% первоначальной стоимости. Стоимость мокрых барабанных сепараторов с постоянными магнитами несколько выше, чем электромагнитных, хотя последние снабжаются дополнительным оборудованием (провода для подведения энергии, распределительные щиты).

Сухие магнитные сепараторы для обогащения и очистки. Сухие магнитные сепараторы подразделяются по интенсивности магнитного поля, которое они могут создать, на сепараторы с сильным, средним и слабым магнитными полями, а также высокоскоростные и высоко-

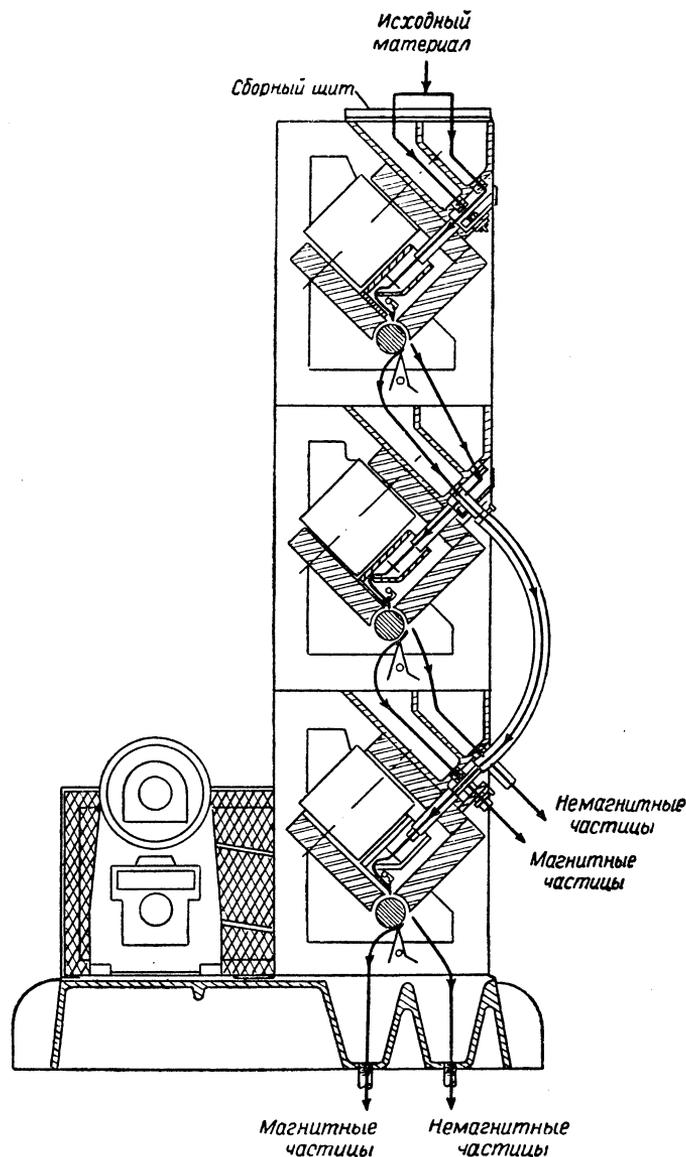


Рис. IV-49. Сепаратор с индукционными роликами.

тельные щиты). Стоимость мокрого магнитного сепаратора с одиночным барабаном диаметром 750 мм составляет приблизительно 1500 долл. за каждые 0,3 м ширины магнита. При диаметре барабана 900 мм стоимость возрастает до 2200 долл. за каждые 0,3 м ширины магнита. Стоимость многобарабанных мокрых сепараторов растет почти пропорционально числу барабанов.

интенсивные. Обычно с помощью высокоинтенсивных сепараторов удаляют слабомагнитные частицы, в низкоинтенсивных сепараторах — сильномагнитные частицы. Условия подачи материала и его физические свойства также влияют на выбор магнитного оборудования.

Наибольшее применение получили два типа высокоинтенсивных сухих магнитных сепараторов: перекрестноленточный и с индукционными роликами. Перекрест-

Электризация с помощью ионной бомбардировки

Ионная бомбардировка представляет собой, несомненно, наиболее сильный и эффективный метод электризации твердых частиц, однако селективность этого метода практически равна нулю. Если объединить этот процесс с электризацией методом индукции, то селективность такого комбинированного метода будет очень хорошей. Электризация с помощью подвижных ионов в действительности не является «электростатическим» процессом, хотя обычно этот термин применяют для описания любого процесса обогащения с использованием электрического поля высокого напряжения. В последние годы термин «высокое напряжение» стал благодаря постоянному употреблению общепринятым названием таких процессов, включая и ионную бомбардировку. В процессе высокого напряжения подвижные ионы образуются у светящегося электрода, который является причиной коронного разряда и, служа источником подвижных ионов, одновременно сообщает им и направление. Если диэлектрическую и проводящую частицы поместить на пути подвижных ионов, то часть поверхности каждой частицы получит сильный электрический заряд. На проводнике этот заряд перераспределится почти мгновенно, тогда как на непроводнике перераспределение такого же заряда будет чрезвычайно медленным. Если на заземленную поверхность на пути заряженных ионов поместить группу заряженных частиц, то будет обнаружено, что при прекращении движения подвижных ионов частицы проводника свободно покинут заземленную поверхность, заряд их уйдет в землю. С другой стороны, диэлектрики, или частицы непроводника, которые неспособны быстро терять свой заряд, удержатся на поверхности своей собственной силой отражения. Теория электростатического отражения дает только метод решения уравнений Лапласа и Пуассона путем рассмотрения условий симметрии. Другими словами, процесс будет описываться этими уравнениями, если принять, что частица равного и противоположного заряда становится в положение зеркального изображения по отношению к заземленной поверхности и данной частице. Сила этого отражения $F = \frac{Qq_i}{4\pi\epsilon_0(2s)^2}$, где $Q = Q_i$ — полный поверхностный заряд на минерале; s — расстояние от заряда до заземленной поверхности; e_0 — сила ионного поля.

Установлено, что «точка» в коронном разряде не может считаться постоянной. Согласно работам Леба, оптимальной конфигурацией является полушарие малого диаметра или — для поперечно расширяющейся короны — тонкий провод с гемисферическим поперечным сечением в направлении потока ионов. Как положительный, так и отрицательный коронный разряд имеют специальное назначение для некоторых видов сепарации. Однако отрицательный электрод создает в воздухе более интенсивную корону, при чрезмерном повышении напряжения начинается искрение.

В промышленных сепараторах высокого напряжения в качестве «заземленной поверхности» используется заземленный ротор. Благодаря этому имеют непрерывную поверхность, которая будет подводить частицы к источнику подвижных ионов и удерживать их некоторое время, пока все частицы зарядятся, а затем будут удаляться с поверхности. Частицы проводника свободно падают с ротора. Частицы непроводника удерживаются на роторе силой отраженного заряда.

Сепарация высокого напряжения приобретает чрезвычайно высокую селективность, когда вслед за коронирующим электродом устанавливают статический элект-

род, предотвратив предварительно опасность расширения коронного разряда (рис. IV-54). Диэлектрики получают высокий заряд и сильно прилипают к ротору, выделяясь таким образом из системы. Частицы проводника после потери своего заряда в землю (на роторе) заряжаются вновь противоположным зарядом по индукции. Этот процесс широко распространен и дает отличное разделение частиц проводника и непроводника и большое увеличение производительности по сравнению с процессом одной только индукции.

Известны два типа аппаратов для разделения методом ионной бомбардировки — с пластинами и с ротором. Пластинчатый сепаратор (более прочный) содержит только две вертикальных пластины с хорошо закругленными краями для предотвращения разряда короны. Эти пластины подвешены относительно близко одна к другой и находятся под высоким напряжением, причем либо обе пластины заземлены, либо одна заряжена положительно, а другая отрицательно. Для собирания различных продуктов вниз служат желоба, а питание подается сверху. Этот аппарат особенно пригоден для отделения друг от друга двух непроводников после заряда их путем контактной электризации. Несмотря на простоту оборудования, процесс зарядки частиц обычно довольно сложен. Основная задача при использовании сепараторов с пластинами заключается в отыскании наиболее эффективного метода предварительной обработки материалов, подлежащих разделению, чтобы облегчить и усилить их электризацию. Сепараторы в каждом отдельном случае изготавливаются по специальному проекту; заводского производства сепараторов этого типа нет (некоторые фирмы владеют патентами на различные конфигурации электродов и методы электризации).

Роторный сепаратор, в противоположность первому типу, сам совершает весь цикл электризации и поэтому не зависит от предварительной обработки материала. Как уже упоминалось в описании процесса ионной бомбардировки, ротором пользуются, чтобы ввести частицы в зону ионной электризации и затем удалить их, причем ротор действует одновременно и как заземленная непрерывная поверхность. Сепараторы высокого напряжения в американской промышленности изготавливаются различных конструкций, с вертикально или горизонтально поставленным ротором. Они могут состоять из одного или нескольких роторов, работающих как один агрегат. На рис. IV-55 представлена схема шестироторного вертикального сепаратора. Правый вертикальный ряд роторов предназначен для параллельной работы. Каждый ротор получает самостоятельное питание и работает самостоятельно, выпуская конечные продукты. Роторы левого ряда работают последовательно, получая питание от вышележащего ротора. Концентрат собирается внизу, а каждый отдельный ротор дает только хвосты и промежуточный продукт. Концентрат же с одного лишь ротора левого ряда получается «грубым», нуждается в дальнейшей очистке и идет в следующий ротор в виде питания. Мощность

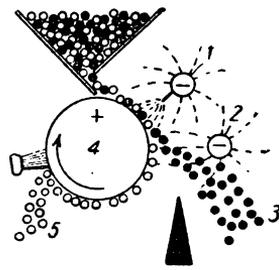


Рис. IV-54. Схема сепарации путем ионной бомбардировки:

1 — коронный электрод; 2 — статический электрод; 3 — проводники; 4 — заземленный ротор; 5 — диэлектрики.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СЕПАРАЦИЯ

Электростатическая сепарация основана на следующем явлении: если один или несколько материалов в зернистой смеси могут принять от электрода поверхностный заряд до или после входа в электростатическое поле, то они будут отталкиваться от этого электрода и притягиваться в направлении второго электрода в зависимости от знака заряда частиц. Благодаря этому заряженные и незаряженные частицы собираются в различных желобах, и таким образом осуществляется сепарация или обогащение. В действительности термин «электростатический» применен здесь неправильно. В некоторых случаях разделение идет почти полностью за счет электростатических сил, но во многих других, встречающихся гораздо чаще, энергия подводится к материалу в форме электрического тока и процесс точнее назвать «электродинамическим».

Основные процессы сепарации или обогащения твердых веществ, основанные на изложенном принципе, можно разделить на три группы: контактные, индукционные, с ионной бомбардировкой. С помощью этих методов частицам сообщается поверхностный заряд, и хотя методы различаются между собой, каждый включает в той или иной степени остальные.

Контактная электризация

Замечено, что при контакте поверхностей двух разнородных материалов происходит обмен зарядами в момент нарушения контакта. Электризационный контакт известен также как электризация трением, хотя роль трения при этом сводится только к увеличению поверхности контакта (при условии, что тепловым эффектом трения можно пренебречь). Если путем контакта частиц заряжается одна частица, то при этом контактная поверхность весьма мала и необходимо обеспечить механическими методами многократный контакт для того, чтобы создать на частицах поверхностный заряд достаточной величины. При движении зернистого материала контакты между частицами возобновляются. Даже если материал состоит из плохо проводящих частиц, то все-таки полученного заряда достаточно, чтобы воспользоваться этим методом для обогащения с помощью электрического тока. И если не удается привести частицы к повторному контакту (как, например, в случае зарядки частиц обоими полюсами поля), то все-таки описанным явлением пренебрегать не следует.

За исключением высоких температур поверхностный заряд путем контактной электризации сухих минералов можно объяснить, вероятно, переносом электронов. Правило Коэна гласит: «Когда два диэлектрических материала разделяются благодаря контактному процессу, материал с более высокой диэлектрической постоянной получает положительный заряд». Хотя правило Коэна получило подтверждение более чем для 400 веществ, его значение для разделения твердых веществ ограничено из-за возможностей контакта твердых веществ в рабочем процессе; кроме того, загрязнения и дефекты решетки могут вызвать действие, противоположное ожидаемому.

Теория контактного взаимодействия очень сложна и требует изучения электрических свойств твердых веществ. Практически инженер заинтересован в регулировании контактного взаимодействия, чтобы добиться различного заряда на различных материалах и таким образом осуществить их разделение. В большом числе

простых случаев при удалении пыли и ила вполне достаточно разобренных поверхностей, чтобы получить соответствующие заряды при контактном взаимодействии.

Индукционная электризация

Процессы индукционной электризации частиц проще контактной электризации и легко объяснимы. Если твердую частицу поместить в электрическом поле на заземленный проводник, то на ней путем индукции быстро образуется поверхностный заряд. Независимо от того, является ли частица проводником или диэлектриком, можно считать, что она в большей или меньшей степени поляризуется. Однако потенциал частицы проводника в чрезвычайно короткий промежуток времени

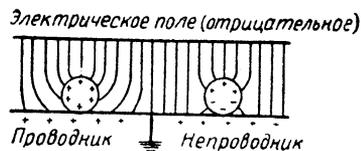


Рис. IV-52. Схема электризации с помощью электрической индукции.

(благодаря контакту с заземленным проводником) становится потенциалом того же знака, что и потенциал заземленного проводника. У частиц диэлектрика трудно определить знак их потенциала из-за различия заряда на разных поверхностях частицы. Достаточно знать, что частицы диэлектрика остаются в основном поляризованными из-за их неспособности перераспределять электроны и, таким образом, не создают поверхностного заряда (рис. IV-52). Однако любое вещество не является ни совершенным проводником, ни совершенным диэлектриком. Частица с определенной проводимостью получает заряд $Q = C_ч V$ (где $C_ч$ — емкость частицы; V — разность потенциалов поля).

Практически электризацию путем индукции используют для разделения относительных проводников и непроводников. Когда падающий на заземленный ротор материал будет проходить через электрическое поле (рис. IV-53), будут происходить следующие явления: проводящие частицы в кратчайшее время приобретут заряд ротора (знак которого противоположен знаку потенциала активного электрода) и будут отскакивать от ротора в направлении активного электрода; непроводящие частицы поляризуются и благодаря своей полярной ориентации будут притягиваться ротором и отталкиваться активным электродом. При правильной установке разделительной перегородки можно получить хорошее разделение частиц.

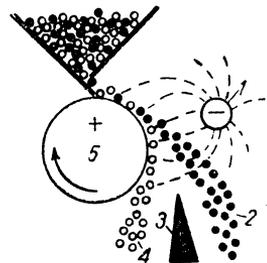


Рис. IV-53. Схема сепарации с помощью электрической индукции:

M. I. T. Thesis, 1958. — Loe b, J. Appl. Phys., 19, 882 (1948). — Carpenter, Technical Aspects of High Tension Separation, AIME, Dec. 1949. — Fraas, Balston, Ind. Eng. Chem., 32, 600 (1940). — Fraas, The Conductance Electrostatic Separator, Am. Inst. Mining a. Met. Engrs, Tech. Publ., 1511, 1942. — Fraas, Notes on Drying for Electrostatic Separation of Particles, Am. Inst. Mining, a. Met. Engrs, Tech. Publ., 2257, 1947. — Fraas, Balston, Dielectric Constant in Air-ambient Electrostatic Separation, US Bur. Mines, Rept Invest. 4278, April 1948. — Lond, New Dry Concentration Equipment, US Bur. Mines, Rept Invest. 4286, May 1948. — Bullock, Ind. Eng. Chem., 33 (9), (Sept. 1941).

ФЛОТАЦИЯ

Пенная флотация представляет собой основной процесс очистки минералов из числа применяемых в настоящее время. Очистка минералов или обогащение руд производится вблизи рудника. Цель — получение одного или нескольких концентратов ценных минералов; остаток представляет истощенные хвосты или малоценные минералы.

Пенной флотацией обрабатываются металлические руды, измельченные до 0,30—0,35 мм, уголь и некоторые неметаллические ископаемые, измельченные до 0,25—0,60 мм. Материал более грубого измельчения обычно не подходит для суспензии во флотомашине. Тонкость измельчения определяется размерами частиц, которые уже отделены от сопровождающей породы. Во флотомашине измельченная руда превращается с помощью механического или воздушного перемешивания в водную суспензию с содержанием твердого вещества от 15 до 35%. Поверхность частиц минерала обрабатывается так называемыми промоторами или коллекторами, которые сообщают поверхности способность «прилипания» к воздуху и отталкивания от воды. Благодаря энергичному перемешиванию и аэрации в присутствии пенообразователей в верхней части флотационной машины образуется слой пены. Минералы прилипают к пузырькам воздуха, поднимаются вверх вместе с ними, собираются в слое пены и снимаются вместе с ней. Нежелательные минералы идут вниз (т. е. не флотируются) либо потому, что их поверхность не изменилась при адсорбции коллектора, либо благодаря применению модифицирующих агентов.

Ценным концентратом при пенной флотации может быть как уходящий с пеной продукт, так и продукт, оседающий на дне. В случае сульфидных руд меди, свинца, цинка, никеля, ртути и молибдена, а также самородного серебра и золота ценной частью является пена. При флотации песка содержащие железо минералы собираются в пене, а ценный, высокой чистоты кварц оседает внизу.

Флотационные реагенты

Промоторы или коллекторы обеспечивают флотируемым минералом водоотталкивание и средство к воздуху, благодаря чему они прилипают к пузырькам воздуха. Типичными коллекторами для флотации сульфидов металлов и самородных металлов являются ксантаты и дитиофосфаты

(где R — алкильная группа, содержащая от 2 до 6 атомов углерода). Ион коллектора адсорбируется поверх-

ностью сульфида через атом серы. Алкильная группа обеспечивает водоотталкивание. Обычный расход реагента от 4 до 90 г на 1 т руды.

Сырые и очищенные жирные кислоты и их мыла, нефтяные сульфонаты и сульфированные жирные кислоты тоже широко используются в качестве коллекторов при флотации плавикового шпата, природных фосфатов, железных руд и неметаллических ископаемых. В этих случаях расход реагента гораздо выше — от 90 до 900 г на 1 т руды. Катионные коллекторы (такие как жирные амины и соли аминов) широко используются для флотации кварца, поташа и силикатных минералов в количестве от 4 до 900 г на 1 т. Мазут и керосин используются как коллекторы для угля, графита, серы и молибденитов, так как они легко адсорбируются естественными гидрофобными материалами. На практике только второй пенообразователь часто используется для флотации этих минералов. Эти углеводороды используются также для разбавления сульфонов, жирных кислот и жирных аминов при флотации неметаллических ископаемых.

В качестве пенообразующих используются сосновое масло, технический крезол и алифатические спирты, содержащие C₅—C₈, например метилизобутилкарбинол и гептанол. Широко применяются водорастворимые пенообразователи, содержащие способствующие растворимости группы (производные полипропиленгликоля). Обычный расход пенообразователя составляет 4—90 г на 1 т.

Модификаторы

Как описано ниже, флотационные модификаторы включают несколько классов химикатов. Активаторы делают поверхность минерала поддающейся покрытию коллектором. Ион меди используется, например, для активации сфалерита ZnS, сообщая поверхности сфалерита способность адсорбировать коллекторы — ксантаты или дитиофосфаты. Сульфидом натрия пользуются для покрытия окисленных медных и свинцовых минералов с тем, чтобы их можно было подвергать флотации с коллекторами для сульфидных минералов.

Щелочные регуляторы (известь, каустическая сода, кальцинированная сода), а также серная кислота служат для регулирования pH, очень важного фактора во многих процессах флотационной сепарации.

Депрессоры способствуют селективности (четкости разделения) или препятствуют всплыванию минералов. Типичными депрессорами являются цианиды натрия или кальция для пирита FeS₂, при этом всплывают сульфиды свинца, цинка или меди; сульфат цинка — депрессор для ZnS, всплывает PbS; ферроцианид натрия — депрессор для сульфидов меди, всплывает молибденит MoS₂; известь — депрессор для пирита; силикат натрия — депрессор для кварца; квебрахо — депрессор кальцита CaCO₃ при флотации флюорита CaF₂; сульфированные лигнинны и декстрины — депрессоры графита и талька при флотации сульфидов.

Диспергирующие агенты или дефлокулянты нужны для борьбы с липким илом, который иногда бывает помехой при разделении и увеличивает расход реагентов. С этой целью пользуются кальцинированной содой, известью, силикатом натрия и сульфированным лигнином.

Расход модифицирующих реагентов колеблется в широких пределах, начиная от очень малых количеств (0,02 кг на 1 т) до очень высоких (2—4 кг на 1 т), в зависимости от реагента и требований металлургии.

такой установки составляет от 1250 до 2500 кг/ч на 1 м длины ротора. Двенадцатироторная машина этой фирмы (длина ротора 3 м) может переработать за один цикл до 120 т/ч гематитовой руды. Стоимость этой установки с дополнительным оборудованием составляет около 1600—2000 долл. на 1 м ротора.

Все частицы, подлежащие разделению, должны иметь сухую поверхность (для всех трех методов электризации). Поверхностная влага удаляется довольно просто.

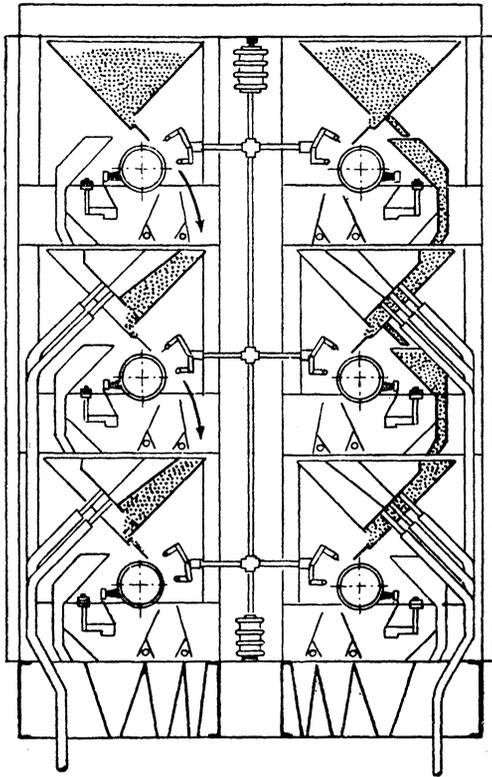


Рис. IV-55. Сепаратор высокого напряжения «Карпко».

Гораздо сложнее поддерживать поверхность в сухом состоянии при высокой влажности. Испытания, проведенные на зеркальном гематите и кварце, показали, что можно достигнуть рационального разделения на предварительно высушенном материале в условиях высокого напряжения при 25°С и относительной влажности менее 35%. Эти же испытания показали, что в случае относительной влажности 60% потребуется повысить температуру руды до 43°С для осуществления разделения, а если влажность 90%, то требуется температура минимум 88°С. Для эффективного разделения ильменита, рутила и циркона необходимо поддерживать температуру выше 93°С независимо от относительной влажности. При контактной электризации флоридского фосфорита и кварца последний заряжается отрицательным зарядом, а фосфорит — равным положительным зарядом при температуре от —25° до 315°С. В условиях температуры 480°С сильвинит обменивается зарядами с галитом, когда температура около 150°С сепарация уже не начинается, а при температуре ниже 88°С разделение совсем прекращается, если

относительная влажность составляет около 90%. В каждом случае атмосферная влажность имеет более или менее существенное значение.

Промышленное применение электростатической сепарации

Для разделения полевого шпата и кварца, а затем полевого шпата на калий- и натрийсодержащие концентраты в Соединенных Штатах применяют сепараторы пластинчатого типа и сепараторы с контактной электризацией. Кварц, полевой шпат и слюду разделяют также, используя процесс под высоким напряжением. Почти все крупные оловянные компании пользуются процессом высокого напряжения для отделения колумбита, ильменита и касситерита от сопутствующих минералов. На заводах, обрабатывающих титановые минералы, с помощью высокого напряжения отделяют ильменит и рутил от монацита, циркона и других непроводников. Южноафриканские компании производят этим же способом приблизительно 100 тыс. т ильменита в год. Во Флориде работают заводы производительностью по 1000 т/сутки, выпускающие главным образом концентраты минералов — ильменита, рутила, лейцита, циркона. Там применяется комбинированный метод — сепарация под высоким напряжением и высокоинтенсивная магнитная сепарация.

Однако типовой технологической схемы не существует. Можно упомянуть только несколько общих условий. Большинство руд и других материалов должно быть измельчено до —2,4 мм. Тогда можно получить достаточный заряд на единицу массы для эффективного разделения. Пределы размеров частиц оказывают определенное влияние на этот процесс; возможно, что близкие пределы размеров способствуют большей эффективности разделения (в особенности разделения проводников от непроводников). Как было указано, все частицы должны иметь раздельные поверхности. При этом степень удаления пыли может быть различна. Например, при измельчении до —2,4 мм необходимо для удаления пыли сито с отверстиями 0,075 мм, при измельчении до —0,85 мм пыль удаляют на сите до 0,044 мм, при измельчении до —0,42 мм — на сите 0,037 мм и т. д. Для успешной сепарации тяжелых руд может возникнуть необходимость классификации на ситах промежуточных размеров. Различие плотностей минералов, входящих в состав руды, может значительно увеличить или уменьшить эффективность разделения на проводники и непроводники. Например, плотность гематита выше плотности кремнезема, он проводник и поэтому сбрасывается с ротора; все это облегчает сепарацию. Отделение монацита от ильменита идет труднее, так как у непроводника — монацита — плотность выше, чем у проводника — ильменита.

Существует диаграмма¹ зависимости плотности от проводимости и магнитной проницаемости, проверенная на отдельных минералах. Ею можно пользоваться для приближенных расчетов, но не при конструировании в качестве диаграммы для систематического определения режима сепарации обычных минералов.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Gillson, Chemical Engineers Handbook, 3 ed., 1950. — Lawver, Fundamentals of Electrical Concentration of Minerals, Am. Inst. Mining a. Met. Engrs, Tech. Paper, Febr., 1957. — Mora, Study of Electrical Concentration of Minerals,

¹ Eng. a. Mining J. Guidebook, 158, № 6A, -26, 85 (1957).

цами, опущенными вниз по периферии. Гуммированный стабилизатор исключает «мертвые пространства» в зо-

изменением давления воздуха. С этой целью для каждой флотационной камеры установлен индивидуальный вентиль на воздушной коммуникации. Избыточное давление обычно составляет 0,105 ат.

На старых заводах можно встретить и другие типы флотационных камер. Камера Коллау, например, не имеет никаких механических вращающихся частей. Пульпа руды суспендируется и аэрируется пузырьками, входящими через дно камеры — пористую перегородку (обычно матерчатый мат). Во флотационную камеру

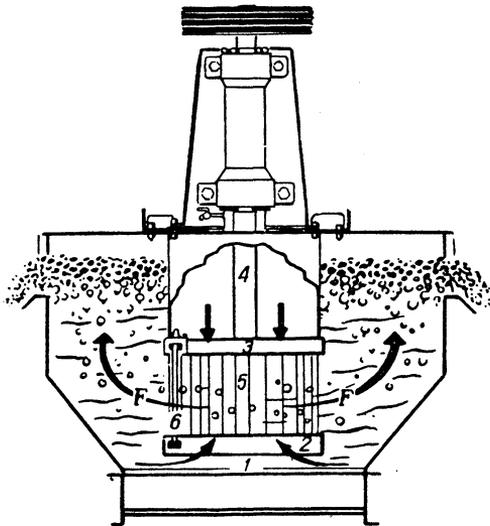


Рис. IV-56. Флотационная машина «Фэгерен»:

1 — отверстие; 2 — нижняя часть ротора; 3 — верхняя часть ротора; 4 — стационарная труба; 5 — средняя часть ротора; 6 — статор.

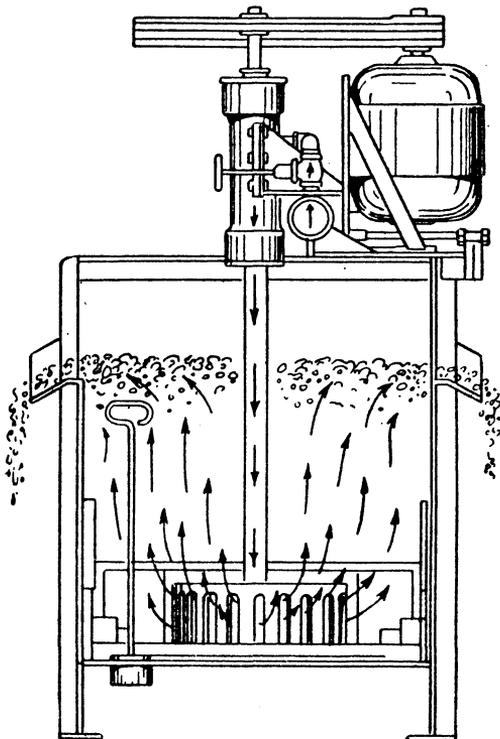


Рис. IV-58. Флотационная машина «Агитер».

Макинтоша воздух вводится через вращающуюся трубу, конец которой недалеко от низа корыта V-образной формы плотно обернут пористым материалом. Сквозь эту перегородку проходит воздух, разбиваясь на мелкие пузырьки. В камере Форестера воздух вводится через вертикальные трубки диаметром 12—25 мм, вставленные с интервалом 100—150 мм по длине V-образного корыта. Модификации этой камеры широко используются для флотации фосфатов. Эксплуатационные расходы у этих камер значительно ниже, чем у механических камер при одинаковом обслуживании.

Количество перерабатываемого на флотационном оборудовании материала изменяется в зависимости от плотности пульпы и продолжительности флотации, требуемой для частичной обработки и очистки. Число камер, необходимых для полной обработки, можно считать по формуле:

$$\text{Число камер} = \frac{\tau G d}{V \cdot 1440}$$

где τ — продолжительность флотации, мин; G — количество сухой руды, перерабатываемой за сутки, т; d —

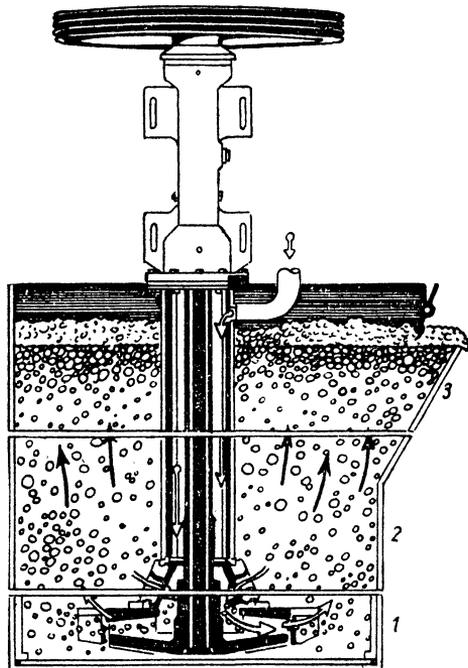


Рис. IV-57. Флотационная машина «Денвер» (Sub-A):

1, 2, 3 — зоны флотации.

не перемешивания и улучшает контакт между пузырьками воздуха и рудой. Степень аэрации регулируется

Промышленное применение флотации

Свыше 90% мирового производства меди, свинца, цинка, молибдена, сурьмы и никеля приходится на рудные концентраты, получаемые пенной флотацией. Большинство тонких природных фосфатов во Флориде получается путем флотации. Природный поташ обогащается путем флотации.

Ряд типичных примеров промышленного применения пеннофлотационной сепарации приводится в табл. IV-10.

Машины «Агитер», «Денвер» (Sub-A) и «Фагергрэн» предусматривают механическое перемешивание и аэрацию с помощью вращающегося импеллера, укрепленного на вертикальной оси. Кроме того, для машин «Агитер» и иногда «Денвер» (Sub-A) пользуются «сжатым воздухом», нагнетаемым воздуходувкой для облегчения аэрации пульпы.

В машине «Фагергрэн» (рис. IV-56) пульпа засасывается снизу вверх через отверстие в нижнюю часть ротора 2. Одновременно в верхнюю часть ротора 3

ТАБЛИЦА IV-10

Примеры пеннофлотационной сепарации

Руда	Реагенты	Продукты флотации	
		извлечение, %	состав
Сульфид цинка в жиле карбоната, 4% Zn, 5% пирита	0,2 кг/т $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0,3 кг/т дитиофосфата, 0,06 кг/т NaCN, 0,009 кг/т пенообразователя	94,8	63,5% Zn
Природный фосфат, 30% основного фосфата кальция (ОФК) с кварцевой прослойкой	Фосфатная флотация — 0,45 кг/т таллового масла, 0,9 кг/т мазута, 0,36 кг/т NaOH	Грубый фосфатный концентрат	12% нерастворимого осадка, 65% ОФК
Флюорит, 40% CaF_2 в CaCO_3 , SiO_2 и окиси железа	Флотация кремнезема из фосфатного концентрата — 0,05 кг/т жирного амина, 0,2 кг/т керосина	Кремнеземные хвосты (окончательный фосфатный концентрат) 85	75—77% ОФК, 3% нерастворимого осадка
Железная руда, 30—35% Fe с кремнеземной породой	3,2 кг/т Na_2CO_3 , 0,68 кг/т Na_2SiO_3 , 0,36 кг/т очищенных жирных кислот, 0,05 кг/т спирта-пенообразователя, 0,07 кг/т квебрахо	95	99% CaF_2
Медная сульфидная руда, 0,9% Cu с пиритом и силикатной породой	1,35 кг/т H_2SO_4 , 0,85 кг/т нефтяного сульфоната, 0,32 кг/т мазута, 0,18 кг/т таллового масла, 0,63 кг/т Na_2SiO_3	70	58—60% Fe, 6—8% SiO_2
	2,7 кг/т извести, 0,015 кг/т дитиофосфата, 0,01 кг/т спирта-пенообразователя	91	24% Cu

Кроме обогащения минералов, пенная флотация имеет ограниченное применение. Она используется для осветления осадительных ванн искусственного шелка и для обработки водорастворимых масел, применяемых в операциях измельчения. Отделение типографской краски и парафина из бумажных отходов, клейковины и волокон — из зерен крахмала, хорошего гороха от плохого также производится с помощью флотации.

Так называемый «растворимый воздух» используют во флотационных машинах для обработки сточных вод или промышленных отходов путем растворения воздуха под давлением в потоке отходов. После снятия давления растворенный воздух образует пузырьки, которые поднимаются с прилипшим твердым веществом на поверхность, откуда эта пена снимается (это вовсе не пенная флотация, которая была описана выше).

Флотационные машины

Среди распространенных флотационных машин часто один тип используется для грубой обработки, а другой — для окончательной доводки.

пульпа засасывается сверху через стационарную трубу 4 и смешивается с пульпой в средней части ротора 5. Аэрированная пульпа выбрасывается из ротора центробежной силой F. Под действием сил среза статора 6, представляющего собой стационарную клетку, плотно смонтированную вокруг ротора, воздух разбивается на мельчайшие пузырьки и равномерно распределяется по всему объему статора.

Во флотационной машине «Денвер» типа Sub-A (рис. IV-57) пульпа поступает под действием силы тяжести сверху по специальной трубе питания и попадает непосредственно на верх вращающегося импеллера, расположенного под колпаком. Это зона 1 перемешивания и аэрации, воздух нагнетается по трубе в середину камеры. В зоне 2 происходит разделение пузырьков воздуха, нагруженных минералом, и пузырьков, нагруженных пустой породой. В зоне 3 идет концентрирование. Здесь концентраты, частично отделенные от разгрузочной стороны машины отбойной перегородкой, обогащаются и, двигаясь вперед, сбрасываются гребками.

Во флотационной машине «Агитер» (рис. IV-58) импеллер представляет собой гуммированный диск с паль-

Флотационная машина, как правило, состоит из ряда камер. Обычно практикуется подача грубого размола в несколько камер и получение в результате хвостов и низкопроцентного концентрата. Этот концентрат обрабатывается (иногда после дополнительного размола) в камерах обогащения, а затем в камерах доводки. При этом получается конечный концентрат, а хвосты либо

общих капиталовложений. Наибольшая часть капиталовложений приходится на оборудование для дробления и измельчения.

Важнейшие показатели, оказывающие влияние на общую стоимость флотационной фабрики:

1) твердость руды; легкость вскрытия и тонкость измельчения минералогических спутников;

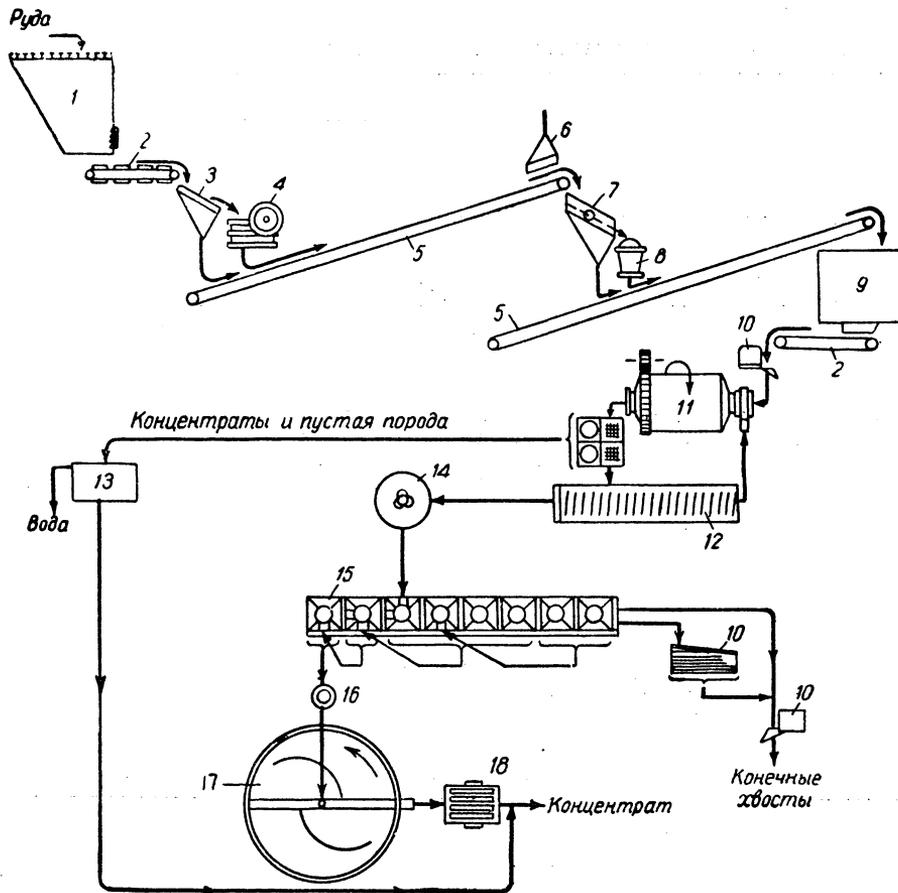


Рис. IV-59. Простейшая технологическая схема флотационной фабрики:

1 — бункер для крупных кусков руды; 2 — питатель; 3 — грохот; 4 — щековая дробилка; 5 — конвейеры; 6 — магнит; 7 — вибрационное сито; 8 — коническая мельница; 9 — бункер для измельченной руды; 10 — пробоотборник; 11 — шаровая мельница; 12 — классификатор; 13 — отстойник; 14 — смеситель; 15 — флотационные машины; 16 — вертикальный насос; 17 — сгуститель (и диафрагменный насос); 18 — фильтр.

возвращаются в производство, либо извлекаются в дольных камерах. Дополнительное измельчение необходимо для многих руд.

На рис. IV-59 приводится схема типичной обогатительной флотационной фабрики.

Экономика

Стоимость четырехкамерных флотационных машин трех типов приводится в табл. IV-12. Пеннофлотационные фабрики имеют оборудование для дробления, измельчения, сортировки, обработки материалов и регенерации воды. Поэтому стоимость флотационного отделения фабрики составляет лишь небольшую часть от

2) содержание металла в руде (обработка неметаллических материалов требует больше капиталовложений чем, например, обработка сульфидов неблагородных металлов);

3) свойства грунта на участке постройки фабрики;

4) метеорологические условия;

5) предполагаемая продолжительность существования фабрики;

6) степень автоматизации;

7) тип требуемой или предпочитаемой конструкции;

8) коэффициент запаса производительности.

Для определения примерной максимальной стоимости фабрики сульфидных концентратов некоторые компании к общей стоимости оборудования берут коэффициент

объем пульпы (руда + вода), содержащей 1 т сухого твердого вещества, m^3 ; V — объем одной камеры, m^3 .
 Типичные данные по производительности трех конструкций машин приведены в табл. IV-11 (пульпа содержит 33% сухого вещества, плотность руды 3000 kg/m^3).

единичных агрегатов, в особенности на крупных предприятиях, перерабатывающих 50 т руды в час или больше. Однако для операций очистки иногда предпочитают машины меньшего размера.

Руды должны быть измельчены до полного или почти полного вскрытия рудных и пустопородных частиц.

ТАБЛИЦА IV-11

Примерная производительность флотационных машин, т сухой руды в сутки

Тип машины	Объем камеры, m^3	Мощность камеры, $kвт$	4 камеры			8 камер			12 камер		
			Продолжительность флотации, мин								
			4	8	12	4	8	12	4	8	12
«Флагергрэн» (1650×1650 мм)	1,62	7,5	1140	570	380	2280	1140	760	3420	1710	1140
«Агитер» (1200×1200 мм)	1,08	5,6	760	380	254	1520	760	510	2280	1140	760
«Денвер» Sub-A № 24 (1075×1075 мм)	1,35	3,7	950	475	317	1900	950	635	2850	1430	950

Производительность, указанная в табл. IV-11, рассчитывалась исключительно по объему флотационной камеры. При проектировании основных установок флотационного оборудования в настоящее время учитывают также и условия расхода энергии. Например, если лабораторные испытания и испытания на опытной установке показали, что для достижения желательной степени обогащения потребуется 3 $kвт \cdot ч$ энергии на 1 т руды, то даже при удваивании или утраивании продолжительности контакта и расходе энергии менее 3 $kвт \cdot ч$ на 1 т результаты улучшаться не будут.

В настоящее время на новых и реконструируемых заводах появилась тенденция к увеличению размеров

Если этого можно достигнуть даже и при грубом дроблении, то все равно во всех случаях необходимо измельчение до крупности 0,85 мм, а для флотации — тоньше 0,3 мм. Измельчение входит в замкнутый цикл классификации.

На многих установках хорошие результаты флотации можно получить, смешивая руду с реагентом перед флотацией. Коллекторы (типа масел) иногда добавляют в цикл измельчения. Для получения надлежащей селективности в некоторых случаях требуется продолжительный контакт руды с реагентом; для этого смешивают измельченную руду с реагентом в смесителе (цилиндрической емкости с вертикальным импеллером).

ТАБЛИЦА IV-12

Характеристика и стоимость четырехкамерных флотационных машин наиболее распространенных типов

Тип машины	Объем пульпы, m^3		Общая мощность машины, $kвт$	Стоимость, долл.		Примечания
	на камеру	общий		общая	на 1 m^3 объема	
«Флагергрэн» (1650×1650 мм)	1,65	6,6	30 (30÷45)	7 600	1150	Конструкция из мягкой стали, частично гуммированной. Не учтена стоимость пенных желобов, ящиков, танков, 4 моторов (по 7,4 $kвт$) и приводов.
«Денвер» Sub-A (1400×1400 мм)	2,7	10,8	30 (30÷37,5)	10 018	928	Конструкция из мягкой стали, частично покрытой формованной резиной. Включена стоимость 2 моторов по 14,7 $kвт$ и приводов, привода оси лопасти 0,25 $kвт$ (но без воздуходувки).
«Агитер» (1200×1200 мм)	1,1	4,4	22,5 (15÷22,5)	5 418	1231	Конструкция из мягкой стали, частично покрытой резиной. Включена стоимость 2 моторов по 11 $kвт$ и приводов; исключена стоимость ящиков для питания, соединительных ящиков и воздуходувки

Глава пятая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ

Д. Консидайн (D. M. Considine) при участии Л. Бертрана (L. Bertrand),
Г. Брокетта (G. F. Brockett), С. Данатоса (St. Danatos), Р. Жилетта (R. C. Gillette),
Дж. Холла (G. A. Hall), В. Хаува (W. H. Howe), Дж. Джонстона (J. Johnston),
Дж. Джонса (J. V. Jones), А. Мак-Киннея (A. H. McKinney),
Н. Рихтера (N. Richter), С. Робертс (S. M. Roberts), К. Сандерса (C. W. Sanders)
и Т. Стаута (T. M. Stout)

Перевод А. И. БЕЛИЧ и Л. П. РОМАНКОВА
под редакцией П. Г. РОМАНКОВА и Л. А. МУСЯКОВА

четыре. Этот коэффициент годится для хорошо организованных предприятий. Обычно же достаточно коэффициента три.

На расход энергии влияют следующие основные факторы:

- 1) достигаемая степень очистки;
- 2) плотность (разбавление) пульпы;
- 3) продолжительность флотации;
- 4) перекачивание пены и неочищенного концентрата.

Расход энергии на одну лишь флотацию большинства сульфидных руд колеблется от 2 до 3 *квт·ч* на 1 *т* исходного материала. Руды, поддающиеся флотации легко (например, флоридские фосфаты), требуют всего 1 *квт·ч/т*.

На современных сульфидных флотационных фабриках один оператор может обслужить флотационную секцию, перерабатывающую 12—14 *т* сырья в сутки при условии, что руда не содержит много компонентов и обработка ее достаточно проста. Некоторые новые процессы флотации угля объединены во флотационный цикл для извлечения тонких частиц и осуществлены без увеличения рабочей силы. Машины работают автоматически с краткой проверкой несколько раз в день.

Эксплуатационные расходы по данным некоторых обогатительных фабрик можно распределить следующим образом (в расчете на 1 *т* руды):

	В долларах
Текущий ремонт	0,093—0,14
Энергия	0,18—0,47
Рабочая сила	0,049—0,69
Транспорт	0,017—1,27

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Gaudin, Flotation, 2 ed., New York, 1957. — Sutherland, Wark, Principles of Flotation, Australasian Institute

of Mining and Metallurgy, Melbourne, 1955. — Taggart, Handbook of Mineral Dressing, New York, 1945. — Taggart, Elements of Ore Dressing, New York, 1951. — Gaudin, Principles of Mineral Dressing, New York, 1939. — American Cyanamid Co., Mineral Dressing Notes, № 21, Froth Flotation, 1955; № 25, Flotation Reagents, 1960.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ IV

С. Е. Андреев, В. В. Зверевич, В. А. Перов. Дробление, измельчение, грохочение полезных ископаемых. Госгортехиздат, 1961. — Ф. Н. Белаш, Флотация железных руд. Госгортехиздат, 1962. — И. С. Благов, А. И. Коткин, Т. Г. Фоменко, Гравитационные методы обогащения. Теоретические основы, Госгортехиздат, 1962. — В. В. Булычев, В. Е. Болдырев, Новое оборудование обогатительных фабрик, Изд. «Недра», 1967. — Вопросы теории гравитационных методов обогащения полезных ископаемых, Госгортехиздат, 1960. — В. А. Глембоцкий, В. И. Классен, И. Н. Плаксин, Флотация, Госгортехиздат, 1961. — В. И. Классен, В. А. Мокроусов, Введение в теорию флотации, Металлургиздат, 1953. — А. М. Годэн, Флотация, перев. с англ., Metallurgizdat, 1959. — В. И. Кармазин, Современные методы магнитного обогащения руд черных металлов, Госгортехиздат, 1962. — В. А. Олевский, Конструкции и расчет механических классификаторов и гидроциклонов, Госгортехиздат, 1960. — Н. Ф. Олофинский, Электрические методы обогащения, Госгортехиздат, 1962. — А. И. Поваров, Гидроциклоны, Госгортехиздат, 1961. — Ф. Себба, Ионная флотация, перев. с англ., Metallurgizdat, 1965. — А. Таггарт, Основы обогащения руд, перев. с англ., Metallurgizdat, 1958. — А. С. Черняк, Химическое обогащение руд, «Недра», 1965. — «Справочник химика», 2-е изд., т. V, 1966, т. VI, 1967. — П. Г. Чилстед, Обогащение руд, № 3 (1960). — В. Г. Деркач, Обогащение руд, № 4 (1963). — И. Н. Плаксин, В. И. Кармазин, Н. Ф. Олофинский, В. В. Норкин, В. В. Кармазин, Новые направления глубокого обогащения тонковкрапленных железных руд, Изд. «Наука», 1964. — В. Г. Деркач, Р. И. Шупановская, Обогащение руд, № 4 (1960). — А. А. Бельский, М. П. Мышенкова, Обогащение руд, № 3 (1963). — Н. Ю. Гершов, сб. «Порошковая металлургия», Изд. АН УССР, № 5, 1962.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРУЕМОГО ПРОЦЕССА

Измерение является основной предпосылкой регулирования непрерывного процесса — независимо от того, производится ли регулирование автоматически, полуавтоматически или вручную. Для хорошего качества регулирования необходимы высокая точность, воспроизводимость и надежность измерений. Выбор методов измерений, удовлетворяющих этим требованиям, является первым шагом при разработке любой системы регулирования какого-либо процесса.

Прогресс в теории измерений очевиден, однако основные успехи в измерительной технике за последние два десятилетия отмечаются, главным образом, в обла-

сти создания аналитических приборов; методы измерения наиболее часто встречающихся величин (напримр, температура, давление, расход, уровень жидкости) претерпели относительно небольшие изменения.

Наряду с использованием термопар, термометров сопротивления, манометрических термометров и радиационных пирометров, на практике применяются устаревшие средства для определения температуры. Такие параметры, как вязкость, консистенция, цвет, влажность или влагосодержание, несмотря на то, что они часто являются важными характеристиками технологического процесса, все еще ждут новых разработок методики и техники измерений.

Данные о распространенности различных методов измерений в промышленности приведены в табл. V-1.

ТАБЛИЦА V-1

Распространенность различных методов измерений в промышленных процессах

Переменная процесса и метод измерения	Относительная распространенность, %
Температура	34,7
Электрические методы (термопары с потенциометрами, пирометры с милливольтметрами, термометры сопротивления)	20,5
Механические методы (манометрические термометры)	12,4
Радиационные пирометры	1,8
Расход	17,5
Механические методы	14,6
Электрические методы	2,9
Уровень жидкости	11,8
Механические методы	10,2
Электрические методы	1,6
Давление	11,7
Механические методы	9,8
Электрические методы	1,9
Химический состав	5,6
Электрические переменные (ток, напряжение, сопротивление, мощность)	4,6
Влажность	3,5
Скорость (линейная и угловая)	2,1
Плотность и удельный вес	1,8
Влагосодержание	0,7
Другие переменные (вязкость, консистенция, вес, цвет)	6,0
	100

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

Реперные точки

Необходимо стремиться к тому, чтобы при измерении одинаковых температур в различных лабораториях и на различных заводах всегда получались одинаковые результаты. Предпосылкой этого является выбор единых температурных стандартов и шкал. С этой целью отбирают удобные для воспроизведения реперные точки, а температурные интервалы между ними делят на определенное число градусов. Наиболее важными реперными точками считают точки кипения и затвердевания чистых веществ при определенных давлениях.

Фиксированные значения температур для градуировки термометров и пирометров приведены в табл. V-2.

Международная температурная шкала

Международная температурная шкала охватывает область от точки кипения кислорода до самых высоких температур раскаленных тел или пламени. Эта шкала построена на шести удобно воспроизводимых температурах (первичных постоянных точках), для которых приняты определенные численные значения. Специальные интерполяционные формулы связывают значения температур, лежащих между этими точками или выше них, с показаниями стандартных приборов, измеряющих температуру (табл. V-3).

Температура обозначается символом t и выражается в градусах стоградусной шкалы ($^{\circ}\text{C}$).

Международной температурной шкалы ниже точки кипения кислорода не существует, а шкала, опирающаяся

Измерение параметров регулируемого процесса	377	Разработка систем автоматического регулирования, использующих вычислительные устройства	441
Измерение температур	377	Выявление переменных процесса	441
Реперные точки	377	Определение объективных показателей процесса	442
Международная температурная шкала	378	Установление причинно-следственных зависимостей	443
Установление и хранение температурной шкалы	378	Составление схемы автоматического регулирования	444
Термопары	379	Оценка систем автоматического регулирования с вычислительными устройствами	446
Радиационные пирометры	382	Наладка систем автоматического регулирования с вычислительными устройствами	447
Оптические пирометры	383	Основы автоматического регулирования процессов	448
Термометры сопротивления	384	Основная схема автоматического регулирования	448
Манометрические термометры	386	Блок-схемы	448
Биметаллические термометры	387	Система автоматического регулирования теплообменника	449
Стекложидкостные термометры	388	Критерий качества регулирования	450
Пирометрические конусы	388	Запаздывание	450
Измерение давления	388	Динамика процесса	450
Механические чувствительные элементы	388	Реакция систем	452
Приборы с немеханическими чувствительными элементами	391	Факторы, влияющие на регулируемость процессов	454
Преобразование давления в электрический сигнал	394	Функции автоматического регулятора	454
Измерение расходов	396	Виды регулирования (законы регулирования)	456
Измерители расходов по напору (давлению)	396	Двухпозиционное регулирование	456
Расходомеры с переменной площадью проходного сечения	401	Функциональные виды автоматического регулирования	457
Объемные расходомеры	402	Выбор вида регулирования	462
Измерение уровня жидкости	402	Автоматические регуляторы	462
Прямые и косвенные методы	402	Пневматические регуляторы	462
Поплавковые механизмы	403	Гидравлические регуляторы	465
Поплавковые клапаны	403	Электрические и электронные регуляторы	468
Поплавковые уровнемеры магнитного типа	404	Оконечные регулирующие органы	472
Уровнемеры, работающие по принципу выталкивания	405	Корпуса клапанов	472
Гидростатические методы	405	Приводы клапанов	472
Ртутные манометры	406	Позиционеры	475
Анероидные манометры	407	Оснащение процессов приборами	475
Другие системы для измерения уровня жидкости	407	Экономическая эффективность установки аппаратуры управления	475
Аналитические приборы	407	Управление приборным хозяйством	475
Измерения, основанные на электромагнитном излучении	408	Проектирование	478
Измерения, основанные на химических реакциях	408	Обслуживание и ремонт аппаратуры	479
Измерения, основанные на изменениях тока, напряжения или магнитного потока в электрических или магнитных цепях, содержащих исследуемую пробу	409	Управление ректификационными колоннами	483
Измерения, основанные на результатах воздействия тепловой или механической энергии на исследуемые системы	410	Степени свободы в автоматическом управлении	483
Системы измерения pH	410	Регулирование состава	485
Измерения других параметров процессов	411	Диаграмма Мак-Кэба — Тиле	488
Измерительные приборы	422	Приборы для автоматического регулирования процесса сушки твердых материалов	491
Метрологические основы и эксплуатационные требования	422	Примерная классификация параметров регулирования	491
Способы передачи информации	422	Наиболее важные измерения при сушке	492
Физическая природа измерительных сигналов	422	Примеры оборудования сушилок	493
Методы измерения, реализуемые в приборах	423	Проблемы безопасности	494
Эксплуатационные свойства приборов	423	Оснащение теплообменников	495
Индикаторные приборы	425	Система автоматического регулирования теплообменников	495
Записывающие приборы	426	Установка датчиков температуры	495
Пульты для приборов	430	Управляющие клапаны	495
Телеметрия (телеизмерения)	431	Некоторые особые случаи автоматического управления теплообменниками	496
Виды электрической «неподвижной» телеметрии	431	Вывод конденсата из теплообменников	497
Уплотнение канала связи	433	Литература	497
Пневматическая передача в телеметрии	433		
Системы регулирования с вычислительными устройствами	435		
Использование результатов измерений	435		
Вычислительные машины в устройствах регулирования технологических процессов	438		

ТАБЛИЦА V-3

Основные соотношения для международной температурной шкалы

Температурный диапазон, °С	Постоянные величины	Интерполяционные формулы	Стандартный прибор	Примечания
От -182,97 до 630,5	Точка кипения кислорода (-182,970° С)	$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]$	Платиновый термометр сопротивления	Для высокоточных измерений тройная точка воды берется с уточненным значением 0,0100° С
0 - 630,5	Точка плавления льда (0° С) Точка кипения воды (100° С) Точка кипения серы (444,600° С)	$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$ Здесь R_t — сопротивление термометра при температуре t ; R_0 — сопротивление при 0° С; A , B и C — постоянные коэффициенты		
630,5 - 1063	Точка затвердевания сурьмы (630,5° С) Точка затвердевания серебра (960,8° С) Точка затвердевания золота (1063,0° С)	$E = a + bt + ct^2$ где E — э. д. с. стандартной термопары; a , b и c — постоянные коэффициенты	Платинородий-платиновая термопара (90% Pt - 10% Rh)	Температура сурьмы определяется по стандартному термометру сопротивления ¹
1063 - ∞	Точка затвердевания золота (1063,0° С)	$\frac{J_t}{J_{Au}} = \frac{e^{\frac{C_2}{\lambda(t_{Au} + T_0)}} - 1}{e^{\frac{C_2}{\lambda(t + T_0)}} - 1}$ где J_t и J_{Au} — энергии излучения в единице волнового диапазона при длине волны λ , испускаемые за единицу времени с единицы поверхности черного тела при температуре t и при температуре затвердевания золота t_{Au} ; $C_2 = 1,438$ см·град; T_0 — точка плавления льда, °К.	Оптический пирометр	Обычно используется оптический пирометр, хотя стандартом его применение не предусмотрено

¹ Точка затвердевания сурьмы как постоянная точка в СИ не используется. — Прим. ред.

Термопары

История термопары начинается с открытия Зеебека, который в 1821 г. наблюдал появление электрического тока в цепи, представляющей собой два проводника из двух различных металлов, сваренных концами, если точки их соединения имели разные температуры.

Термопара показана схематически на рис. V-1, где A и B — два различных металла, T_1 и T_2 — температуры точек их соединения, I — термоэлектрический ток, который течет в цепи; от провода A ток обычно на-

правляется к термоэлектрически позитивному проводу B , если точка с температурой T_1 является более холодной точкой соединения.

Термоэлектрические законы. Закон гомогенной цепи. Термоток не может возникнуть в гомогенном металле, даже если он будет разделен на отдельные секции.

Закон «промежуточных металлов». Если в электрической цепи из любых твердых проводников температура постоянна от какой-то точки P до другой точки Q , то алгебраическая сумма термо-э. д. с. во всей цепи абсолютно независима от материала проводников,

ТАБЛИЦА V-2

Постоянные точки для градуировки термометров и пирометров

Вещество	Фазовое превращение	Температура, °C
Гелий	Плавление	-271
Водород	Кипение	-253
Кислород	Плавление	-227
Азот	Кипение	-196
Кислород	»	-183
Изопентан	Плавление	-160
Метилциклогексан	»	-126
Сероуглерод	»	-112
Толуол	»	-95,0
Двуокись углерода	Сублимация	-78,5
Хлороформ	Плавление	-63,5
Ртуть	»	-38,9
Тетрахлорметан	»	-22,9
Вода	»	0
Глауберова соль	»	32,4
симм-Дихлорэтилен	Кипение	55,0
Этиловый спирт	»	78,3
Вода	»	100,0
Толуол	»	110,0
Хлорбензол	»	132,0
Бромбензол	»	156,6
Анилин	»	184,5
Нитробензол	»	209,0
Олово	Плавление	231,9
Дифенил	Кипение	254,6
α -Нафтол	»	278,0
Дифениламин	»	302,0
Свинец	Плавление	327,4
Ртуть	Кипение	357,3
Двухромовокислый калий	Плавление	397,5
Цинк	»	419,4
Сера	Кипение	444,6
Хлористый свинец	Плавление	501,0
Азотнокислый кальций	»	561,0
Сурьма	»	630,0
Алюминий	»	658,7
Сернокислый марганец	»	700,0
Хлористый калий	»	770,3
Хлористый натрий	»	800,4
Углекислый натрий	»	852,0
Сернокислый натрий	»	884,7
Серебро ¹	»	960,5
Золото ¹	»	1063
Сернокислый калий	»	1069
Медь	»	1083
Двуокись олова	»	1127
Кремнекислый литий	»	1201
Фтористый барий	»	1280
Никель	»	1452
Кобальт	»	1480
Железо	»	1530
Палладий	»	1549
Платина	»	1755
Окись алюминия	»	2000
Вольфрам	»	3400

на измерение сопротивления нескольких капсюлеобразных платиновых термометров, отградуированных с помощью газового термометра, хранится в Национальном бюро стандартов (Вашингтон). Эта шкала распространяется по другим лабораториям с помощью градуировки подобных термометров методом сравнения. Для температурной области приблизительно от 10 до 4°K соответствие международной шкале можно получить лишь с помощью газового термометра. Для измерения температур от 4,2 до 1°K в лабораториях всего мира используют давление паров гелия. В интервале ниже 1°K магнитные свойства парамагнитных кристаллов служат как средством достижения температур внутри этого диапазона, так и средством определения температуры кристалла.

Установление и хранение температурной шкалы

Установление и хранение температурной шкалы не являются прерогативой Национального бюро стандартов; необходимо, чтобы это делалось также в промышленности и в исследовательских лабораториях. Выше было дано определение международной температурной шкалы, на которой основываются практически все температурные измерения. Посредством применения приборов, пригодных для воспроизведения постоянных температурных точек, и градуировки трех стандартных измерительных приборов, используемых для интерполирования между этими точками, может быть установлена первоначальная температурная шкала. Выполнение этого мероприятия требует значительного времени и больших капитальных затрат на оборудование.

В лабораториях для хранения температурных шкал обычно используют три различных метода (или их комбинации).

Первый метод предусматривает установку оборудования для первоначальной градуировки трех стандартных измерительных приборов: термометра сопротивления, платинородий-платиновой термометры и оптического пирометра. Этот метод обеспечивает первичную градуировку всех трех приборов и возможность повторения ее в случае необходимости.

Вторым и наиболее часто применяемым методом является представление трех стандартных приборов в Национальное бюро стандартов для градуировки. В этом случае платиновый термометр сопротивления и платинородий-платиновая термометра могут быть подвергнуты первичной градуировке; оптический пирометр подвергается градуировке или поверке по показаниям эталонного оптического пирометра Национального бюро стандартов. Приборы, которые градуируются или поверяются таким способом, а также отградуированные способом, описанным выше, становятся образцовыми и используются, в свою очередь, для поверки вторичных приборов (термопар или стеклянно-жидкостных термометров).

Третий метод основывается на использовании так называемых вторичных образцовых приборов — термопар из благородных металлов и стеклянно-жидкостных термометров. Такие приборы снабжаются свидетельством о поверке, выполненной Национальным бюро стандартов, если они удовлетворяют определенным требованиям и могут быть использованы для воспроизведения температурной шкалы¹.

¹ В СИ не плавление, а затвердевание. — Прим. ред.

¹ Considine (ed.), Process Instruments and Controls Handbook, New York, 1957.

обычно обеспечивают удовлетворительную защиту для термопар из благородных металлов. Пленки окиси на проводах термопары служат в некоторой степени

защитной трубки медленным потоком воздуха или инертного газа.

ТАБЛИЦА V-5

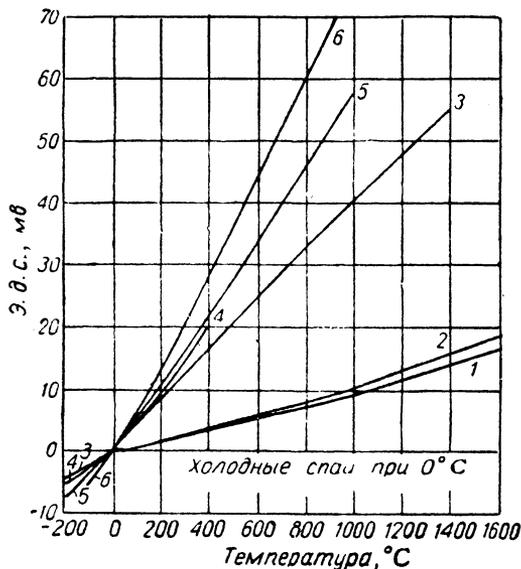


Рис. V-2. Зависимость э. д. с. от температуры для наиболее распространенных типов термопар:

1 — платинородий (90% Pt, 10% Rh) — платина; 2 — платинородий (87% Pt, 13% Rh) — платина; 3 — хромель — алюмель; 4 — медь — константан; 5 — железо — константан; 6 — хромель — константан.

защитой от загрязнения металлическими парами. Металлические трубки, которые обеспечивают достаточ-

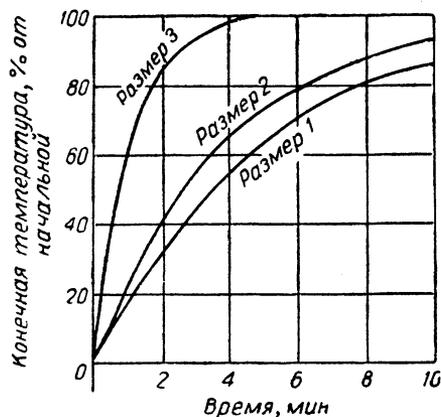


Рис. V-3. Характеристика незащищенных термопар различных размеров в неподвижном воздухе при 120°С.

Различные методы образования спая термопары

Тип термопары	Метод образования спая	Флюс
Платинородий — платина	Кислородогазовая сварка	—
	Электродуговая сварка	—
Хромель-Р — алюмель	Кислородацетиленовая или кислородогазовая сварка	Бура, флюорит
	Электродуговая сварка	—
	Пайка серебром	Бура
	Электрическая сварка	—
Железо — константан	Кислородацетиленовая или кислородогазовая сварка	Бура, флюорит
	Электродуговая сварка	—
	Пайка серебром	Бура
	Низкотемпературная пайка	Канифоль
Медь — константан	Электрическая сварка	—
	Электродуговая сварка	—
	Пайка серебром	Бура
Хромель-Р — константан	Низкотемпературная пайка	Канифоль
	Электрическая сварка	—
	Пайка серебром	Бура
Хромель-Р — константан	Кислородацетиленовая или кислородогазовая сварка	Бура, флюорит
	Электродуговая сварка	—
	Пайка серебром	Бура

Керамические трубки, удовлетворяющие требованиям непроницаемости для газов, изготавливают из высокоогнеупорного фарфора («Силлиманит», «Муллит») для температур примерно до 1500°С, из плавенной двуокиси кремния для температур до 1050°С в окислительной атмосфере и из стекла пирекс для температур до 500°С.

Материал для изготовления металлических трубок выбирают в зависимости от вида коррозии, вероятной в данных условиях. Трубки из хромоникелевой стали устойчивы в окислительной атмосфере, трубки из хромистой стали — в атмосфере, содержащей двуокись серы, а никелевые и железные трубки — в горячем каустике и в ваннах с расплавленным металлом соответственно.

ную защиту в окислительной атмосфере, могут оказаться непригодными в присутствии больших количеств топочных газов. В некоторых установках целесообразно предусматривать вентиляцию внутреннего объема

Коррозионная характеристика термопар

расположенных между точками P и Q ; эта сумма будет такой же, как если бы точки P и Q находились в контакте.

Закон последующих, или промежуточных, температур. Термо-э. д. с., генерируемая термопарой из однородных металлов с температурами в точках соединения (спаях) T_1 и T_3 , равна алгебраической сумме термо-э. д. с. двух термопар: одной с температурами в точках соединения T_1 и T_2 и другой с температурами в точках соединения T_2 и T_3 .

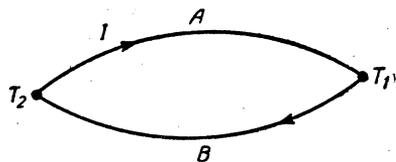


Рис. V-1. Простейшая электрическая цепь термопары.

Размер термопары. Чем меньше сечение провода и площадь спая термопары (при заданном материале), тем сильнее реакция на изменение температуры. Во многих случаях механическая прочность самих проводов используется при креплении термопары. Чем больше диаметр проводов, тем больше, при прочих равных условиях, влияет эффект теплопроводности на температуру спая. Это влияние может быть существенным, в частности, при условии, когда допускается только небольшое погружение термопары.

Следует иметь в виду, что тонкие провода легко скручиваются и ломаются. В случае возникновения коррозии термопары с толстыми проводами обычно требуют замены реже, чем термопары с тонкими проводами.

Выбор термопары. Для выбора нужной термопары в зависимости от ее измерительных и антикоррозионных свойств можно использовать табл. V-4 и V-5, рис. V-2 и V-3.

ТАБЛИЦА V-4

Наиболее употребительные типы термопар и интервалы температур, в которых они используются

Положительный элемент	Отрицательный элемент	Рабочий температурный диапазон, °C	Максимальная температура, °C
90% Pt—10% Rh	Платина	0—1450	1700
87% Pt—13% Rh	Платина	0—1450	1700
Хромель-Р	Алюмель	От —200 до 1100	1200
Железо	Константан	От —200 до 750	1000
Медь	Константан	От —200 до 350	600
Хромель-Р	Константан	От —100 до 1000	1000

Спай термопары. Измерительный спай термопары может быть образован любым методом, обеспечивающим необходимую прочность и электрический контакт. Провода могут быть либо скручены вместе перед паянием

Тип термопары	Влияние температуры и газовой среды
Платинородий — платина	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сопротивление окислительной среде—очень хорошее 2. Сопротивление восстановительной среде—слабое 3. Платина корродирует при температуре выше 1000° С. Следует использовать в герметических керамических трубках
Хромель-Р—алюмель	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сопротивление окислительной среде—от хорошего до очень хорошего 2. Сопротивление восстановительной среде—слабое 3. Подвержена влиянию серы, SO₂ и H₂S
Железо—константан	<ol style="list-style-type: none"> 1. Окислительная и восстановительная среды очень мало влияют на точность измерений. Лучше всего использовать в сухих средах 2. Сопротивление окислению: при температуре до 400° С хорошее, но слабое при температуре выше 700° С 3. Сопротивление восстановительной среде—хорошее (до 400° С) 4. Подвержена влиянию кислорода, серы, влажности
Медь—константан	<ol style="list-style-type: none"> 1. Медь окисляется при температуре выше 400° С, константан—при температуре выше 600° С. Примеси меди сильно влияют на градуировку 2. Сопротивление окислительной и восстановительной средам—хорошее 3. Подвержена влиянию паров кислот
Хромель-Р—константан	<ol style="list-style-type: none"> 1. Хромель подвержен влиянию сернистой атмосферы 2. Сопротивление окислительной и восстановительной средам—хорошее

или сваркой с целью увеличения прочности спая, либо могут быть сварены встык (табл. V-6). Если провода были изогнуты при наматывании на катушку, их следует тщательно выпрямить. При этой операции нужно избегать ударов, чрезмерного скручивания и изгибания проводов. Неаккуратная обработка может изменить термо-э. д. с. или повредить поверхность термопары.

Защитные чехлы (трубки) термопары. Платинородий-платиновые термопары, особенно чувствительные к загрязнению, должны быть защищены с помощью керамических трубок, непроницаемых для газов и паров при всех рабочих температурах. Металлические трубки

условия требуют автоматического измерения, непрерывной записи или возможности регулирования процессов, всегда применяются радиационный пирометр.

Температурные пределы измерений. Общепринятые конструкции радиационных пирометров применяются для измерения температуры между 200°С и любой другой высокой температурой. Пирометры для измерения низкой температуры имеют нормальный диапазон измерений от 50 до 370°С и могут быть использованы в некоторых случаях ниже 0°С. Одним и тем же прибором не следует измерять температуры в широком диапазоне из-за непостоянства чувствительности пирометра при разных температурах.

Ниже приводится примерная классификация, в которой указаны установленные диапазоны измерений, рекомендуемые для пирометров различных типов:

Диапазон пирометра	Пределы температур, °С
Верхний	80—и выше
Промежуточный	600—1400
Нижний промежуточный	200—650
Нижний	50—200

Так как радиационный пирометр вырабатывает сигнал, пропорциональный примерно четвертой степени температуры, то шкала измерительного прибора будет сжата у нижнего предела и растянута у верхнего. Вследствие этого обычно требуемые удобочитаемость шкалы и высокая чувствительность будут получены только на верхних 40% диапазона измерения прибора. Поэтому радиационный пирометр и вторичный прибор, предназначенные для конкретных условий, следует подбирать таким образом, чтобы измеряемые температуры оказались внутри интервала от 60 до 100% диапазона измерения приборов.

Непосредственное наблюдение объекта (нагретого тела). Этот метод применим в тех случаях, когда может быть обеспечено беспрепятственное наблюдение и требуется прямое измерение температуры объекта.

Если средой между объектом и пирометром является чистый воздух (например, объектом служит болванка в индукционной печи), пирометр можно использовать без дополнительного оборудования.

Если между пирометром и объектом происходит поглощение лучистой энергии или сжигание газов, пирометр должен иметь продуваемую чистым воздухом наблюдательную трубу. Наблюдательная труба может быть выполнена из сплава инконель, если она подвергается воздействию температур до 1100°С. Для температур до 2500°С применяются керамические трубы. Труба помещается на расстоянии 25—50 мм от объекта. Воздух, поступающий в трубу, должен быть чистым и сухим (каждый пирометр должен быть снабжен собственным воздушным фильтром). Необходимо использовать минимальное количество воздуха, чтобы избежать охлаждения объекта. При давлении в печи, незначительно превышающем атмосферное, поток от 0,57 до 0,85 м³/ч будет достаточным. Если давление очищающего воздуха нестабильно, можно применить недорогой регулятор и показывающий расходомер для поддержания постоянной скорости продувки.

Наблюдение через трубу, встроенную в объект. При этом методе пирометр обращен внутрь закрытой трубы, вставленной в камеру, где должна быть измерена температура. Этот метод применяют в тех случаях, когда непосредственному наблюдению мешают пламя, дым или пыль. Размеры труб выбирают так, чтобы пирометр «видел» только дно трубы. Для этой цели обычно

используют керамические трубы (в той части трубы, где температура будет ниже 260°С, можно применить сварное железо). Керамические трубы обладают заметной пористостью, поэтому во избежание загрязнения оптической системы печными газами их необходимо продувать.

Оптические пирометры

Оптическими пирометрами измеряют интенсивность светового потока, испускаемого в узком интервале длин волн видимого спектра. Температура объекта определяется по интенсивности излучения. Эта интенсивность измеряется посредством фотометрического сравнения относительной яркости объекта неизвестной температуры и стандартного источника света; в качестве последнего применяется вольфрамовая нить лампы накаливания, изготовленной для этой цели. Сравнение яркости производится наблюдателем; точность измерения зависит от чувствительности человеческого глаза, способного различать разницу в яркости двух соприкасающихся поверхностей одинакового цвета. Для повышения чувствительности оптическая система пирометра снабжается стеклянным светофильтром, почти монохроматическим для длины волны красного излучения (0,65 мкм). Чувствительность оптического пирометра достаточно высока благодаря тому, что отношение изменения яркости исследуемого источника (рассматриваемого через светофильтр) к соответствующему изменению его температуры очень велико. При благоприятных условиях яркость может фиксироваться через доли процента.

В современных оптических пирометрах сравнение яркости производится одним из двух методов: 1) изменением тока, проходящего через нить стандартного источника света, до тех пор, пока его яркость не станет такой же, как яркость изображения объекта; 2) изменением наблюдаемой яркости изображения оптическими средствами до тех пор, пока она не станет такой же, как у нити стандартной лампы накаливания, через которую протекает ток постоянной величины. Измерение яркости производится путем рассматривания нити стандартной лампы на фоне изображения нагретой поверхности объекта; при совпадении их яркости наблюдается «исчезновение нити».

Применение. Оптический пирометр применяется в лабораториях и на промышленных установках для измерения температур выше 750°С. Высокая точность, которую можно получить при тщательных измерениях, позволяет применять эти пирометры в качестве стандартных приборов для экстраполяции температур международной шкалы от точки затвердевания золота вверх, а также использовать их в качестве вторичных образцовых приборов в лабораторной практике. Применение оптического пирометра в промышленности определяется его способностью точно измерять температуру удаленных и труднодоступных объектов. Этот пирометр используется также для градуировки других приборов, измеряющих температуру (радиационные пирометры и термопары в защитных трубках).

Оптическим пирометром управляют вручную, поэтому измерения, сделанные с его помощью, не могут непрерывно записываться или использоваться для автоматического управления.

Область температурных измерений. Пределы применения оптических пирометров — от 750 до 2900°С. При помощи специальных поглощающих экранов шкала может быть увеличена до 5500°С. Часто приборы

Температурные пределы, приведенные в табл. V-7, обеспечивают в общем приемлемый по длительности срок службы защитных трубок.

ТАБЛИЦА V-7

Максимальные рабочие температуры для защитных трубок

Материал трубки	Максимальная рекомендуемая температура, °C
Металлы	
Высокремнистое железо	425
Катаная сталь	550
Углеродистая сталь	550
Литое железо	700
Кованое железо	700
Хромоникелевая нержавеющая сталь (Cr 18, Ni 8)	950
Хромистое железо (Cr 28)	1100
Хромель-Т	1100
Нихром	1100
Никель	1100
Инколой (Cr 20, Ni 32, Fe 48)	1100
Инконель	1260
Керамические материалы	
Плавная двуокись кремния	1050
Огнеупорная глина	1550
Силиманит	1550
Муллит	1550
Двуокись кремния	1600
Карбид кремния	1650

Радиационные пирометры

Метод измерения температуры объекта путем определения количества излучаемой им энергии называют «радиационной пирометрией». Приборы, реализующие этот метод, можно подразделить на две группы: 1) оптические пирометры, т. е. приборы, в которых яркость горячего предмета визуально сравнивается с яркостью стандартного источника света; 2) радиационные пирометры, т. е. приборы, которые измеряют количество энергии, излучаемой с единицы поверхности в относительно широком диапазоне длин волн. Последние ранее классифицировались как универсальные радиационные пирометры, так как теоретически они чувствительны ко всему спектру энергии, излучаемой горячим объектом. В действительности эти приборы чувствительны к ограниченному волновому диапазону и должны быть названы радиационными пирометрами частичного излучения (обычно их называют просто радиационными пирометрами).

Принцип работы. Радиационные пирометры измеряют интенсивность радиации, излучаемой горячим телом в некотором диапазоне длин волн. Уравнение Стефана — Больцмана показывает, что количество энергии, излучаемой абсолютно черным телом с единицы поверхности, является функцией разности четвертых степеней абсолютных температур горячего источника и приемника. Таким образом, температура приемника (радиационного пирометра) теоретически связана с температурой горячего излучателя.

Схема радиационного пирометра показана на рис. V-4; она включает в себя линзовую (или зеркальную) оптическую систему для фокусирования излучаемой энергии на детектирующий элемент и детектор. Детектором может служить фотозащитный элемент, вакуумный термоэлемент, термопары или другой преобразователь, позволяющий наблюдать изменение какой-либо электрической величины в зависимости от изменения его собственной температуры. Оптическая система и детектор должны быть защищены кожухом; кроме того, нужен вспомогательный (вторичный) прибор для измерения сигнала пирометра.

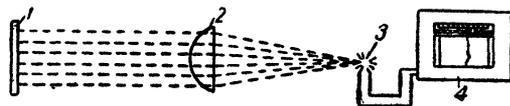


Рис. V-4. Радиационный пирометр:

1 — раскаленный объект; 2 — линза; 3 — термоэлемент; 4 — записывающий прибор.

Температура детектора зависит не только от излучателя, температура которого измеряется, но также от теплового равновесия, установившегося между детектором и окружающей его средой. Таким образом, поглощая энергию горячего объекта, детектор одновременно теряет тепловую энергию за счет излучения, теплопроводности и конвекции, нагревая кожух, окружающую атмосферу и опоры прибора. Равновесие зависит также от температуры кожуха и, следовательно, от окружающей температуры. Значит, необходимо, чтобы температура кожуха была стабилизирована или чтобы имелось устройство, компенсирующее изменение его температуры. Как следствие всех этих факторов, в промышленных радиационных пирометрах закон Стефана — Больцмана обычно не соблюдается, и их градуировочные уравнения являются эмпирическими.

Детектирующими элементами для наиболее широко применяемых промышленных пирометров служат термопары, составленные из нескольких термопар, соединенных последовательно. Полупроводниковые, платиновые и медные элементы болометров и фотозащитные различных типов также могут служить в качестве детекторов.

Выходом детектора радиационного пирометра является, как правило, электрический сигнал, например, э. д. с. или изменение электрического сопротивления, которые могут быть непосредственно измерены с помощью обычных потенциометров, милливольтметров или мостов. Таким образом, измерения могут производиться автоматически, обеспечивая непрерывную регистрацию и вырабатывая управляющий сигнал для последующего использования его в системах регулирования процессов.

Применение. Радиационные пирометры применяются для измерения температуры в условиях, когда трудно или невозможно использовать другие приборы. Например: 1) температура выше верхнего предела рабочего диапазона термопар; 2) окружающая среда загрязняет термопары или ограничивает продолжительность срока их службы; 3) излучающий объект движется; 4) доступ к объекту затруднен; 5) объект может быть поврежден при соприкосновении с датчиком (термопарой или термометром сопротивления); 6) нужно измерять среднюю температуру большой поверхности. Хотя в этих условиях применим и оптический пирометр, следует иметь в виду, что им управляет человек. Если

Зависимость сопротивления от температуры для некоторых металлов

Металл	Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^8, \text{ ом} \cdot \text{ м}$	Относительное сопротивление R_t/R_0 при температуре											
		-200° C	-100°	0°	100°	200°	300°	400°	500°	600°	700°	800°	900° C
Алюмель ¹	28,1	—	—	1,000	1,239	1,428	1,537	1,637	1,723	1,814	1,899	1,982	2,066
Медь	1,56	0,117	0,557	1,000	1,431	1,852	2,299	2,747	3,210	3,695	4,208	4,752	5,334
Железо	8,57	—	—	1,000	1,650	2,464	3,485	4,716	6,162	7,839	9,790	12,009	12,790
Никель	6,38	—	—	1,000	1,663	2,501	3,611	4,847	5,398	5,882	6,327	6,751	7,156
Платина	9,83	0,177	0,599	1,000	1,392	1,773	2,142	2,499	2,844	3,178	3,500	3,810	4,109
Серебро	1,50	0,176	0,596	1,000	1,403	1,827	2,256	2,698	3,150	3,616	4,094	4,586	5,091

¹ Состав: Ni 95, Mn 2, Al 2, Si 1, Fe 0,5.

Измерения средней температуры. В этом случае обмотка сопротивления занимает некоторую часть защитной трубы. Эта часть может иметь протяженность от 25 до 100 мм и более. Такая конструкция используется для измерения температуры жидкости в сосудах или трубопроводах, например, охлаждающей жидкости и смазочного масла в двигателях самолетов.

Для измерения средней температуры в больших сосудах с жидкостью (например, цистерны с нефтепродуктами) применяют другие конструкции. Термометр имеет длинную, равномерно намотанную геликоидальную обмотку из тонкого медного провода, заделанную в тонкостенную гибкую пластиковую трубку. С целью механической защиты эта трубка помещается в гибкий металлический шланг, натянутый от крышки до дна резервуара. Так как обмотка сопротивления равномерно распределена по всей высоте столба жидкости, то сопротивление обмотки пропорционально средней температуре жидкости в резервуаре (даже при наличии значительного температурного градиента от дна до верха сосуда).

Термометры сопротивления для открытого воздуха. Эти термометры используют для измерения температуры атмосферы. Конструкция их зависит от того, изучается ли неподвижная атмосфера или движущаяся с высокой скоростью. Если объектом измерения является неподвижная или медленно движущаяся атмосфера, а измеритель температуры должен быстро реагировать на изменение последней, термометр сопротивления выполняется в виде геликоидальной катушки из изолированной проволоки, установленной на легкой поддерживающей раме. Для измерения быстро меняющихся параметров воздуха во время полета скоростного самолета термометр сопротивления должен быть защищен от влияния солнечной радиации и от ошибок, вызванных трением воздуха о термометр.

Измерение температуры поверхности. Термометры сопротивления для измерения температуры поверхности изготавливаются в виде небольшой вафли. Такой термометр имеет обмотку из тонкой никелевой проволоки, проложенной между двумя листами бумаги. Размеры термометра: общая толщина ~0,125 мм, ширина 12,5 мм, длина 37,5 мм. Два более толстых провода образуют выводы. Плотный скрепленный с поверхностью прибор может измерять ее температуру в диапазоне от -75 до 200° C с погрешностью ±0,5° C. Благодаря

малой массе и хорошему тепловому контакту, термометр обладает очень большой скоростью реакции на изменение температуры.

Соединения термометров сопротивления. Обычно используются тремя методами электрического соединения обмотки сопротивления с измерительным прибором.

Двухпроводная схема. Этот метод, показанный на рис. V-7, наиболее прост. Два относительно низко-

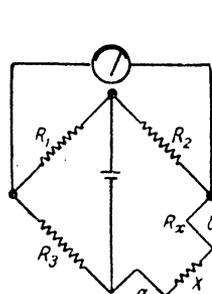


Рис. V-7. Двухпроводная схема соединения термометра сопротивления с измерительным прибором.

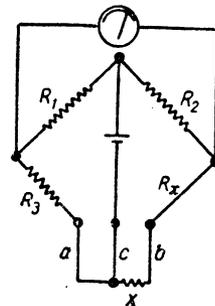


Рис. V-8. Трехпроводная схема соединения термометра сопротивления с измерительным прибором.

омных подводящих проводничка *a* и *b* соединяют обмотку термометра сопротивления с измерительной аппаратурой. В этом случае применяются медные соединительные провода. На рисунке показана схема Уитстона.

Трехпроводная схема. Этот метод, показанный на рис. V-8; наиболее практичен и широко используется в промышленности.

Четырехпроводная схема. Этот метод применяется только тогда, когда требуется самая высокая степень точности, например, при использовании платинового термометра сопротивления в качестве лабораторного образцового прибора. Метод требует двукратного подключения термометра, как показано на рис. V-9.

снабжаются двумя или тремя поддиапазонами измерений (например, 750—1250°С, 1100—1800°С и т. д.).

Величина объекта и расстояние до него. Результаты измерений, выполненных оптическим пирометром, не зависят от расстояния между объектом и наблюдателем при условии, что изображение объекта достаточно велико, чтобы обеспечить надежное сравнение его яркости с яркостью нити. Необходимо, чтобы пучок лучей от нагретой поверхности объекта и до объектива пирометра проходил беспрепятственно.

Термометры сопротивления

Термометры сопротивления изготавливают из металлов, которые при изменении температуры заметно меняют свое электрическое сопротивление. В качестве материала для промышленных термометров сопротивления обычно используют платину, медь или никель. Однако способность изменять сопротивление в зависимости от температуры присуща также и полупроводникам; вполне возможно, что по мере усовершенствования полупроводниковых материалов они найдут широкое применение в термометрах сопротивления.

Вторичным измерительным прибором для термометра сопротивления является мост, измеряющий электрическое сопротивление и проградуированный в единицах температуры. В этом отношении термометр сопротивления не отличается от многих электрических датчиков, которые преобразуют в электрическую величину другие физические величины, например, давление.

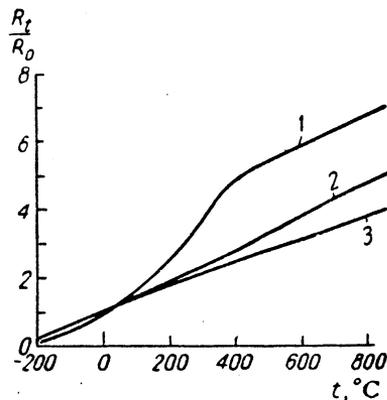


Рис. V-5. Типичные зависимости сопротивления от температуры для платиновой, медной и никелевой проволок, используемых в термометрах сопротивления:

1 — никель; 2 — медь; 3 — платина; R_t/R_0 — относительное изменение сопротивления (R_0 — сопротивление при 0°С).

Некоторые из распространенных мостовых схем могут быть использованы совместно с термометром сопротивления: мост Уитстона, мост Кэллендера — Гриффитса; двойной мост со скользящим контактом, емкостный мост и мост Мюллера. Эти мосты могут работать как на постоянном, так и на переменном токе и могут быть уравновешенными или неравновесными.

Температурный коэффициент сопротивления. Изменение электрического сопротивления вещества с изменением температуры называется «температурным коэф-

фициентом сопротивления». Коэффициент этот выражается в град⁻¹; он имеет различные значения при разных температурах. Для большинства металлов температурный коэффициент положительный. Для чистых металлов изменение сопротивления в зависимости от температуры практически линейно, во всяком случае на кривой сопротивление — температура всегда можно выбрать прямолинейный участок.

Кривые температурной зависимости для платины, меди и никеля приведены на рис. V-5.

Конструкция термометра сопротивления. Конструктивные особенности термометров сопротивления зависят от их назначения.

Обычная конструкция (рис. V-6) представляет собой металлическую трубу, нижний конец которой запаян, в то время как на верхнем конце укреплена головка или концевой колпачок. Обмотка сопротивления, расположенная в нижнем конце трубы, должна находиться в хорошем термическом контакте с внутренней поверхностью этой трубы, чтобы обеспечить хорошую передачу тепла от измеряемой среды для ускорения реак-

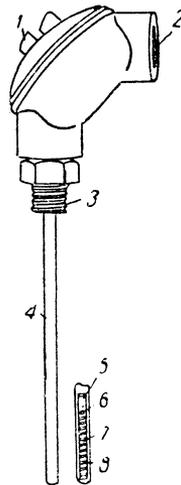


Рис. V-6. Термометр сопротивления промышленного типа:

1 — герметичная крышка; 2 — резьбовое отверстие для вывода соединительных проводов; 3 — резьба для установки термометра; 4 — кожух термометра из нержавеющей стали; 5 — керамическая втулка; 6 — выводные клеммы обмотки; 7 — поддерживающая алюминиевая спираль; 8 — обмотка термометра в виде двойной геликоидальной спирали.

ции термометра. По очевидным причинам обмотка должна быть электрически изолирована от трубы. Поэтому одной из основных конструктивных проблем является достижение необходимой электрической изоляции наряду с минимальной термической изоляцией.

При конструировании термометра сопротивления выбираются: 1) форма, 2) размер, 3) материал обмотки сопротивления, 4) изоляция обмотки, 5) тип обмотки. Первые два фактора определяют возможности размещения термометра внутри объекта, где измеряется температура.

Сопротивления (при различных температурах) некоторых металлов и сплавов, используемых для изготовления обмоток термометров сопротивления приведены в табл. V-8.

Применение. Точечные измерения температуры. В большинстве случаев термометры сопротивления используют для измерения температуры в какой-либо одной точке, а не для измерения средней температуры. При этом обмотку сопротивления обычно располагают внутри защитной трубы на расстоянии 25—50 мм от ее нижнего конца. Конец трубы герметически закрыт для защиты обмотки от загрязнения или повреждения. Верхний конец трубы спаян или сварен с головкой, которая используется для вывода проводов. Если обмотка сопротивления изготовлена в форме плоской рамки или кольца, нижняя часть защитной трубы может быть сделана также плоской для улучшения термического контакта. Такая конструкция более чувствительна к изменениям температуры.

пружины Бурдона. Пружина, как и в первом случае, будет увеличиваться в объеме с повышением давления.

Манометрические термометры классифицируются приборостроительной промышленностью США следующим образом:

Жидкостный наполнитель	класс I
Наполнитель — пар	класс II
Наполнитель — газ	класс III
Ртутный наполнитель	класс IV

Биметаллические термометры

Биметаллический термометр представляет собой две (а иногда и больше) скрепленные вместе пластины из разных металлов; вследствие различия коэффициентов теплового расширения этих металлов форма термометра изменяется при изменении температуры.

Если один конец биметаллической прямой пластины закреплен, то другой конец отклоняется прямо пропорционально изменению температуры и квадрату длины пластины и обратно пропорционально ее толщине. Если биметаллическая пластина имеет форму геликоидальной пружины или спирали, причем один конец ее закреплен, то другой конец при повышении температуры будет вращаться вокруг оси спирали. Угловое отклонение незакрепленного конца прямо пропорционально изменению температуры и длине пластины и обратно пропорционально ее толщине.

Линейные и угловые перемещения незакрепленных концов пластин биметаллических термометров пропорциональны температуре на небольшом участке ха-

рактеристической кривой. Поэтому при необходимости создать термометр с равномерной шкалой приходится резко ограничивать пределы измерения.

Типы элементов. В биметаллических термометрах используются в основном три типа элементов: плоская спираль, однорядная и многорядная геликоидальные пружины (рис. V-11).

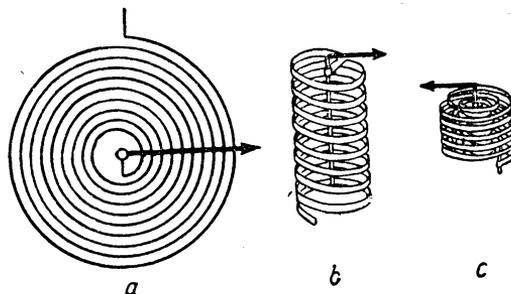


Рис. V-11. Типы элементов, используемых в биметаллических термометрах:

a — плоская спираль; *b* — однорядная геликоидальная пружина; *c* — многорядная геликоидальная пружина.

Диапазоны измерения температур. Биметаллические термометры изготавливаются для диапазонов измерения от 550 до -180°C и ниже. Однако при очень низких температурах величина отклонения конца пластины на 1°C существенно уменьшается. Биметаллические термометры, работающие при высоких температурах (от

ТАБЛИЦА V-9

Характеристики стеклянно-жидкостных термометров

Класс и тип	Температурный диапазон, $^{\circ}\text{C}$	Точность измерения	Примечание
Палочные: обычный	От -200 до 360	Обычно 1 деление шкалы	Лабораторные исследования
метастатический (Бекмана)	От -30 до 200	От $\pm 0,002$ до $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$	Показания шкалы от 0 до 5 или 6°C ; цена деления $0,01^{\circ}\text{C}$. Шкала может соответствовать любой заданной температуре. Используется в лабораторных испытаниях для контроля температурных изменений или отклонений от известной температуры
медицинский лабораторный или химический	От 35 до 42 От -200 до 650	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ Обычно 1 деление шкалы	Измерение температуры тела Для химического эксперимента. Изготавливаются также с защитной оболочкой (броней)
минимальный или максимальный	От -40 до 200	1–2 деления шкалы	Топки, печи для обжига, метеорология
С вложенной шкалой: колкаобразный кожух	От -20 до 260	Обычно 1 деление шкалы	Измерение температуры масла в резервуаре
кожух жестяной, медный или из нержавеющей стали	От -40 до 200	То же	Пивоварение, кондитерское производство, пакугаузы, домашнее хозяйство
Промышленные (защищенные): наполненный спиртом	От -100 до 50	» »	Нефтяная, химическая, холодильная и другие отрасли промышленности
наполненный ртутью	От -40 до 650	» »	То же

Манометрические термометры

Манометрические термометры предназначены для преобразования измеряемой температуры в сигнал давления, который может быть использован для записи

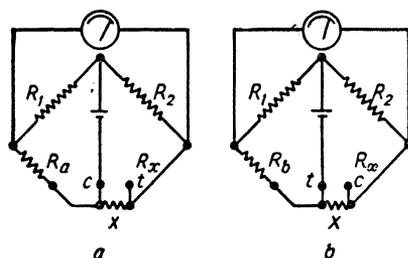


Рис. V-9. Четырехпроводная схема соединения термометра сопротивления с измерительным прибором.

температуры на некотором расстоянии от точки измерения (рис. V-10).

В некоторых конструкциях (в виде исключения) термобаллоном системы является сама геликоидальная трубчатая пружина (пружина Бурдона).

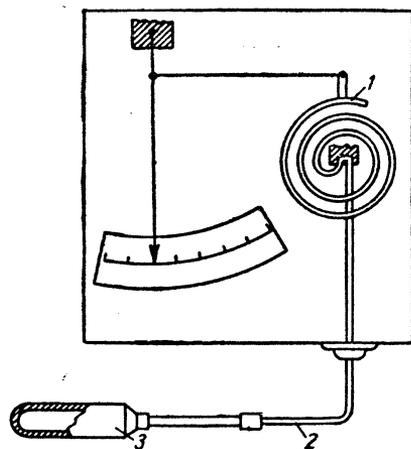


Рис. V-10. Манометрический термометр:
1 — пружина Бурдона; 2 — капилляр; 3 — баллон.

Воспринимающий элемент (баллон) термометра наполнен газом или жидкостью; с изменением температуры изменяются их физические характеристики (давление, объем). Это изменение передается пружине Бурдона через капиллярную трубку. Пружина Бурдона воспринимает сигнал от термобаллона, причем свободный конец ее перемещается в зависимости от изменения его температуры. Это перемещение через кинематическую цепь передается показывающей стрелке или перу, записывающему показания температуры. Угловое перемещение свободного конца пружины часто используется непосредственно для перемещения стрелки по круглой шкале или для целей управления.

Преимущества манометрических термометров. 1. Простота устройства рассматриваемых измерителей температуры предопределяет прочность конструкции, от-

чего возможность повреждения или аварии при погрузке, установке и эксплуатации сводится к минимуму. Эти приборы редко нуждаются в ремонте. Однако стоимость замены таких систем обычно выше, чем стоимость замены простейших электрических приборов.

2. Простота устройства обеспечивает дешевизну конструкции.

3. При использовании термометров в промышленных процессах чувствительность, быстродействие и относительная погрешность (выраженная в процентах от верхнего предела шкалы) обычно эквивалентны тем же параметрам других высококачественных приборов промышленного типа, измеряющих температуру (см. «Недостатки», пункт 5).

4. Капилляр дает возможность значительного удаления точки измерения от места расположения показывающего прибора. Несмотря на то, что общая длина капилляра обычно ограничивается 75 м, встречаются успешно работающие системы длиной до 120 м. Однако часто экономически выгоднее для перенесения индикатора сигнала на расстояние свыше 30 м применять дополнительную дистанционную передачу.

5. Система автономна, так что нет необходимости во вспомогательном источнике энергии: ни в сжатом воздухе, ни в электричестве. Однако такие системы часто комбинируются с пневматической или электрической системой передачи, в которой требуется дополнительный источник энергии.

6. Система обеспечивает мощность, достаточную для управления не только указателем-стрелкой или записывающим пером, но также и регулирующим механизмом.

Недостатки манометрических термометров. 1. Размеры баллона могут оказаться слишком большими по сравнению с объемом, в котором измеряется температура.

2. Минимальный диапазон измеряемых температур не может быть таким малым, как в электрических системах для измерения температуры.

3. Наибольшие измеряемые температуры меньше, чем в некоторых электрических системах.

4. В случае аварии в системе все устройство целиком должно быть заменено или отремонтировано. В электрических системах датчик, соединительные провода и измерительный прибор могут быть заменены по отдельности.

5. Чувствительность и абсолютная точность измерения температуры ниже, чем у термометров сопротивления применяемых в узком диапазоне измерения с вторичным электрическим прибором.

6. Взаимное удаление измерительного элемента (баллона) и трубчатой пружины более чем на 75 м обычно не рекомендуется.

Классификация манометрических термометров. Рассматриваемые измерители температур можно разделить на два основных типа в зависимости от того, что воспринимает пружина Бурдона: изменение объема или изменение давления.

В первом случае вся система заполняется жидкостью. С повышением температуры жидкость расширяется интенсивнее, чем металл, и приращение ее объема передается пружине Бурдона. Повышение давления внутри системы, обусловленное изменением объема жидкости, вызывает изменение внутреннего объема пружины Бурдона и, следовательно, перемещение ее незакрепленного конца, связанного со стрелкой.

Системы второго типа заполняются газом или низкокипящей жидкостью. Изменение давления газа или пара с изменением температуры баллона передается

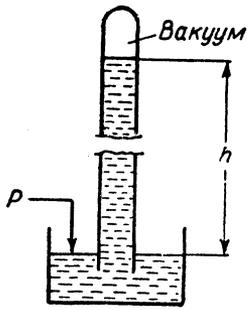


Рис. V-12. Чашечный барометр.

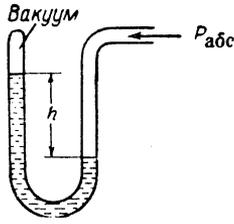


Рис. V-13. Манометр для измерения абсолютного давления с запаянным концом.

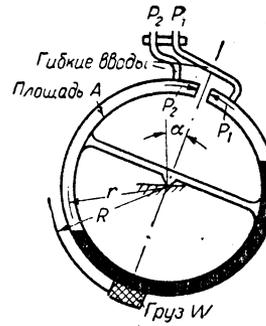


Рис. V-17. Кольцевые веса.

$$P_2 - P_1 = \frac{RW \sin \alpha}{rA}$$

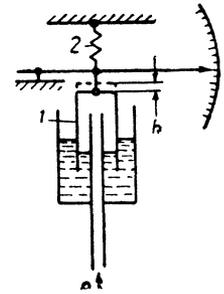


Рис. V-18. Колокольный манометр с жидкостным затвором:

1 — колокол; 2 — пружина.

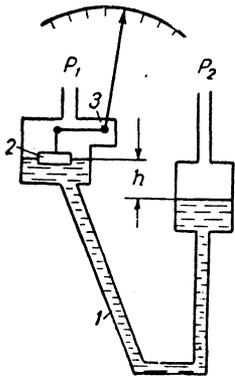


Рис. V-14. Дифференциальный поплавковый манометр:

1 — ртуть или другая жидкость; 2 — поплавок; 3 — ось с уплотнением.

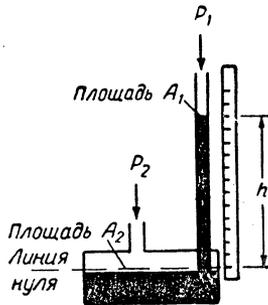


Рис. V-15. Чашечный манометр.

$$P_2 - P_1 = d \left[1 + \frac{A_1}{A_2} \right] h$$

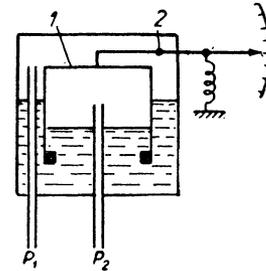


Рис. V-19. Колокольный дифференциальный манометр:

1 — колокол; 2 — ось с уплотнением.

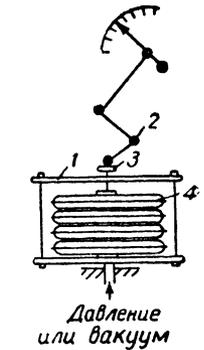


Рис. V-20. Мембранная коробка:

1 — ограничитель движения вверх; 2 — ось вращения; 3 — ограничитель движения вниз; 4 — мембранная коробка.

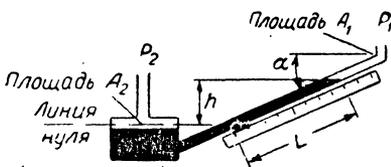


Рис. V-16. Манометр с наклонной трубкой.

$$P_2 - P_1 = d \left[1 + \frac{A_1}{A_2} \right] L \sin \alpha$$

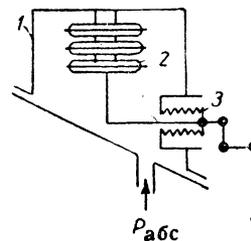


Рис. V-21. Манометр с мембранной коробкой для измерения абсолютного давления:

1 — кожух; 2 — эвакуированная мембранная коробка; 3 — сифонное уплотнение.

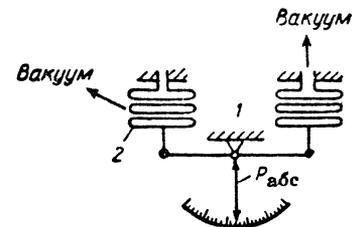


Рис. V-22. Сифонный манометр для измерения абсолютного давления:

1 — неподвижная подвеска оси вращения; 2 — сифон.

450 до 550°С), нестабильны — чувствительность их быстро изменяется. Для непрерывной работы эти термометры могут быть использованы при температурах не выше 450°С.

Стекло-жидкостные термометры

Существуют три типа стекло-жидкостных термометров: 1) палочные (шкала награвирована на самом капилляре); 2) с вложенной шкалой (в стеклянной оболочке); 3) промышленные (защищенные).

Характеристики этих термометров приведены в табл. V-9.

Пирометрические конусы

Пирометрические конусы, применяемые в основном в керамической промышленности, представляют собой трехгранные пирамиды из керамических материалов. Они размягчаются и изгибаются под действием температуры в печи, характеризуя этим тепловые условия, скорость возрастания температуры и момент готовности изделия. Изгибание конусов происходит под воздействием тепловой энергии и времени, а поэтому не соответствует какой-то определенной температуре.

В диапазоне от 600 до 2000°С используют приблизительно 60 конусов. При эксплуатации конусы обычно располагают на металлическом или фарфоровом диске под углом 8° к вертикали. Наблюдение за раскален-

ными конусами дает опытному оператору возможность установить, имела ли место в печи окислительная или восстановительная среда, произошло ли обугливание изделия.

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Измерение абсолютного и избыточного давления, разрежения и разности давлений может быть произведено с помощью одного из трех основных измерительных элементов: 1) столбика жидкости с известной плотностью, высота которого используется для измерения давления; 2) металлического элемента, деформирующегося под давлением и восстанавливающего форму с помощью противодействующей силы (например, пружины) или за счет сил упругости; 3) различных электрических и электронных элементов, например, тензодатчиков (приборов для измерения деформации), приборов, действие которых основано на явлении теплопроводности или ионизации¹.

Механические чувствительные элементы

Данные об основных типах механических чувствительных элементов для измерения давления приведены в табл. V-10 и на рис. V-12—V-31.

¹ Considine (ed.), Process Instruments and Controls Handbook, New York, 1957.

ТАБЛИЦА V-10

Промышленные приборы для измерения давления, в которых используются механические чувствительные элементы

Тип прибора	Измерительный элемент	№ рисунка	Диапазон давления
Стационарный чашечный барометр	Ртутный столбик	V-12	Атмосферное
U-образный манометр для измерения абсолютного давления	Жидкостный столбик	V-13	120—1300 мм рт. ст.
Дифференциальный ртутный манометр	Ртутный столбик	V-14	250—12 700 мм вод. ст.
Чашечный манометр	Жидкостный столбик	V-15	150—3300 мм жидкости
Манометр с наклонной трубкой	Жидкостный столбик	V-16	12—1300 мм рт. ст.
Кольцевые весы	Груз на кольце	V-17	500—10 700 мм вод. ст.
Колокольный манометр	Вес колокола	V-18	5—1000 мм вод. ст.
Колокольный дифференциальный манометр	Вес колокола	V-19	5—1000 мм вод. ст.
Манометр мембранный	Мембранная (металлическая) коробка	V-20	50 мм вод. ст.—2,1 ат (иногда до 28 ат)
Абсолютный манометр	Мембранная коробка	V-21	6—760 мм рт. ст. 80—10 000 мм вод. ст.
Манометр или дифференциальный манометр	Сильфон	V-22	200—1500 мм рт. ст.
Манометр сильфонный	Мембрана (неметаллическая, подпружиненная)	V-23	5—3000 мм вод. ст.
Дифференциальный манометр	Сильфон (подпружиненный)	V-24	130—21 000 мм вод. ст. (иногда до 55 ат)
Манометр пружинный	Сильфон (подпружиненный)	V-26	500—10 000 мм вод. ст.
	Двойной сильфон	V-27	500—10 000 мм вод. ст.
	Пружина Бурдона (тип С)	V-28a	650 мм рт. ст.—7000 ат
	Спиральная пружина Бурдона	V-28b	650 мм рт. ст.—5600 ат
	Геликоидальная пружина Бурдона	V-28c	650 мм рт. ст.—2800 ат
Манометр с силовой компенсацией	Пружина Бурдона, металлическая мембрана или сильфон	V-29	300 мм вод. ст.—7 ат
Прибор для измерения уровня жидкости	Неметаллическая мембрана	V-30	500 мм вод. ст.—30 мм вод. ст.
Разделительные устройства	Мембрана	V-31a	} 3,5—700 ат
	Сильфон	V-31b	
	Мембранная коробка	V-31c	

Упругие элементы. Существуют три основных типа упругих элементов для измерения давления: 1) мембрана, 2) подпружиненный силфон, 3) пружина Бурдона. В основе действия этих элементов лежит закон,

жидкостей. В первом случае нужны уплотнения, во втором — разделительный слой жидкости или мембрана между рабочей жидкостью и измерительным устройством.

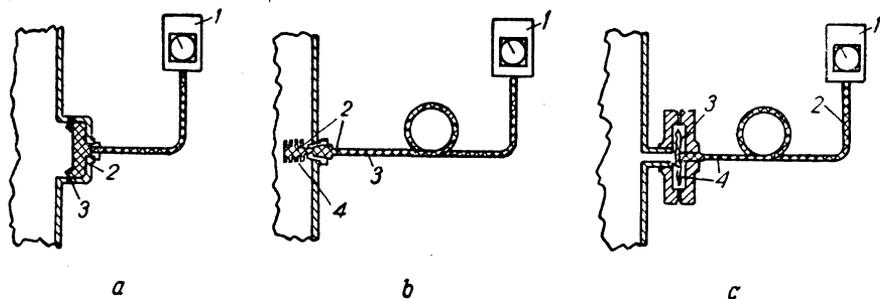


Рис. V-31. Разделительные устройства:

a — мембранное (1 — манометр; 2 — разделяющая жидкость; 3 — мембрана); *b* — силфонное (1 — манометр; 2 — соединяющий капилляр; 3 — мембранная коробка; 4 — разделяющая жидкость в манометре, капилляре и мембранной коробке).

утверждающий, что для упругих материалов напряжение пропорционально деформации (закон Гука), т. е. отклонение от первоначальной формы пропорционально приложенному давлению.

Диапазоны давлений, измеряемых с помощью упругих элементов, приведены в табл. V-11.

Уплотнения и разделительные устройства. Во многих случаях требуется предотвратить проникновение рабочей жидкости, давление которой измеряется, в измерительное устройство или в соединительную линию. Необходимо это по двум причинам: 1) чтобы исключить ошибки измерения из-за изменения статического давления столба жидкости при ее просачивании; 2) чтобы предохранить измерительное устройство от жидкостей, вызывающих коррозию, или от загустевающих вязких

Приборы с немеханическими чувствительными элементами

Кроме описанных выше механических устройств, для измерения вакуума в настоящее время применяется ряд электрических и электронных систем.

Вакуумметр Кнудсена. Принцип работы стандартного измерительного прибора Кнудсена показан схематически на рис. V-32. Торсионная (работающая на скручивание) подвеска поддерживает зеркало и легкий флюгер, абсолютная температура T_1 которого должна быть известна. Подвеска прижимает лопасти флюгера к двум неподвижным пластинам, нагретым до более высокой температуры T_2 . Промежуток между неподвижными пластинами и флюгером должен быть значительно

ТАБЛИЦА V-11

Диапазоны давлений, измеряемых с помощью упругих элементов

Элемент	Измеряемый параметр	Минимальный диапазон	Максимальный диапазон
Мембрана	Давление	0—5 мм вод. ст.	0—21 000 мм рт. ст.
	Разрежение	0—5 мм вод. ст. разрежения	0—760 мм рт. ст. разрежения
	Разрежение и давление	Интервал шириной 5 мм вод. ст. между верхними пределами давления и разрежения	
Силфон	Давление	0—127 мм вод. ст.	0—42 000 мм рт. ст.
	Разрежение	0—127 мм вод. ст. разрежения	0—760 мм рт. ст.
	Разрежение и давление	Интервал шириной 127 мм вод. ст. между верхними пределами давления и разрежения	
Пружина Бурдона	Давление	0—630 мм рт. ст.	0—7000 ат
	Разрежение	0—760 мм рт. ст. разрежения	
	Разрежение и давление	Интервал шириной 630 мм рт. ст. между верхними пределами давления и разрежения	

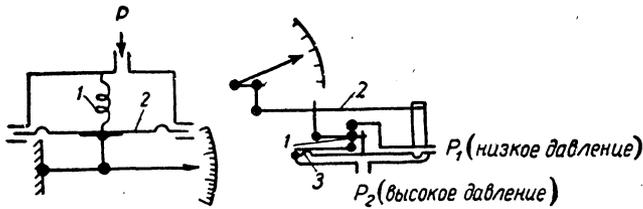


Рис. V-23. Манометр с гибкой мембраной:

1 — измерительная пружина; 2 — гибкая мембрана.

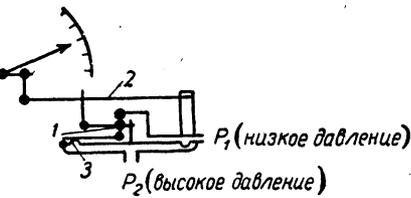


Рис. V-24. Дифференциальный манометр с гибкой мембраной:

1 — герметичный вывод передаточного рычага; 2 — противодействующая калиброванная пружина; 3 — гибкая мембрана.

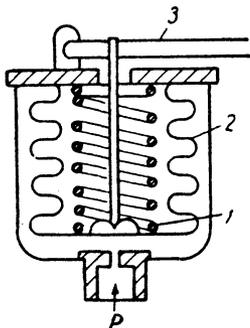


Рис. V-25. Подпружиненный сифонный манометр:

1 — пружина; 2 — сифон; 3 — рычаг, связанный с указателем.

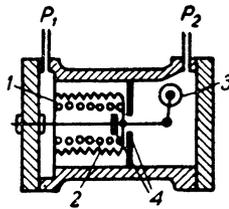


Рис. V-26. Дифференциальный сифонный манометр:

1 — измерительная пружина; 2 — сифон; 3 — вал с уплотнением или трубка, работающая на скручивание; 4 — ограничитель.

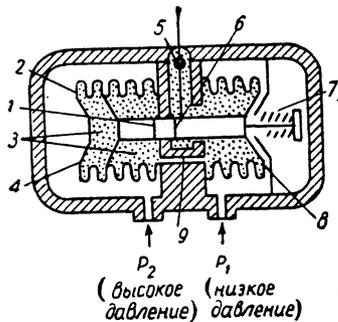


Рис. V-27. Двухсифонный дифференциальный манометр:

1 — ограничительный клапан высокого давления; 2 — сифон высокого давления; 3 — заполняющая жидкость; 4 — сифон температурной компенсации; 5 — трубка, работающая на скручивание; 6 — ограничительный клапан низкого давления; 7 — пружина растяжения; 8 — сифон низкого давления; 9 — демпфер пульсаций.

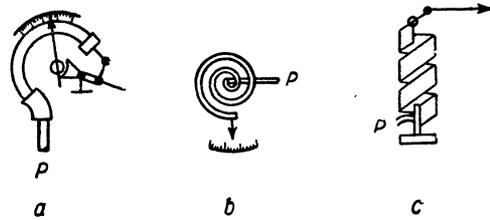


Рис. V-28. Пружины Бурдона:

a — тип С; b — спиральная; c — геликоидальная.

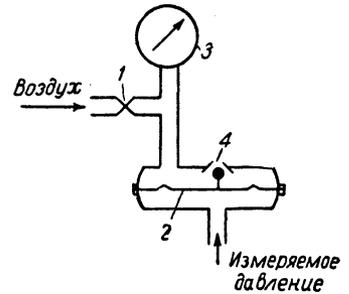


Рис. V-29. Манометр с силовой компенсацией:

1 — постоянный дроссель; 2 — металлическая мембрана; 3 — манометр; 4 — устройство утечки типа «сопло — заслонка» и выход в атмосферу.

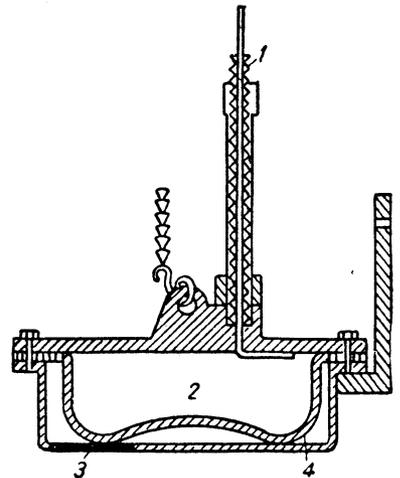


Рис. V-30. Прибор для измерения уровня жидкости:

1 — трубка к манометру; 2 — воздух; 3 — отверстие; 4 — мембрана из неопрена или резины.

газа, как и теплопроводность, пропорциональна давлению в области очень низких давлений; если же давление таково, что средний путь пробега молекул во много раз меньше, чем размер аппарата, то вязкость от величины давления не зависит. Таким образом, момент вращения, увлекающий цилиндр 4, должен быть пропорционален давлению, если оно ниже нескольких десятков микрометров, и независим от давления, если оно больше 1 мм рт. ст. Для расширения диапазона

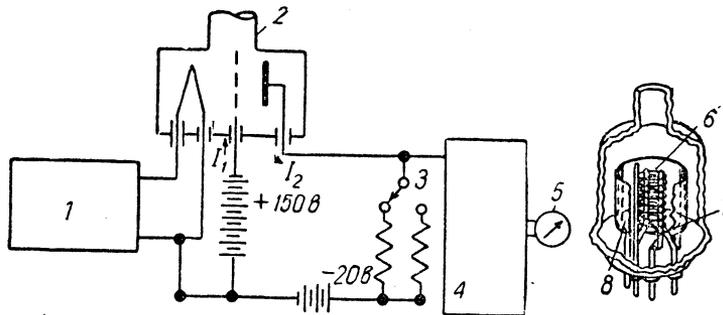


Рис. V-35. Ионизационный вакуумметр с нитью накала:

1 — источник питания со стабилизатором тока; 2 — патрубок для соединения с контролируемым сосудом; 3 — переключатель диапазонов; 4 — ламповый вольтметр; 5 — указатель давления; 6 — спиральная вольфрамовая сетка (+150 в), притягивающая электроны; 7 — вольфрамовая раскаленная нить, испускающая электроны; 8 — пластина, собирающая ионы (-20 в).

измерения до нескольких сот микрометров цилиндры должны быть снабжены лопастями, чтобы при давлениях несколько больше 1 мм рт. ст. имела место зависимость момента от давления. Если ртутный столбик поднимется еще на несколько миллиметров, характеристика прибора снова станет линейной. Для воздуха область перехода из одного режима в другой при давлении около 1 мм рт. ст. несколько уже и подвержена влиянию температуры.

Ионизационный ламповый вакуумметр с нитью накала. В таком приборе (рис. V-35) поток электронов эмиттируется раскаленной нитью и притягивается сеткой, на которой поддерживается положительный потенциал около 150 в. Некоторые электроны задерживаются сеткой, однако большинство их проходит сквозь сетку и попадает в область, ограниченную сеткой и отрицательно заряженным электродом, притягивающим ионы. Траектория электронов за сеткой искривляется и заканчивается на сетке; во время перемещения между электродами электроны ионизируют некоторую часть газовых молекул, встречающихся на пути. Эти ионы притягиваются к отрицательно заряженному электроду. Ток ионизации измеряется микроамперметром или ламповым вольтметром. Ток ионизации будет различным для разных газов при одинаковом давлении, т. е. показания такого измерительного прибора зависят от состава газа. Однако для постоянного газового состава ток ионизации будет прямо пропорционален молекулярной плотности газа, находящегося в камере, где расположены электроды.

Ионизационный радиоактивный вакуумметр. Ионизационный радиоактивный вакуумметр — альфатрон (рис. V-36) использует радиоактивное излучение альфа-частиц для ионизации газа, давление которого измеряется. Измерительная цепь аналогична примененной в ионизационном ламповом вакуумметре с горячим катодом, но более чувствительна, так как ток ионизации здесь слабее.

В этом приборе как и в ионизационном ламповом вакуумметре с горячим катодом, ток ионизации линейно зависит от молекулярной плотности газа в камере. Это объясняется независимостью действия ионизирующего агента (альфа-частиц) от степени ионизации газа.

Ионизационный вакуумметр Филиппа с холодным катодом. Этот остроумный прибор, изобретенный Пенningом (фирма Филипс К^о, Голландия), обладает мно-

гими достоинствами ионизационного лампового вакуумметра с горячим катодом, но в отличие от последнего вакуумметр Филиппа невозможно пережечь. Обычно

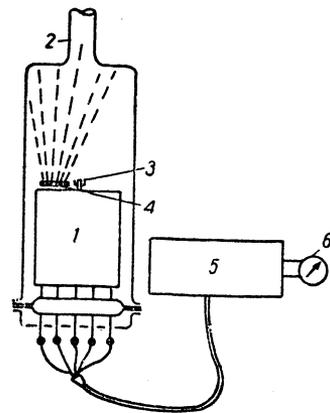


Рис. V-36. Ионизационный вакуумметр — альфатрон:

1 — входной каскад усилителя; 2 — патрубок для соединения с контролируемым сосудом; 3 — полужадеирированные электроды датчика; 4 — радиоактивный излучатель α -частиц; 5 — усилитель мощности с обратной связью; 6 — указатель давления с линейной шкалой.

электрический разряд между двумя электродами в газе не может поддерживаться при давлении ниже нескольких микрометров ртутного столба. Разряд прекращается из-за того, что коэффициент генерации электронов, способных поддержать ионизацию, при таких

меньше, чем его средняя свободная часть, что обеспечивает линейность шкалы и относительную независимость показаний от газового состава.

Узкий пучок света, отраженный от зеркала, укрепленного на подвеске, дает световое пятно на наружной прозрачной шкале. Газовые молекулы, находящиеся в камере измерительного прибора, будут отскакивать от нагретых пластин с большей скоростью, чем от более холодного флюгера. Можно вычислить силу, которая отклоняет подвижный флюгер от нагретых пластин; ей противодействует вращающий момент торсионной подвески. Угловое отклонение θ светового пятна на прозрачной шкале прямо пропорционально газовому давлению; согласно приближенной формуле:

$$\theta \approx KP \left(\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} - 1 \right)$$

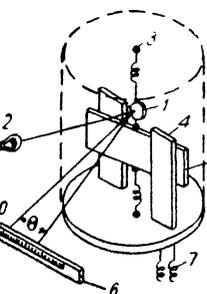


Рис. V-32. Манометр Кнудсена:

1 — зеркальце;
2 — источник света;
3 — торсионная подвеска; 4 — нагреватель (температура T_2);
5 — флюгер (температура T_1); 6 — прозрачная шкала; 7 — ввод (к нагревателям).

Вакуумметры, основанные на явлении теплопроводности. Чувствительный элемент этих приборов представляет собой металлическую проволочку или ленточку, подвергающуюся действию неизвестного давления и нагреваемую электрическим током. Температура, полученная в результате действия тока, такова, что общая потеря тепла за счет излучения, газовой конвекции, газовой теплопроводности и утечек тепла через соединительные провода равна величине электрической энергии, расходуемой на нагрев. Конвекция незначительна и ею можно пренебречь, а тепловые потери за счет теплопроводности газа являются функцией давления. При давлениях, приблизительно равных 10 мм рт. ст. и выше, удельная теплопроводность газа высока и почти не зависит от дальнейшего увеличения давления. С другой стороны, при давлениях ниже 1 мм рт. ст. удельная теплопроводность уменьшается с уменьшением давления приблизительно по линейному закону и достигает нуля при нулевом давлении. Следовательно, при давлениях ниже нескольких миллиметров ртутного столба охлаждение из-за теплопроводности газа сильно снижает температуру проволочки чувствительного элемента. Если давление понижается до нескольких сот микрометров (микрон), температура проволочки возрастает, и при самых низких давлениях ее температура достигает верхнего порога, ограниченного потерями на тепловую радиацию и на утечку через соединительные провода.

Погрешности в этих вакуумметрах возникают из-за трудности поддержания стабильности двух различных факторов. Первым из них является коэффициент accommodation, который служит мерой близости температуры газовых молекул, отскакивающих от нагретой или охлажденной поверхности, к температуре этой поверхности. Недостаточно стабильна также эмиссионная способность поверхности проволочки, которая определяет соотношение между температурой и интенсивно-

стью излучения. Эмиссионная способность новой проволочки низка, в результате чего при низком давлении газа она имеет высокую температуру, однако

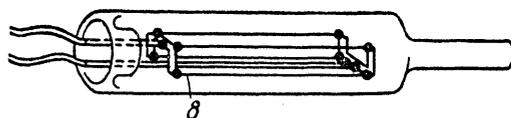
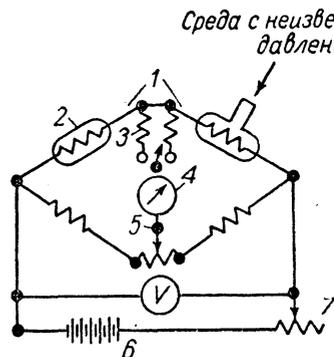


Рис. V-33. Манометр Пирани:

вверху — манометр, включенный в мостовую схему постоянного тока; внизу — чувствительный элемент. 1 — элементы Пирани одинаковой конструкции; 2 — эвакуированный и запаянный элемент; 3 — переключатель диапазонов; 4 — указатель давления; 5 — установка нуля; 6 — батарея или источник выпрямленного переменного тока; 7 — установка рабочего тока; 8 — четыре вольфрамовые нити, соединенные параллельно.

после некоторого срока службы металлическая поверхность окисляется, карбонизируется или, же слегка загрязняется. После этого при измерении низких давлений возникает погрешности, часто достигающие 20 мкм рт. ст.

Для преобразования сигнала чувствительного элемента в показания вторичного измерительного прибора применяются, как показано на рис. V-33, уравновешенные мосты. Здесь изображен мост Уитстона с чувствительными элементами Пирани. Мост имеет две шкалы; нижняя шкала — от нуля примерно до 20 или 40 мкм рт. ст. — приблизительно линейна, в то время как верхняя шкала — от нескольких микронов до 1 мм рт. ст. — почти логарифмическая. Обе шкалы измерительного прибора обычно градуируются прямо в единицах давления воздуха.

Вакуумметр на основе ротационного вискозиметра. В реальном приборе (рис. V-34) чувствительный элемент — цилиндр 4 — не подвешивается на пружине, а располагается горизонтально на двух опорах. Цилиндр 5 приводится во вращение синхронным двигателем.

Отклонение стрелки прибора является результатом увеличения цилиндра 4 быстро вращающимся цилиндром 5.

Из кинетической теории газов известно (и это подтверждает эксперимент), что вязкость разреженного

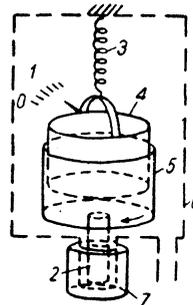


Рис. V-34. Упрощенная схема работы манометра на основе ротационного вискозиметра:

1 — шкала; 2 — ротор; 3 — торсионная пружина; 4, 5 — цилиндры; 6 — приемник газа, давление которого измеряется; 7 — статор мотора.

Мостовые схемы Уитстона. Тензометры обычно включаются в одно из плеч моста Уитстона, и в результате деформации тензомера возникает разбаланс моста (рис. V-40, a). Если тензометр включен так, как пока-

вместо металлических сильфонов используют мембраны. Эти мембраны обычно представляют собою довольно жесткие диски большой прочности. Характеристики мембраны определяются свойствами изме-

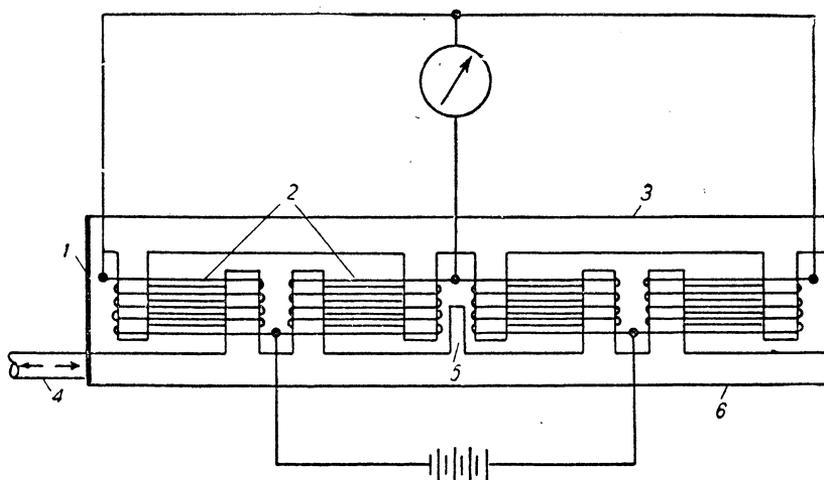


Рис. V-39. Натяжной тензометр.

1 — плоские пружины (одна или две); 2 — чувствительная к деформации проволока; 3 — рамка; 4 — стержень, передающий усилия; 5 — ограничитель; 6 — подвижная арматура.

зано на рисунке, то единственным источником разбаланса моста является изменение сопротивления тензомера в результате действия сил, приложенных к нему, и разность потенциалов на выходе моста является мерой действия этих сил или деформации проволоки тензомера. Эту разность потенциалов можно измерить с помощью вольтметра.

Схемы, показанные на рис. V-40, используются для измерения статической деформации или постоянной составляющей динамической деформации и могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. В случае работы на постоянном токе, с питанием от аккумуляторов, схема может принимать вид, изображенный на рис. V-40, d, где между тензометром и постоянным сопротивлением R_2 введен небольшой реостат для первоначальной балансировки моста. Для индикации разбаланса моста может применяться гальванометр со световым зайчиком. Для непосредственного отсчета могут применяться чувствительный микроамперметр или милливольтметр с особыми характеристиками, обеспечивающими его использование без усилителя в качестве гальванометра. Такие системы применяют только для измерения статических деформаций, или деформаций, меняющихся с частотой не более 1 гц. Характеристики обычных и составных тензометрических преобразователей давления приведены в табл. V-12.

Составные тензометрические преобразователи широко применяются при эксплуатации промышленных сооружений. Обычно прибор состоит из рамки и арматуры, перемещающейся относительно рамки.

В составном тензометрическом преобразователе давления последнее сперва воздействует на металлический сильфон, рассчитанный на диапазон давлений от 0 до 3500 см вод. ст. Сильфон защищает хрупкие части тензомера от соприкосновения с потоком, но в то же время передает силу, пропорциональную давлению, арматуре тензомера. Для давлений свыше 3500 см вод. ст.

рителя давления. Материал для мембраны тщательно выбирается и многократно испытывается с целью обе-

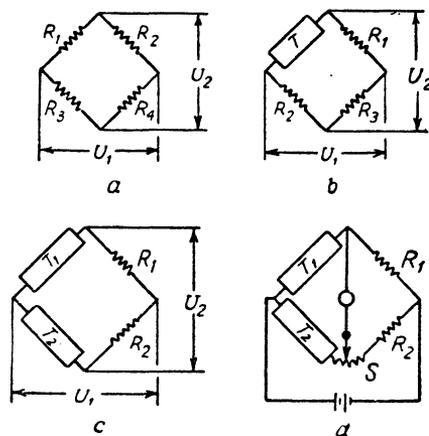


Рис. V-40. Типы тензометрических цепей:

a — мост Уитстона; b — простейшая схема; c — схема с температурной компенсацией; d — схема на постоянном токе с непосредственной индикацией. T, T₁, T₂ — тензометры; U₁ — приложенное напряжение; U₂ — напряжение на выходе моста; S — движок реохорда.

спечения максимальной стабильности показаний, а размеры мембраны задаются с минимальными допусками.

Резистивные преобразователи давления. К этой группе относятся преобразователи давления, у которых

давлениях гораздо меньше коэффициента рекомбинации электронов и ионов. В приборе Филлипса этот недостаток устранен с помощью направленного магнитного поля, наличие которого значительно увеличивает длину пробега электронов. При прохождении более длинного пути электроны получают соответственно большую возможность встретить и ионизировать молекулы газа в

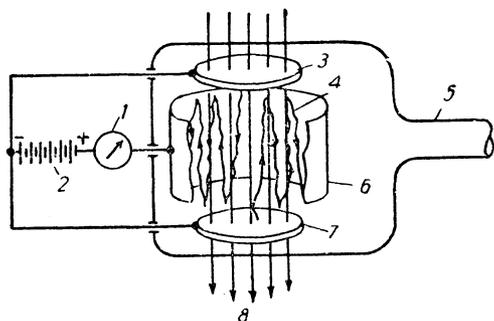


Рис. V-37. Ионизационный вакуумметр с холодным катодом:

1 — микроамперметр; 2 — батарея (э. д. с. от 2000 до 4000 в); 3, 7 — катоды; 4 — траектория перемещения электронов; 5 — патрубок для соединения с контролируемым сосудом; 6 — цилиндрический анод; 8 — магнитное поле (от 0,05 до 0,15 тл).

межэлектродной области, несмотря на то, что газ может быть сильно разрежен. Кроме магнитного поля, в приборе применены специально сконструированные электроды (рис. V-37), поддерживающие электрический разряд при давлениях ниже 10^{-6} мм рт. ст.

Преобразование давления в электрический сигнал

В качестве чувствительных элементов для измерения давления обычно применяются: 1) пружина Бурдона, 2) спиральная пружина, 3) геликондальная пружина, 4) мембрана, 5) сильфон или 6) какая-либо модификация одного из этих устройств. Все эти чувствительные элементы должны иметь электрический выход. С преобразователями давления используются: 1) тензометрические датчики, 2) датчики сопротивления, 3) магнитные, 4) емкостные, 5) пьезоэлектрические и 6) осциллометрические датчики.

В данном разделе будут рассмотрены только типичные для каждой группы образцы.

Тензометры. При растяжении проволоки меняются ее длина и диаметр, а в результате — ее электрическое сопротивление. Измерение этого сопротивления или его изменения и лежит в основе тензометрических преобразователей давления.

Например, если растянуть проволоку на 0,1%, то площадь ее сечения (при постоянном объеме) уменьшится также на 0,1% и при этом, теоретически, должно произойти изменение сопротивления на 0,17%. Последнее выражают с помощью коэффициента чувствительности, или тензометрического коэффициента:

$$G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления тензометра R ; $\Delta L/L$ — относительное изменение длины проволоки L . По неизвестным причинам измеряемый практически тензометрический коэффициент несколько отличается от теоретического значения, которое согласно рассмотренному примеру должно быть 1,7. Эти коэффициенты для тензометров из различной проволоки не совпадают, но от того, производится ли сжатие или растяжение проволоки, величина G не зависит.

Обычный или наклеиваемый тензометр представляет собой проволоку или полосу фольги, наклеенную на подложку в форме плоского змеевика (рис. V-38). Для достижения максимальной чувствительности активная часть проволоки должна располагаться как можно ближе к исследуемой поверхности. Наилучших результатов можно достичь, прикрепляя проволоку непосредственно к исследуемой поверхности.

Обычно используется проволока диаметром от 25 до 40 мкм¹. Этот размер наиболее удобен для получения заданного сопротивления. Стандартный тензометр обладает сопротивлением порядка 120 ом, по нему протекает ток около 25 ма при напряжении 6 в в цепи моста. 120-омное сопротивление в плече моста сравнивается с сопротивлением тензодатчика и является достаточно высоким для того, чтобы можно было пренебречь ошибками, которые могут внести переключатели. Большая часть тензометров обладает сопротивлением от 60 до 5000 ом и эффективной длиной проволоки от 1,5 до 150 мм.

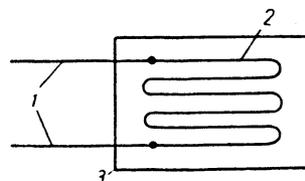


Рис. V-38. Обычный, или наклеиваемый, тензометр:

1 — выводы; 2 — проволоочные петли; 3 — подложка.

Составной, или натяжной тензометр изображен на рис. V-39. Неподвижная рамка скреплена с подвижной арматурой тонкими консольными пластинками. Проволока наматывается вокруг нескольких пар колков, в каждой из которых один колок закреплен на рамке, а другой — на арматуре. Когда арматура перемещается, проволока укорачивается или удлиняется, в зависимости от направления перемещения, вызывая соответственное увеличение или уменьшение сопротивления.

Пределы перемещения арматуры устанавливаются с помощью ограничителя 5, служащего для защиты проволоки от перегрузки; максимальное перемещение обычно не превышает 40 мкм в обе стороны от центра. Как было упомянуто, номинальное сопротивление прибора составляет от 60 до 5000 ом. Входное напряжение лежит в пределах от 5 до 60 в переменного или постоянного тока; выходное напряжение при разомкнутой цепи составляет от 6 до 175 мв, а ток при замкнутой цепи — от 30 до 200 мка (на весь диапазон измерения). Такой тензометр характеризуется погрешностью порядка 1% на всем диапазоне измерения, линейностью шкалы и разрешающей способностью не менее 0,1% от диапазона измерения.

¹ В СССР используется и более тонкая проволока. — Прим. ред.

диафрагма с отверстием, имеющим прямоугольные или заостренные кромки, сопло и трубка Вентури. Могут применяться также трубки Пито, а также другие приборы, основанные на нагнетании или всасывании жидкости, и приборы, использующие центробежную силу или сопротивление трения.

Расходомер скоростного напора действует по принципу преобразования одной формы энергии в другую. В потоке жидкости следует различать две формы энергии, а именно кинетическую энергию и потенциальную энергию статического давления. Диафрагмы, трубки Вентури и другие аналогичные приборы преобразуют статическое давление в кинетическую энергию потока. Трубка Пито преобразует кинетическую энергию потока в статическое давление. При измерении расхода газа или пара в процессе преобразования участвует еще одна форма энергии, а именно внутренняя энергия сжатого вещества.

Для трубки Вентури и сопла может быть сделан точный математический анализ, основанный на законах термодинамики. Но для диафрагмы и других первичных элементов, у которых сечение струи за сужающим устройством является неопределенным, вряд ли можно предложить что-нибудь другое, кроме использования формул гидродинамики с экспериментально определенными коэффициентами.

Диафрагма. Одним из наиболее важных свойств диафрагмы (рис. V-42), из-за которого ее охотно применяют в качестве первичного элемента, является легкость

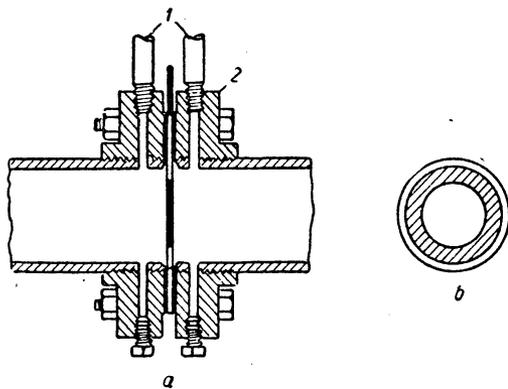


Рис. V-42. *a* — Трубопровод с тонкостенной дисковой диафрагмой с прямоугольными или заостренными кромками; *b* — диафрагма (заштрихована):

1 — отвод давления; 2 — фланец.

установки и замены. Экономичность ее изготовления и простота воспроизведения — также ценные свойства диафрагмы. Благодаря ее простоте она была объектом большого числа исследовательских работ, вследствие чего в настоящее время накоплено много экспериментальных данных о характеристиках диафрагмы при работе в самых различных условиях, и этих данных гораздо больше, чем о характеристиках других первичных элементов. Из анализа результатов опытов выявляется, что при работе с чистыми жидкостями характеристики диафрагмы воспроизводятся по крайней мере так же точно, как и у любого другого первичного элемента, работающего по методу создания разности давлений.

Сопло. Этот прибор (рис. V-43) состоит из конструкции колоколообразной формы, заканчивающейся цилиндрической горловиной.

Длина сопла (по оси) по нормам ASME при малых отношениях диаметров равняется d и $2/3d$, а при больших — $D/2$ и $1/2(D-d)$ соответственно¹, где D — диаметр трубы, d — диаметр горловины.

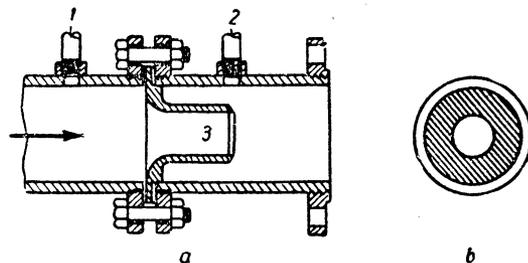


Рис. V-43. *a* — Сопло с отводами; *b* — сопло (заштриховано).

Отводы давления: 1 — перед соплом; 2 — за соплом; 3 — горловина сопла.

Опыты с другими конфигурациями сопел были проанализированы в ASME, и найденная разница в коэффициентах из-за конфигурации оказалась меньше, чем разница в опытных данных различных лабораторий для одних и тех же сопел.

Плавность переходной линии сопла, длина его цилиндрической части и расположение отводов к дифманометру оказывают большое влияние на коэффициент расхода.

Сравнивая сопло и диафрагму при различных соотношениях диаметров, можно сказать, что сопло дает лучшее выравнивание давлений. Так как коэффициент потока для сопла примерно на 63% выше, чем у диафрагмы с острыми кромками, соотношение диаметров должно быть меньше при том же результате.

Трубка Вентури. В трубке Вентури (рис. V-44) потери давления меньше, чем за диафрагмой. Это объясняется удлиненной конической формой выходной части, конструируемой в США в модификации Гершеля, а в Европе в виде классической трубки Вентури. Выходная часть содержит от 1 до 10 конических участков или от 1 до 20 различных уклонов по оси трубки. Большой или меньший наклон приводит к большей или

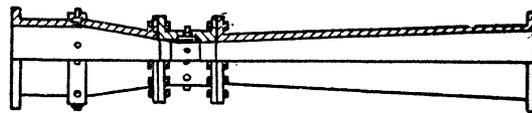


Рис. V-44. Труба Вентури конструкции Гершеля.

меньшей потере давления. Поскольку при высоких скоростях большая часть давления восстанавливается, выходной диаметр конуса делается немного меньше, чем входной диаметр трубки Вентури. Профиль и длина выходного участка не оказывают влияния на коэффициент расхода.

Обычно при измерении потоков полное восстановление давления не имеет особого значения, так как все

¹ Размер $1/2(D-d)$ сомнителен: в СССР принят размер 0,6 d при любых отношениях диаметров. — Прим. ред.

Характеристики преобразователей давления, использующих тензометры

Датчики	Тип тензометра	Диапазон применения, см вод. ст.	Погрешность, % от всего диапазона	Температурные пределы, °С	Частота собственных колебаний, гц
Пружина Бурдона и сильфон	Обычный	От 0 ÷ 700 до 0 ÷ 3500 · 10 ³	± 0,25	125	300—2000
Сильфон и мембрана	Составной	От 0 ÷ 3,5 до 0 ÷ 700 · 10 ³	± 0,5	От -55 до +125	270—10 000
Сильфон и рычажный балансир	Обычный	От 0 ÷ 700 до 0 ÷ 175 · 10 ³	± 0,25	От -45 до +80	—
Типа кольцевые весы	»	От 0 ÷ 1750 до 0 ÷ 700 · 10 ³	± 1	От -45 до +80	Свыше 1500
Специальные мембраны	»	От -1050 ÷ 7000 до -1050 ÷ 700 · 10 ³	± 1	От -180 до 3400 (с обязательным воздушным или водяным охлаждением)	До 45 000

электрическое сопротивление чувствительного элемента изменяется в зависимости от изменения давления. При проектировании резистивных преобразователей важно учитывать основные факторы, влияющие на сопротивление проводника. Например, сопротивление увеличивается, если увеличивается длина проводника или уменьшается площадь его поперечного сечения. Тот же эффект может иметь место при определенных свойствах материала, например, при увеличении температуры: изменение температуры сопровождается одновременным изменением размеров. Так, нагревание медной проволоки вызывает и увеличение ее размеров и увеличение ее сопротивления.

Другие электрические преобразователи давления. Кроме перечисленных следует назвать: 1) преобразователи, которые изменяют свои параметры при изменении плотности или структуры материала (например, угольный столбик); 2) потенциометры с подвижным контактом; 3) термисторы; 4) индуктивные датчики или датчики с переменным магнитным сопротивлением; 5) емкостные преобразователи; 6) пьезоэлектрические датчики и 7) датчики с генераторами колебаний.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ

В промышленности применяются следующие приборы для измерения расходов¹: 1) расходомеры скоростного напора; 2) расходомеры с переменным и постоянным перепадом давления; 3) счетчики количества жидкостей, объемные и скоростные; 4) массовые и электромагнитные расходомеры. Последний тип расходомеров еще не получил широкого распространения.

Измерители расходов по напору (давлению)

Термин «измеритель скорости» применим ко всем типам расходомеров, если через них проходит весь измеряемый поток, а не часть его. Движение потока, протекающего через датчик, прямо или косвенно используется для воздействия на измерительное приспособление, и скорость потока определяется по известным физическим законам или по эмпирическим соотношениям. Измерители расходов по напору подразделяются на так называемые пневмометрические трубки, измеряющие

скорость потока и действующие по принципу измерения разности между суммарным (динамический плюс статический) и статическим напорами, и на расходомеры с переменным перепадом давления, требующие применения сужающих устройств.

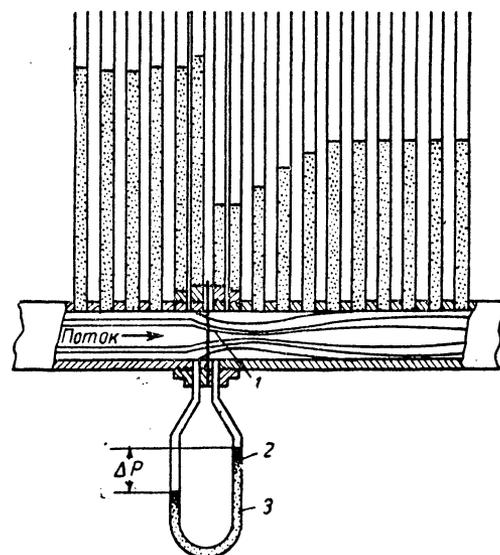


Рис. V-41. Элементы расходомера с переменным перепадом давления:

1 — сужающее устройство; 2 — ртуть; 3 — вторичный элемент (измерительный прибор).

В вертикальных колонках над трубой области, покрытые точками, показывают величину статических давлений, возникающих перед сужением и за сужением.

Расходомер второго вида (рис. V-41) включает в себя: 1) первичный элемент — какое-либо сужающее устройство в линии потока, вызывающее изменение составляющих давления жидкости; 2) вторичный элемент, воспринимающий разность давлений и измеряющий ее с целью определить скорость потока.

Работа расходомера. Наиболее распространенными первичными элементами, возмущающими поток и вызывающими перепад давлений, являются тонкостенная

¹ Considine (ed.), Process Instruments and Controls Handbook, New York, 1957.

в температуре или составе жидкости в двух соединенных трубопроводах; 3) утечки, образование конденсата, гидратов и тому подобные явления в газопроводах. Необходимость исключить это влияние заставляет применять электрические или пневматические дистанционные передачи, а передатчик измерительного прибора располагать как можно ближе к месту отбора давления.

Дифференциальные манометры. Наиболее употребительные дифманометры для измерения расхода по напору потока подразделяются на 1) жидкостные, 2) ртутные поплавковые, 3) колокольные, 4) кольцевые,

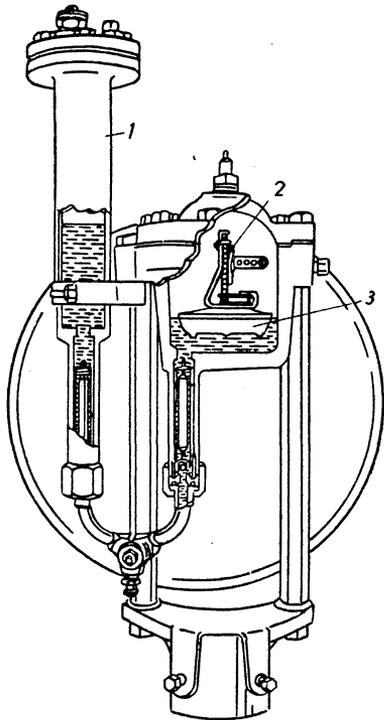


Рис. V-46. Ртутный манометр поплавкового типа:

1 — приемная камера; 2 — цепь и сегмент, посредством которых поплавок поворачивает закрепленную в подшипниках ось; 3 — поплавок.

Дифманометры, работающие по принципу уравновешивания сил. Ранее описанные приборы можно охарактеризовать как приборы с кинематической компенсацией, имея в виду, что для достижения равновесия после изменения измеряемой разности давлений должно произойти значительное перемещение уравновешивающего органа. Другой тип приборов, который получил широкое распространение за последние годы, основан на компенсации сил. Эти приборы используются как пневматические передатчики, выдающие выходное (управляющее) давление воздуха, пропорциональное измеряемой разности давлений. Промышленный ртутный манометр поплавкового типа показан на рис. V-46¹.

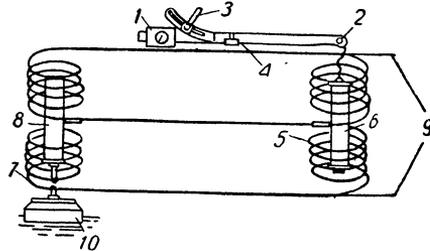


Рис. V-47. Индуктивная мостовая система, используемая в измерителях расхода по напору:

1 — противовес; 2 — поворотный рычаг; 3 — тяга пера самописца; 4 — опорная призма; 5 — приемная катушка; 6 — якорь записывающего устройства; 7 — передающая катушка; 8 — якорь измерителя; 9 — линия переменного тока; 10 — поплавок.

Дифманометры с электрическим выходом. Электрические измерители подразделяются на два наиболее часто встречающихся типа: 1) индуктивные (рис. V-47) или импедансные — полного сопротивления — мостовые измерители (рис. V-48) и 2) измерители электрического

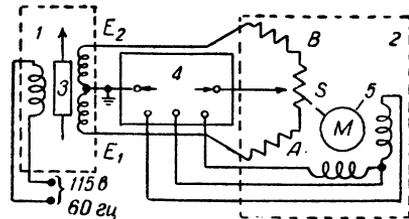


Рис. V-48. Импедансная мостовая система, используемая в электрических расходомерах:

1 — датчик; 2 — приемник; 3 — сердечник; 4 — усилитель; 5 — управляющий двигатель.

сопротивления (рис. V-49). Эти измерители обладают тем преимуществом, что не требуют применения герметичных подшипников, как механические измерители (за исключением прибора, использующего магнитную связь). Однако их использование может быть ограничено по соображениям взрывобезопасности.

Дифманометры сильфонного типа. В измерителях сильфонного типа разность давлений воздействует на металлический сильфон в котором возникает

¹ В таких манометрах перемещение поплавка пропорционально измеряемому перепаду давления. — Прим. ред.

5) сильфонные и 6) дифманометры, работающие по принципу силовой компенсации. Ввиду того что расход потока и измеряемая разность давлений связаны квадратичной зависимостью, при обычной градуировке прибора шкала получается квадратичной; при желании иметь линейную шкалу приходится использовать другие способы градуировки. Большая часть приборов снабжается пневматической системой регулирования, размещенной в одном корпусе с измерительным прибором; другие приборы используются в системах с пневматическими дистанционными передатчиками. Электрические системы регулирования в большинстве случаев не применяются.

Дополнительные механизмы как дискретного, так и непрерывного типа, обеспечивающие интегрирование расхода для выполнения экономических расчетов, сравнительно просто устанавливаются в многочисленных показывающих и регистрирующих приборах.

равно некоторая часть давления в дальнейшем теряется на различных устройствах регулирования и управления. Тем не менее, когда большие количества жидкости перемещаются с большой скоростью, и, следовательно, экономия на мощности насосов может оправдать дополнительные капиталовложения на усложнение трубы Вентури, давление следует восстанавливать почти полностью.

При измерении расходов потоков, содержащих твердые частицы, труба Вентури предпочтительнее диафрагмы с острыми кромками, так как она обладает лучшими характеристиками. Суспензии очень быстро осаждаются на верхнюю (по течению) стороне диафрагмы, а это изменяет ее коэффициент расхода. В трубке Вентури нет «карманов» или таких мест, где поток «ударяется» о преграду, и это предотвращает отложение осадка. При измерении потоков псевдооживленных катализаторов, глинистых и масляных смесей, бумажной массы и других подобных жидкостей входное отверстие и часть горловины сужающего устройства снабжают обычными пьезометрическими кольцами, что позволяет измерять давление и сбрасывать осевшие твердые частицы обратно в поток при помощи проточной очищающей жидкости.

Сопло или трубка Вентури позволяют измерять при той же разности давлений приблизительно на $\frac{2}{3}$ больший расход, чем диафрагма с острыми кромками такого же размера. Это обстоятельство часто служит основанием для выбора сопла в качестве датчика, особенно при больших скоростях потоков.

Первичные элементы для небольших потоков. Потребность в расходомерах и регуляторах потока для опытных установок и для заводов, производящих фармацевтические вещества и чистые химикалии, где встречаются обычно небольшие скорости потоков, вызвала значительный интерес к малым диафрагмам и небольшим соплам. Однако в большей части работ, проведенных в этой области, уделялось слишком мало внимания соотношению между толщиной диафрагмы и ее диаметром.

Опыты с диафрагмами в 50-миллиметровых и более толстых трубах показывают, что во всех случаях, когда толщина диафрагмы не меньше 1) $\frac{1}{8}$ диаметра диафрагмы; 2) $\frac{1}{30} \div \frac{1}{50}$ диаметра трубы и 3) $\frac{1}{4}$ от высоты порога, образуемого выступающей внутрь трубы частью диафрагмы, — коэффициент расхода является функцией толщины.

Для отверстия диаметром 0,8 мм толщина диафрагмы должна быть менее 0,1 мм, иначе ее нельзя считать тонкой. Опыты Грейса и Леппла¹ показывают, что наилучшие результаты могут быть получены с отверстиями диаметром 0,8 мм, если снабдить их фаской со стороны нижнего отвода для отбора давления и острыми краями со стороны верхнего отвода.

Другим фактором, создающим дополнительные трудности при измерении потоков с помощью малогабаритных первичных элементов, являются низкие значения числа Рейнольдса², что вполне естественно. Если скорость, плотность и вязкость остаются постоянными, то число Рейнольдса уменьшается прямо пропорционально диаметру отверстия. Это означает, что даже у потоков с низкой вязкостью нормальные скорости потоков попадают в область, где изменение числа Рейнольдса

заметно сказывается на коэффициенте расхода. Решению этой проблемы может помочь разработка отверстий специального профиля.

Были проделаны также некоторые работы по использованию пористых пробок в качестве первичных элементов измерителей расходов по напору для малых расходов¹.

Трубка Пито (пневмометрическая трубка). Трубка Пито значительно реже применяется в качестве первичного элемента в промышленных измерителях расхода по напору. Это очень удобный инструмент, но в основном для лабораторного использования или для местного контроля, а в промышленности ее можно применять лишь для незагрязненных жидкостей (газов), так как наличие в потоке твердых частиц приводит к загрязнению трубки. Трубка Пито пригодна для ограниченного диапазона рабочих скоростей; кроме того, ненормальное распределение скоростей потока по сечению трубопровода искажает измерение расхода.

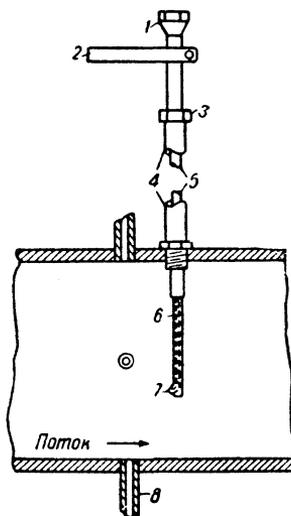


Рис. V-45. Трубка Пито:

1 — соединение с манометром; 2 — направляющий рычаг для перемещения и ориентирования входного отверстия трубки; 3 — кожух; 4 — трубка; 5 — лезвие (ребро); 6 — отверстие — приемник динамического давления; 7 — отверстие — приемник статического давления; 8 — трубка статического давления.

Типичная трубка Пито (рис. V-45) имеет два входа для измерения давления, один из которых повернут навстречу потоку и, захватывая небольшую часть потока, реагирует на полное давление жидкости (статическое плюс динамическое). Другой вход расположен перпендикулярно оси потока и воспринимает только статическое давление жидкости. Разница между этими двумя давлениями является мерой скорости.

Трубопровод расходомера. К числу наиболее затруднительных моментов в измерении расхода по напору относится способ соединения первичных и вторичных элементов. Здесь оказывают влияние следующие факторы: 1) газы или пары в соединительных трубках между первичным и вторичным элементом; 2) различие

¹ Grace, Larrie, ASME, Paper 50-A-64.

² Число Рейнольдса — это безразмерный критерий, характеризующий отношение силы инерции протекающей жидкости к силам внутреннего трения и представляющий собой отношение произведения скорости течения жидкости на диаметр трубопровода к коэффициенту ее кинематической вязкости.

¹ ASME, Paper 50-A-37, 51-A-57.

Расходомеры с переменной площадью проходного сечения (расходомеры постоянного перепада)

Расходомеры с переменной площадью сечения делятся на два основных типа:

1. Ротаметры. В обычном ротаметре поплавков, помещенный внутри вертикально установленной конической трубки, поддерживается потоком увлекающей его жидкости; образуя кольцевой канал, поплавок перемещается до тех пор, пока подъемная сила жидкости, поступающей в трубку, определяемая разностью давлений под поплавком и над ним, не станет равной весу поплавка. Трубки небольших размеров сделаны из стекла и проградуированы таким образом, что значение расхода можно отсчитать непосредственно по положению поплавка.

2. Расходомеры поршневого типа с переменным проходным сечением. В таких расходомерах точно пригнанный поршень движется внутри цилиндра под давлением жидкости до тех пор, пока увеличивающаяся при перемещении поршня площадь окна для прохождения потока не станет достаточно большой¹. Расход индицируется по положению поршня.

Расходомеры с переменной площадью проходного сечения обоих типов могут быть снабжены устройствами дистанционной передачи (электрическими, электронными или пневматическими). Еще один расходомер, известный под названием «отверстие и пробка», имеет общие черты с обоими описанными выше расходомерами. В отверстие плоской диафрагмы соосно вставлен конический плунжер, который поднимается под воздействием потока до тех пор, пока кольцеобразное пространство между стенками отверстия и плунжером, заполненное жидкостью, не окажется достаточно большим и обеспечивающим определенную разность давлений под плунжером и над ним.

Ротаметры. Ротаметры имеют различные конструкции, простейшая из них представляет собой поплавок, помещенный в градуированную коническую трубку из стекла пирекс, рассчитанную на умеренные давления (рис. V-53).

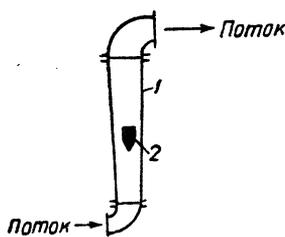


Рис. V-53. Ротаметр:

1 — измерительная трубка;
2 — поплавок.

Термин «ротаметр» применялся вначале потому, что поплавки изготавливались с винтовыми прорезями, которые способствовали вращению и, следовательно, центрированию и стабилизации такого поплавка. В настоящее время поплавки изготавливают невращающимися. Вращение такого поплавка теперь интерпретируется как показатель неблагоприятных условий для прохода жидкости.

¹ В момент измерения вес поршня уравновешивается силой, возникающей вследствие перепада давления до и после отверстия, через которое вытекает жидкость. — Прим. ред.

Максимальная пропускная способность типичных ротаметров приведена в табл. V-13.

ТАБЛИЦА V-13

Максимальная пропускная способность типовых ротаметров¹

Номинальный размер трубы, мм	Пропускная способность, м ³ /сек	
	воды	воздуха ²
3,18 ÷ 6,35	0,59 · 10 ⁻⁴	0,7 · 10 ⁻³
12,7	(0,82 ÷ 3,18) · 10 ⁻⁴	(2,2 ÷ 10,4) · 10 ⁻³
19,05	(3,6 ÷ 7,8) · 10 ⁻⁴	(4,9 ÷ 24,7) · 10 ⁻³
25,4	(7,95 ÷ 17,7) · 10 ⁻⁴	(11,8 ÷ 57) · 10 ⁻³
38,1	(14,2 ÷ 33,2) · 10 ⁻⁴	(28,2 ÷ 105) · 10 ⁻³
50,8	(29,8 ÷ 57) · 10 ⁻⁴	(48,5 ÷ 175) · 10 ⁻³
76,2	(69,5 ÷ 112) · 10 ⁻⁴	(141 ÷ 342) · 10 ⁻³
101,6	155 · 10 ⁻⁴	188 · 10 ⁻³
127	284 · 10 ⁻⁴	236 · 10 ⁻³
152,4	565 · 10 ⁻⁴	472 · 10 ⁻³

¹ Источник данных — отчеты трех заводов-изготовителей.

² При нормальных температуре и давлении.

Расходомеры грузо-поршневого типа с переменным проходным сечением. Несмотря на большое число раз-

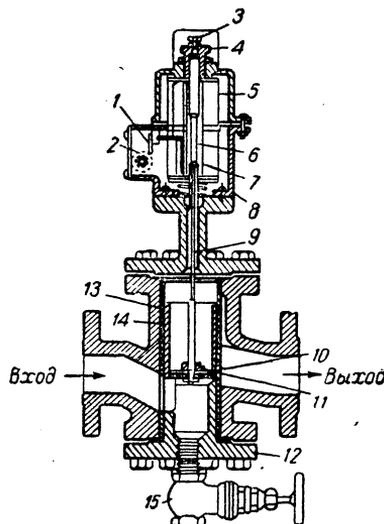


Рис. V-54. Расходомер грузо-поршневого типа:

1 — присоединительная клемма; 2 — сальник для вывода проводов; 3 — иглочатый клапан; 4 — настройка нуля; 5 — катушка; 6 — сердечник; 7 — соленоид с трубкой сердечника; 8 — корпус катушки; 9 — стержень сердечника; 10 — отверстие; 11 — регулируемые грузы; 12 — фланец; 13 — гильза; 14 — поршень; 15 — вентиль для выпуска отстой.

личных конструкций, типичный поршневой расходомер обязательно имеет гильзу или цилиндр, жестко укрепленный в литом корпусе, и плотно пригнанный

уравновешивающее противодействие благодаря его упругости, обычно усиливается внешней пружиной (рис. V-50). В этом измерителе для передачи движения

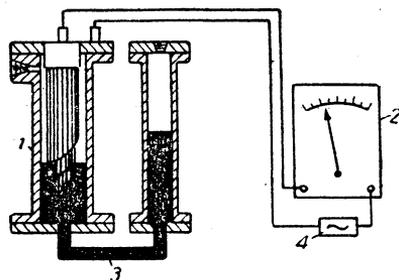


Рис. V-49. Система с электродом переменного сопротивления, используемая в электрических расходомерах:

1 — контактный электрод переменного сопротивления; 2 — индикатор (амперметр переменного тока); 3 — манометр; 4 — источник питания переменного тока.

сильфона на самописец используется работающая на скручивание гибкая трубка. В других конструкциях приходится применять сальники и герметичные подшипни-

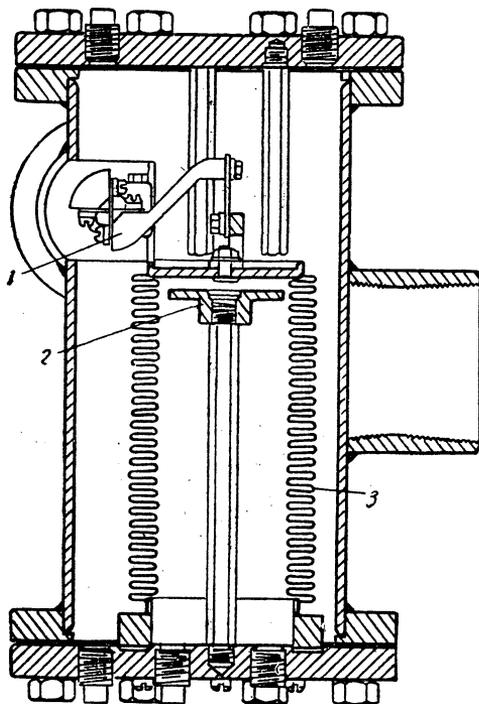


Рис. V-50. Расходомер анероидного типа:

1 — рычаг; 2 — ограничитель; 3 — сильфон.

ки. В некоторых конструкциях пространство внутри сильфонов заполняется жидкостью для предохранения их от разрушения в случае перегрузок и для обеспечения демпфирования, а для передачи движения сильфона также используется скручивающаяся трубка.

Трубка Далла. Прибор, показанный на рис. V-51, значительно лучше, чем труба Вентури, сохраняет постоянство давления. При самом высоком соотношении диаметров трубопровода и сужающего устройства потеря давления не превышает 2,5% от измеряемого перепада. Небольшая длина и малый вес упрощают установку и обращение с прибором по сравнению с трубой

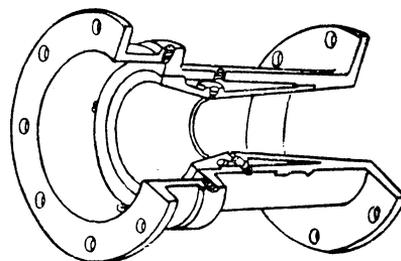


Рис. V-51. Трубка Далла.

Вентури. Тем не менее, использовать трубку Далла можно только в потоках жидкостей, на несущих твердых частиц, которые могли бы осаждаться в трубке.

Измеритель расхода по напору экранного типа. Этот прибор (рис. V-52) основан на применении диска, вос-

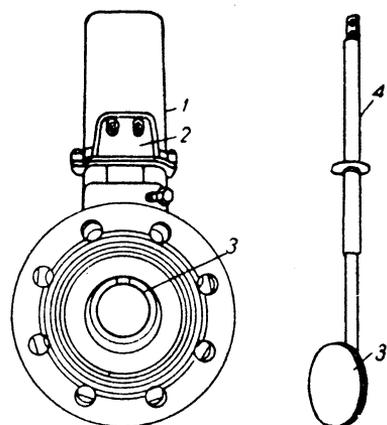


Рис. V-52. Расходомер экранного типа:

1 — преобразователь; 2 — вход и выход воздуха; 3 — диск; 4 — соединительный рычаг.

принимающего давление потока. Диск 3, расположенный в центре потока, удерживается рычагом 4, который уравновешивается давлением воздуха в преобразователе 1. Такая конструкция позволяет тяжелым жидкостям свободно проходить по нижней части трубопровода, а парам или легким жидкостям — по верхней его части.

Давления на две поверхности диска — переднюю и заднюю — неодинаковы, и их разность создает усилие, которому противодействует давление, воздействующее на маленький сильфон. Равновесие этих двух сил поддерживается с помощью обычного чувствительного механизма типа «сопло-заслонка».

успехом использованы для измерения уровня жидкости в сосуде. Для этих целей применяются:

1. Измерение гидростатического напора жидкости.
2. Измерение подъемной силы, действующей на чувствительный элемент, который частично или полностью погружен в жидкость.
3. Измерение температуры жидкой и газообразной фаз в сосуде.
4. Измерение каких-либо физических или электрических свойств жидкости, осуществляемое с помощью различных электрических систем.

Косвенные методы менее точны по сравнению с прямыми, так как измерение уровня в этом случае производится путем определения других параметров жидкости. Например, изменение плотности жидкости вследствие изменения ее состава или температуры увеличит погрешность измерения уровня практически при применении любого из косвенных методов.

Поплавковые механизмы

Физический предмет, плавающий на поверхности жидкости, можно использовать для прямого измерения уровня жидкости. Размер, форма или материал предмета могут быть любыми. Наиболее распространен полый металлический шар, так как металл не абсорбирует жидкость и плавучесть поплавка поэтому не меняется; кроме того, при сферической форме поплавок выталкивающая сила на единицу его веса максимальна.

Шар, укрепленный на рычаге, ось которого вращается в подшипниках, цапфах или сальниках, снабжен указателем, перемещающимся вдоль шкалы (рис. V-57).

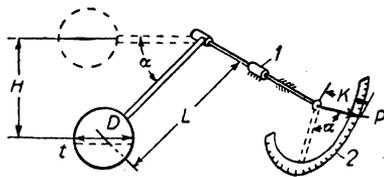


Рис. V-57. Схема механизма с шаровым поплавком:
1 — подшипник; 2 — шкала.

Для максимальной чувствительности шар-поплавок подбирается такого веса, чтобы он погружался в воду до плоскости наибольшего сечения (центр шара совпадает с плоскостью уровня). Когда уровень жидкости поднимается или опускается, поплавок перемещается вместе с жидкостью, преодолевая силу трения в подшипниках и инерцию подвижных частей прибора.

Поплавковые клапаны

Имея устройство для измерения уровня, можно создать регулятор уровня — поплавок с клапаном (рис. V-58). В таких приборах поплавок непосредственно перемещает шток клапана, открывая или закрывая проходное отверстие, и, следовательно, регулирует количество жидкости, поступающей в сосуд, поддерживает уровень на заданном значении. Поплавковые клапаны применяются в открытых водоемах, резервуарах, маслобункерах, спускных бачках и т. д.

Регулирующее устройство, роль которого выполняет клапан, должно быть расположено по возможности

близко к поплавку, так как имеет с ним непосредственную механическую связь. Ход клапана обычно составляет 12—18 мм. Применение таких регуляторов ограничено тем, что при перемещении поплавка развивается недостаточный большой вращающий момент, необходимый для преодоления кинетической энергии жидкости, например, динамического напора, вызванного перепадом давления в клапане. Это ограничивает использование регуляторов, так как при еще приемлемых размерах поплавка перепад давления в клапане не должен превосходить 70 м вод. ст.

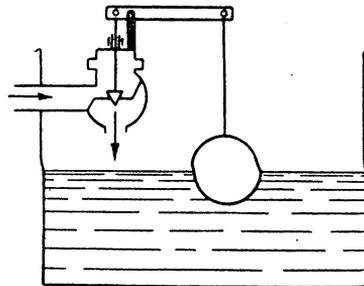


Рис. V-58. Схема поплавкового клапана.

Управляющий уровнемер с реле. Ограничения, накладываемые на измерения и регулирование уровня жидкости с помощью прямой механической связи, привели к созданию релейных приборов. Поплавок измерительного и регулирующего устройства, находящийся внутри резервуара, снабженного сальником, имеет релейное

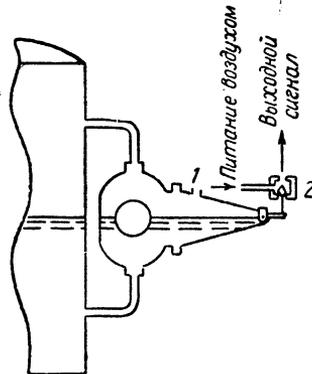


Рис. V-59. Поплавковый уровнемер с управляющим реле:

1 — отверстие для промывки или продувки; 2 — управляющее реле.

(или золотниковое) приспособление (рис. V-59). Поворот оси, происходящий вследствие изменения уровня жидкости внутри резервуара, передает движение поплавку пневматическому управляющему реле, с помощью которого сигнал (давление воздуха) поступает на показывающий уровнемер или к диафрагме исполнительного механизма для регулирования уровня.

Поплавковые уровнемеры с цепью или тросом. В уровнемерах этого типа поплавок связан гибкой цепью или тросом с поворотным барабаном, который,

поршень или измерительный плунжер. Отверстия, обычно прямоугольные, вырезаны в стенке цилиндра. Эти отверстия открываются при движении поршня или плунжера до тех пор, пока не будет достигнута достаточная площадь сечения окна для прохода измеряемого потока. Эта площадь ограничивается с трех сторон кромками отверстия, а с четвертой — нижним краем поршня. Положение поршня или измерительного плунжера, таким образом, обеспечивает прямую индикацию площади проходного отверстия и, следовательно, скорости потока (рис. V-54).

Объемные расходомеры

Счетчики жидкости объемного типа делятся на четыре основные группы: 1) поршневые, 2) скоростные, 3) клапанные, 4) дисковые. Последний тип счетчиков используется гораздо чаще остальных.

Основные требования к счетчикам жидкости объемного типа: 1) простота конструкции, позволяющая обслуживать и ремонтировать аппаратуру без специально обученного персонала; 2) точность работы с заданными допусками, так как эксплуатационники редко имеют специальную аппаратуру для проверки характеристик счетчиков, и 3) по возможности, небольшое гидравлическое сопротивление.

Дисковый счетчик. Этот прибор, который называют наклонно-поршневым счетчиком, — наиболее широко распространенный счетчик жидкости объемного типа в США (рис. V-55). За каждый цикл — полный оборот

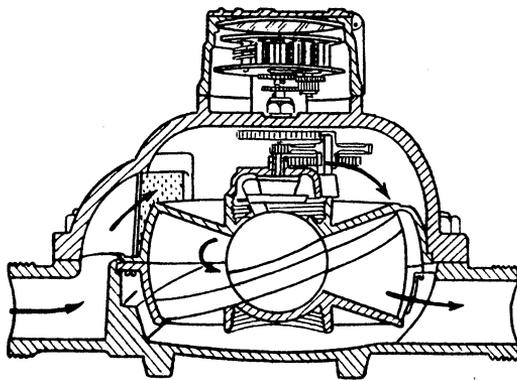


Рис. V-55. Дисковый счетчик жидкости.

измерительного диска — перемещается определенный объем жидкости. Заметим при этом, что единственное механическое движение, которое происходит в измерительной камере, — это движение диска. Жидкость поступает через входное окно и заполняет пространство над и под диском, который плотно прилегает к стенкам камеры. В результате дальнейшего поступления жидкости диск передвигается до тех пор, пока она не выйдет через выходное отверстие.

Скоростные (ротационные) счетчики. Эти счетчики более известны под названием измерителей скорости потока. Они работают по принципу турбины, т. е. объем измеряется по числу оборотов колеса или импеллера турбинного типа, на которое воздействует поток жидкости, вращающей это колесо. Используются для измерения стационарных потоков с высокими скоростями, при этом потери давления минимальны.

На рис. V-56 — типичный измеритель скорости течения. В нем два импеллера, расположенные на вертикальной оси, которая опирается на агатовый подпятник. Лопастей одного импеллера образуют правый, а другого — левый винт. Входящий поток жидкости делится на два равных потока, которые протекают через соответственные импеллеры в равном объеме и с равной скоростью.

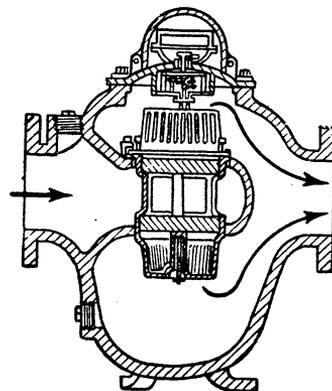


Рис. V-56. Измеритель скорости потока.

Скорость вращения импеллера является функцией скорости жидкости, протекающей через измерительную камеру, и, следовательно, функцией объема жидкости.

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

Приборы для измерения уровней оценивают высоту уровня по положению поверхности жидкости относительно заданной плоскости или по гидростатическому напору (давлению), оказываемому жидкостью, уровень которой измеряется. Тем не менее эти величины обычно не выражают непосредственно в сантиметрах или метрах превышения уровня над заданным нулевым значением или в единицах гидростатического напора; обычно измерения показывают (в результате соответствующей градуировки) объем имеющейся жидкости, если размер и форма емкости известны. Зная удельный вес жидкости, можно выразить данные измерений уровня в весовых единицах.

Прямые и косвенные методы

Прямые методы. Эти методы основаны на непосредственном измерении расстояния (обычно высоты) между уровнем жидкости и заданной линией. Они могут включать в себя:

1. Визуальное наблюдение за уровнем по шкале, на которой нанесены соответствующие деления.
2. Определение положения чувствительного элемента, который движется вместе с поверхностью жидкости (например, уровнемеры поплавкового типа).
3. Электрический сигнал, полученный с помощью электрода, соприкасающегося с поверхностью жидкости.
4. Прерывание луча света, падающего на фотозлемент.
5. Отражение радиоволн или звуковых волн от поверхности жидкости.

Косвенные методы. Различные явления, не связанные с перемещением поверхности жидкости, могут быть с

Уровнемеры, работающие по принципу выталкивания

Со времени изобретения уровнемера такого типа измерительные устройства и регуляторы на его основе получают все большее распространение, особенно в управлении процессами. Это становится понятным при рассмотрении его конструктивных и эксплуатационных преимуществ. Контрольно-измерительные приборы, использующие выталкивание поплавка, делятся на две основные категории: приборы, использующие скручивающуюся трубку, и приборы, работающие на принципе силовой компенсации.

Прибор со скручивающейся трубкой (рис. V-63). Поплавок 1 подвешен к одному концу стержня 2, в то время как другой конец стержня скреплен со скручивающейся трубкой 5, лежащей на опоре 3. Трубка 5 расположена под углом 90° к стержню 2. Она запрессована в муфту 4, а фланец 7, привинченный к ней, служит для крепления всего устройства к стенке резервуара с жидкостью. Ось 6, проходящая внутри трубки 5 (соосно с ней), прикреплена к муфте 4.

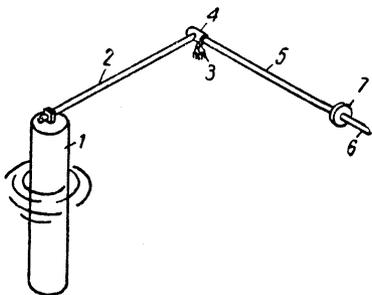


Рис. V-63. Схема соединения поплавка со скручивающейся трубкой:

1 — поплавок; 2 — стержень; 3 — опора; 4 — муфта; 5 — трубка; 6 — ось; 7 — фланец.

При подъеме уровня жидкости, окружающей поплавков, количество вытесняемой им жидкости увеличивается, вследствие чего увеличивается и сила, выталкивающая поплавок. Благодаря этому поплавок немного поднимается (всплывает) и рычаг 2 поворачивается вокруг оси трубы 5 вместе с муфтой 4. Так как рабочая ось 6 жестко связана с муфтой 4, то она также поворачивается на соответствующий угол, прямо пропорциональный изменению уровня жидкости; таким образом, измеряя угол поворота оси, можно в определенном масштабе измерить приращение уровня.

Стрелка измерителя может быть укреплена непосредственно на рабочей оси 6 за фланцем 7, что дает возможность прямого отсчета изменения уровня по шкале, но очень редко используется практически ввиду малой величины угла поворота оси и узости диапазона измерений.

Прибор, работающий по принципу силовой компенсации. Другая конструкция, использующая принцип выталкивания, показана на рис. V-64. Здесь перемещение выталкиваемого поплавка с помощью качающегося рычага, проходящего через герметизирующую мягкую крышку (или гибкую трубку), поступает на преобразователь механического перемещения в пневматический сигнал. Преобразователь построен на принципе силовой

компенсации. При подъеме уровня поплавков становится легче из-за дополнительного вытеснения жидкости, вследствие чего под сильфоном 3 заслонка приближается к соплу. Это вызывает увеличение давления в пневматическом усилителе, в результате чего выходное

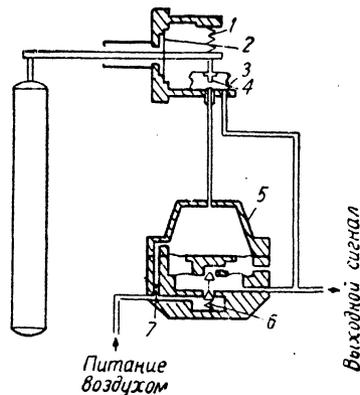


Рис. V-64. Схема поплавкового уровнемера с уплотнением гибкой мембраной:

1 — уравновешивающая пружина; 2 — герметизирующая гибкая мембрана; 3 — сильфон; 4 — сопло с заслонкой; 5 — пневматический усилитель; 6 — пружина; 7 — дроссель.

давление, поступающее к индикатору или к питающему клапану, также увеличивается. Это давление по каналу обратной связи поступает под сильфон 3, чтобы уравновесить действие пружины 1 и вернуть поплавок в прежнее положение¹.

Гидростатические методы

Измерение и автоматическая стабилизация уровня жидкости в сосудах с использованием для этих целей гидростатического напора столба жидкости требует применения серийных манометров и стандартных моделей дифманометров, используемых обычно для измерения расходов или разности давлений.

Дифманометры можно использовать для измерения уровня не только в сосудах под давлением, но и в открытых сосудах. В этом случае трубка дифманометра, воспринимающая меньшее давление, просто открыта в атмосферу, в то время как в закрытых сосудах эта трубка используется для подвода давления, под которым находится жидкость в сосуде. Это давление, таким образом, подводится с обеих сторон столба жидкости и уравновешивается; остается только одна переменная — гидростатический напор, зависящий от уровня жидкости.

Системы с применением гидростатических методов измерения уровня жидкости в закрытых и открытых сосудах можно классифицировать следующим образом:

1) системы с наличием прямой связи между гидростатическим напором столба жидкости и измерительным прибором;

¹ Перемещение заслонки не превышает 10–20 мкм, поэтому поплавок практически не всплывает, но выходное давление всегда пропорционально силе, выталкивающей поплавок. — *Прим. ред.*

в свою очередь, связан с индикатором (рис. V-60). Чтобы цепь не проскальзывала, ее надевают на зубчатое колесо, скрепленное с поворотным барабаном; если вместо цепи применен трос, то он наматывается на барабан.

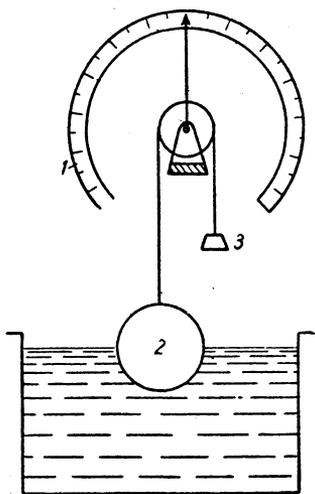


Рис. V-60. Поплавковый уровнемер с цепью или тросом:
1 — шкала; 2 — поплавок; 3 — противовес.

Эти уровнемеры могут быть установлены как внутри бака или сосуда, так и в длинной трубе, расположенной рядом с сосудом и сообщающейся с ним.

Поплавковые уровнемеры магнитного типа

Проблема создания герметичных сальников в поплавковых уровнемерах заставила исследовать возможность создания приборов, которые использовали бы магнитные силы для слежения за положением поплавка. Ниже описаны два таких прибора: поплавок с указателем которого соединен с поплавком при помощи магнитной связи, и поплавок с переключателем, приводимым в действие магнитом.

Уровень с магнитной связью. В поплавковом механизме с магнитной связью используется магнит, скрепленный с поплавком, плавающим на поверхности жидкости (рис. V-61). Магнитные силы связывают этот магнит с другим магнитом, установленным на тяге, управляющей заполнением бака или индицирующей уровень. Хотя на рисунке изображен поплавок в форме торонда, но он может иметь форму шара, диска и т. д. Для воздействия магнитного поплавка на управляющие или индицирующие органы могут быть использованы и многочисленные другие конструктивные варианты, реализующие этот принцип.

Поплавковый магнитный переключатель. В другом поплавковом механизме магнитные силы используются для управления ртутным переключателем (рис. V-62). В этом приборе вместе с шаровым поплавком перемещается намагниченный поршень, связанный с поплавком штоком; он движется вверх и вниз в закрытой немагнитной трубке (это видно на рисунке). Снаружи немагнитной трубки находится постоянный магнит (материал — альнико), который прикреплен к одному из плеч качающегося рычага; его другое плечо несет ртут-

ный переключатель («свинку»). Когда уровень поднимается, намагниченный поршень притягивает постоянный магнит, при этом ртутный переключатель опрокидывается в крайнее положение, замыкая (или размыкая,

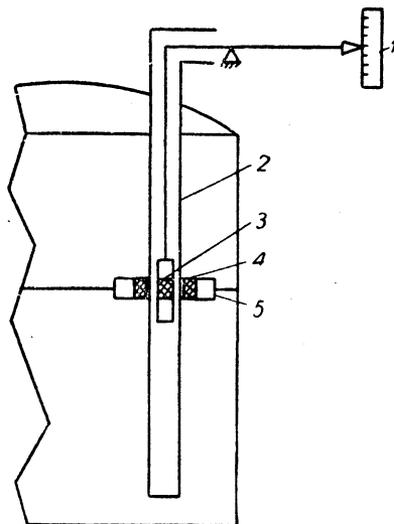


Рис. V-61. Схема поплавкового уровнемера с магнитной связью:
1 — шкала; 2 — немагнитная погруженная в жидкость труба; 3 — внутренний магнит; 4 — внешний магнит; 5 — поплавок торондного типа.

если нужно) контакт. Когда уровень опускается ниже заданного значения, поршень опускается и перестает удерживать постоянный магнит, который оттягивается

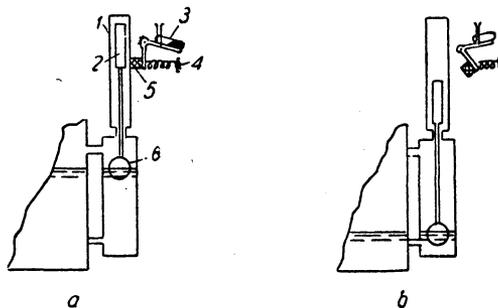


Рис. V-62. Схема поплавкового магнитного переключателя:

a — высокий или нормальный уровень (ртутный переключатель разомкнут); *b* — низкий уровень (ртутный переключатель замкнут).
1 — наружная немагнитная трубка; 2 — магнитный поршень; 3 — ртутный переключатель; 4 — натяжная пружина; 5 — постоянный магнит; 6 — поплавок.

с помощью пружины, опрокидывая ртутный переключатель в другое крайнее положение. Различные варианты управляющих воздействий могут быть осуществлены путем выбора соответствующего типа переключателя,

- 2) системы со связью посредством мембранного устройства;
- 3) системы с воздушным сифоном;
- 4) системы с непрерывной продувкой воздуха;
- 5) уравновешенные системы и
- 6) системы с двумя диафрагмами.

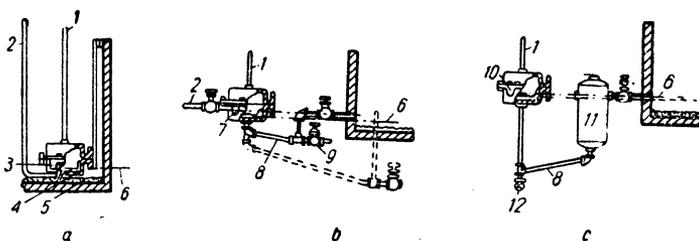


Рис. V-65. Системы с мембранной коробкой для открытых сосудов: *a* — мембранная коробка открытого типа, погруженная в жидкость; *b* — мембранная коробка закрытого типа, помещенная вне сосуда; *c* — мембранная коробка закрытого типа для измерения уровня агрессивных жидкостей. 1 — трубка для присоединения к манометру; 2 — трубка для подачи промывающей жидкости; 3 — отверстие; 4 — открытый конец; 5 — осадок; 6 — нулевой уровень; 7, 10 — заглушка; 8 — сливная труба (наклон примерно 1 : 12); 9 — слив промывающей жидкости; 11 — бачок с разделительной жидкостью (маслом); 12 — клапан для спуска отстоя.

Различные системы с диафрагмой показаны на рис. V-65; система с непрерывной продувкой воздуха показана на рис. V-66.

Ртутные манометры

Различные приборы, сконструированные для измерения разности давлений или расхода жидкости, можно довольно легко приспособить для измерения уровня жидкости гидростатическим методом. В число таких приборов входят ртутные манометры и некоторые расходомеры, описанные в этой главе. Способы применения и принципы работы систем с этими приборами

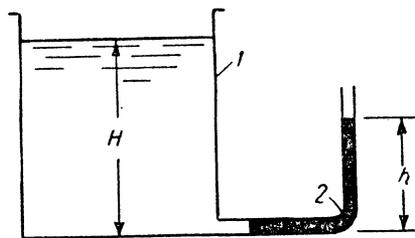


Рис. V-67. U-образный манометр для открытых сосудов: 1 — сосуд; 2 — трубка манометра.

очень различны, в зависимости от того, производится ли измерения в открытых сосудах или в закрытых; эти два варианта рассматриваются по отдельности и для ртутных манометров.

Для выбора манометра, с помощью которого производятся измерения уровней жидкости, существенно следующие характеристики: 1) максимальный и минимальный пределы измерения и 2) полнота компенсации изменения удельного веса жидкости в сосуде. Вторая характеристика исключительно важна при использова-

нии гидростатических методов, так как изменения удельного веса при неизменной высоте столба жидкости искажают величину гидростатического напора. В манометрах некоторых типов компенсация изменения удельного веса достигается специальным приспособлением (иногда называемым устройством «скользящей

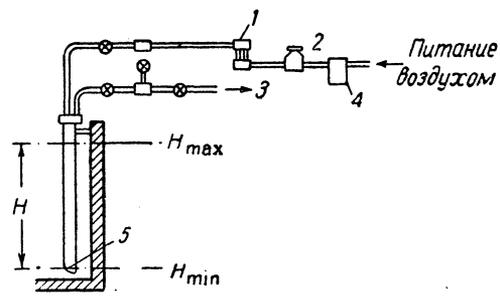


Рис. V-66. Пьезометрический уровнемер для открытых сосудов:

1 — ротаметр с игольчатым клапаном; 2 — регулятор давления; 3 — труба для присоединения к манометру; 4 — фильтр; 5 — пьезометрическая трубка (для уровней меньше 375 мм конец трубки должен быть скошен).

чувствительности), которое увеличивает ход пера самописца или стрелки указателя пропорционально отношению изменившегося удельного веса к начальному. В других случаях просто вводится поправочный коэффициент.

Измерения в открытых сосудах. Простой U-образный манометр можно использовать для измерения уровня в открытом сосуде гидростатическим методом, присоединив манометр к крану, расположенному на минимальном уровне, так же, как это описано ниже для

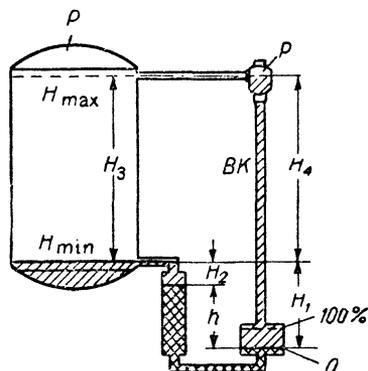


Рис. V-68. Схема соединения дифманометра с сосудом, находящимся под давлением (электрическая регистрация положения поплавка).

обычных манометров. Рис. V-67 иллюстрирует включение такого прибора и одновременно объясняет принцип работы дифманометра при его применении в открытых сосудах.

Измерения в закрытых сосудах. Как видно из рис. V-68, присоединение ртутных манометров для из-

зано с процентным содержанием искомого вещества. Такие приборы могут работать совместно со многими колориметрическими аналитическими приборами.

Хроматография. Принцип работы заключается в следующем. Смесь пропускается через адсорбционную или разделительную колонку. Система двухфазная, и различие в равновесии между двумя фазами используется для разделения химических компонентов, различающихся константами химического равновесия. Исследуемый материал и носитель образуют так называемую мобильную фазу, в то время как сорбент в колонке относится к стационарной (статической) фазе. Мобильная фаза может быть газом или жидкостью, в то время как стационарная фаза может быть только жидкостью или твердым телом.

Непрерывные химические определения. Для анализа проб газов и жидкостей можно использовать несколько лабораторных методик, с помощью которых по изменению электропроводности, окраски или выпадению осадков может быть определена концентрация неизвестного элемента в пробе.

Реакции окисления. Используются для горючих газов и паров в воздухе или другой среде, которая обеспечивает протекание реакции окисления. Газы или пары воспламеняются при соприкосновении с нагретыми электрическим током проволочками, которые имеют большой температурный коэффициент электросопротивления. Изменение сопротивления этих проволочек, измеренное с помощью мостовой схемы, позволяет количественно оценить реакцию окисления и, следовательно, определить процентное содержание горючего газа или пара.

Другие типы реакций. В основном применяются для паров и газов. Экзотермическая реакция неизвестного элемента в пробе с каким-либо реагентом вызывает повышение температуры смеси, которое может быть измерено любым удобным методом. Используется для H_2O , O_2 , CO_2 , H_2 и некоторых спиртов.

Редоксметрия. Используется для растворов, в которых могут существовать как окисленная, так и восстановленная формы неизвестного элемента. По потенциалу индифферентного индикаторного электрода может быть определена относительная концентрация этих двух форм.

Концентрация водородных ионов или pH. Особый случай редоксметрии для измерения концентрации водородных ионов, когда одним из компонентов окислительно-восстановительной системы является водородный электрод. Используется преимущественно для слабых водных растворов щелочей и кислот.

Металло-ионное равновесие. Другой частный случай редоксметрии, когда один компонент окислительно-восстановительной системы — металлический электрод — твердое тело. Потенциал такого электрода зависит от концентрации определенного иона.

Измерения, основанные на изменениях тока, напряжения или магнитного потока в электрических или магнитных цепях, содержащих исследуемую пробу

Масс-спектрометрия. 1. *Tun Найра* (Nier). Обычный масс-спектрометр, использующий электронную ионизацию пробы газа или пара, находящегося при низком давлении, электростатическое ускорение ионов, отклонение в магнитном поле с целью разделения масс и

измерение тока ионизации для проведения количественного анализа.

2. **Омегаатрон.** Специальный прибор, в котором ионы в мощном однородном магнитном поле занимают характерные орбиты, параметры которых определяются отношением массы иона к его заряду.

3. **Время пробега.** Новейший метод, использующий импульсную технику для ускорения пучков ионов в отклоняющей системе. Разделение ионов с различными массами производится путем измерения времени вращения ионов на коллектор.

Электровесовой анализ. Основная электрохимическая методика для количественного анализа растворов, содержащих окисляемые или восстанавливаемые вещества. Измерения основаны на определении веса осажденного на электроде вещества.

Полярография. Применяется к водным и неводным растворам. Измерения производятся периодически. Могут быть использованы микроэлектроды. С увеличением приложенного напряжения достигается предельный диффузионный ток; он пропорционален концентрации восстанавливаемых (или окисляемых) ионов в растворе. Потенциал полуволны определяет химическую принадлежность иона¹.

Кулонометрия. Применяется к растворам; при этом измеряется количество электричества, прошедшее через раствор при постоянном значении приложенного потенциала. Некоторые модификации этой методики используются в автоматических титраторах.

Амперометрия. Метод объемного анализа, в котором достижение момента эквивалентности определяют по величине диффузионного тока (полярография).

Методы «полной остановки». Ток, протекающий между двумя индифферентными платиновыми микроэлектродами при постоянной разности потенциалов менее 0,5 в, пропорционален концентрации микропримесей в обратной окислительно-восстановительной системе. Используется в основном для галогенных и железосодержащих систем.

Электропроводность. Используется для растворов, шламов и влажных твердых тел. Особенно часто применяется для определения чистоты воды. Для измерения используется мостовая схема на сопротивлениях, питаемая переменным током для предотвращения эффекта поляризации. Электропроводность зависит от подвижности и концентрации ионов.

Диэлектрическая постоянная и коэффициент потерь. Обеспечивает примерно ту же информацию, что и метод электропроводности, но не требует контакта электродов с пробой (раствором). Используется для определения очень малых количеств воды в органических системах или твердых телах.

Парамагнетизм. Необычное физическое свойство, проявляющееся в существенной мере только у кислорода и оксидов азота. Эти газы притягиваются магнитным полем и выталкивают другие вещества; определение их концентрации возможно путем непосредственного измерения выталкивающей силы или на основе измерения потерь тепла при омывании нагретого тела.

Ядерный магнитный резонанс. Ядерный спин в элементах и изотопах, имеющих нечетные атомные номера, вызывает поглощение радиочастотного излучения в однородном магнитном поле. Высокочувствительная техника для газов, жидкостей и некоторых твердых тел; требует весьма сложного оборудования.

¹ Название вещества по измеренному потенциалу находят в таблицах полярографических данных. — *Прим. ред.*

Измерения, основанные на электромагнитном излучении

Описанные ниже методы основываются на эмиссии, отражении, пропускании или на дифракции электромагнитного излучения.

Эмиссионная спектроскопия. Используется в основном для анализа металлов и твердых веществ, но применима также для анализа жидкостей и газов. Состав образца, термически возбужденного бомбардировкой ионами и электронами в электрической дуге или в искре, определяется по числу и характеру длин волн в спектре испускания (эмиссионном спектре), а по интенсивности спектральных линий определяется количественное содержание элемента (элементов).

Фотометрия пламени. Обычно используется для определения щелочных металлов по спектру возбуждения. Метод аналогичен эмиссионной спектроскопии с тем отличием, что здесь могут использоваться простые оптические системы со светофильтрами вместо монохроматоров.

Флуоресценция. Может применяться в видимой и ультрафиолетовой областях для идентификации и анализа пигментов, красителей, нефтяных продуктов и фосфоров. Количество и спектральное распределение испускаемого излучения указывают на присутствие определенных атомов, кристаллов или молекул.

Рамановская спектроскопия. Удобен для анализа чистых водных растворов, свободных от взвешенных частиц. Помогает в идентификации молекул подобно инфракрасной технике, но основана на анализе света, который излучается фотовозбужденным образцом.

Искусственная радиоактивность. Применяется для идентификации некоторых элементов в образцах путем анализа и измерения радиоактивного распада продуктов после ядерного облучения образца.

Рентгенофлуоресцентный анализ. Анализ твердых тел, таких как металлы и сплавы, путем наблюдения спектральных характеристик рентгеновского излучения образца, подвергнутого бомбардировке электронами с высокой энергией или действию рентгеновских лучей.

Рентгенографические методы анализа. 1. По измерению поглощения определяют тяжелые элементы в присутствии более легких, например, свинец или бром в газолине.

2. Измерения граничного предела поглощения позволяют идентифицировать и определять элементарный состав.

3. Дифракционные изображения определяют кристаллическую структуру и, следовательно, состав твердых кристаллических тел.

Ультрафиолетовая спектроскопия. Применяется для анализа многих молекул в газах и жидкостях, таких как Cl_2 , SO_2 , NO_2 , CS_2 , озон, ртутные пары и различные ненасыщенные органические вещества. Хотя этот метод не так специфичен, как инфракрасная спектроскопия, но иногда он предпочтительнее, так как более сильно поглощающие свет полосы позволяют обнаруживать меньшие количества неизвестного вещества.

Обычная фотокolorиметрия. Этот метод подобен ультрафиолетовой спектроскопии, но здесь используются простые оптические фотометры или фотокolorиметры, снабженные светофильтрами для обнаружения и измерения окрашенных соединений и осадков, поглощающих свет.

Рассеяние света. Используется для измерения молекулярных весов жидкостей и размера частиц в разбавленных суспензиях газов и жидкостей.

Оптическое вращение (поляриметрия). Специализированный метод, использующий поляризованный свет для измерения концентрации сахара и подобных растворов.

Показатель преломления. Пригоден для определения концентрации оптически чистых бинарных растворов, которые не образуют осадков на окошках кювет или призмах. Используется также для сортировки твердых оптических тел — таких как стекла и пластики.

Инфракрасная спектроскопия. Используется для идентификации и измерения концентрации гетероатомных соединений в газах, многих неводных жидкостях и в некоторых твердых телах. В инфракрасных анализаторах используются упрощенные оптические системы. Эти анализаторы удобны для непрерывных анализов одного компонента в потоке газа или жидкости.

Микроволновая спектроскопия. Новый метод, имеющий ограниченную применимость и чувствительность, но большую разрешающую способность определения молекулярного состава газов и паров.

Ядерный квадрупольный момент. Многообещающий исследовательский метод структурной идентификации и количественных измерений для большинства газов, жидкостей и твердых тел. Использует узкополосное радиочастотное резонансное поглощение.

Измерения, основанные на химических реакциях

Нижеследующие методы основаны на измерении результатов взаимодействия исследуемого образца с другими химическими веществами, а именно на измерении количества израсходованных реагентов, выхода нового продукта или высвободившейся тепловой энергии.

Анализатор Орса. Использует изменение отмеренного объема анализируемой газовой смеси, происходящее при количественном избирательном поглощении компонентов газовой смеси рабочими жидкостями. Анализатор Орса периодического действия, но может работать непрерывно при использовании пневматического моста или дифференциального измерителя давления газовых потоков. Этот анализатор предназначен для газовых смесей, состоящих из CO_2 , O_2 , CO и N_2 (по непоглощаемому остатку)¹.

Автоматические титраторы. Применяются для количественного анализа с измерением потока реагента или электролитической генерацией реагента и с последующим потенциометрическим, амперометрическим или колориметрическим нахождением конца титрования.

Титраторы бывают последовательного или непрерывного действия и применяются для анализа проб газов и жидкостей.

Приборы, основанные на окрашивании бумажной ленты. В основном применяются для анализа газов. Непрерывно перематываемая с рулона химически обработанная бумажная лента соприкасается с анализируемой газовой смесью и подвергается воздействию содержащегося в ней искомого вещества; количество последнего оценивается с помощью фотоэлемента, реагирующего на изменение окраски, которое эмпирически свя-

¹ Прибор ВТИ позволяет определять газовые смеси CO_2 , O_2 , N_2 , CO и N_2 , сумму непредельных и сумму предельных углеводородов. — *Прим. ред.*

лировки, имеющейся в приборе. Она позволяет установить указатель измерения на нужное деление шкалы рН, когда электроды погружены в буферный раствор с известным рН. Последующие измерения производятся относительно этой эталонной точки. Если электроды и измеритель работают стабильно, необходимо только время от времени проверять начальную установку. После установки «свежих» электродов требуется более

смой ячейки может использоваться для автоматического управления процессами либо путем непосредственного воздействия выходного сигнала рН-метра на исполнительный механизм, либо с помощью регулирующего устройства самописца. Автоматическое управление в химических производствах тесно связано с развитием рН-метрии.

Непрерывное управление величиной рН или восстановительно-окислительным потенциалом в сосудах или потоках и регистрация этих величин ставят ряд проблем, которые не встречались при записывании кривых титрования. Большое значение приобретает дрейф нуля рН-метра, требуется автоматическая температурная компенсация. Кроме этого, возникают еще специальные проблемы, связанные с градуировкой прибора, дистанционной записью и многократной регистрацией. Два

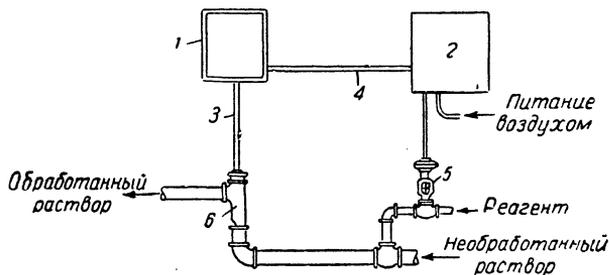


Рис. V-72. Принципиальная схема автоматического регулирования рН:

1 — усилитель рН-метра; 2 — пневматический регулятор; 3 — экранированный кабель; 4 — двухжильный кабель; 5 — мембранный исполнительный механизм, управляющий клапаном; 6 — ячейка с электродами.

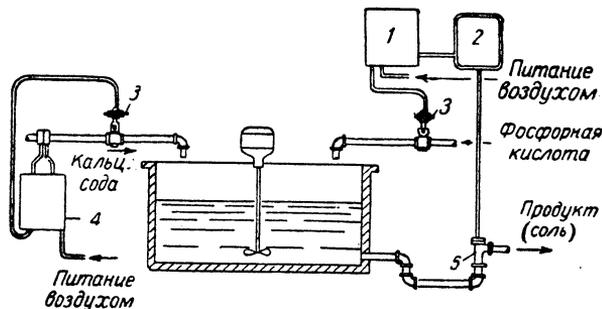


Рис. V-73. Схема непрерывной автоматической нейтрализации при производстве двунатревой соли фосфорной кислоты с помощью автоматических регуляторов расхода и рН:

1 — записывающий рН-регулятор; 2 — усилитель рН-метра; 3 — мембранный исполнительный механизм, управляющий клапаном; 4 — записывающий регулятор расхода; 5 — ячейка проточного типа с рН-электродами.

частая настройка. Одним из наиболее широко используемых буферных растворов для калибровки рН-метров является 0,05-молярный (или 0,05-моляльный) раствор калиевой соли фталевой кислоты. Значения рН этих растворов определены Национальным бюро стандартов и Британским институтом стандартов. Значения рН 0,05-моляльного раствора калиевой соли фталевой кислоты при температуре от 0 до 60°С для калибровки рН-метров приведены ниже:

t, °C	pH ¹	pH ²
0	4,012	4,01
5	4,005	4,01
10	4,001	4,00
15	4,000	4,00
20	4,001	4,00
25	4,005	4,01
30	4,011	4,01
35	4,019	4,02
40	4,030	4,03
45	4,043	4,04
50	4,059	4,06
55	4,077	4,08
60	4,097	4,10

¹ По данным Национального бюро стандартов.

² Округленные значения.

типичных примера использования рН для автоматического управления показаны на рис. V-72 и V-73. Точность управления, достигнутая в системе, показанной на рис. V-73, обеспечивает чистоту получаемого продукта и снижает потери.

Измерения других параметров процессов

Детальное описание систем автоматического управления по другим переменным параметрам химических процессов здесь не приводится. Однако в табл. V-14—V-18 дано краткое описание наиболее важных типов приборов для измерения самых существенных параметров¹.

Автоматическое управление процессами с помощью рН-метров. Напряжение (точнее, э. д. с.) электрохимиче-

¹ Olive, Danatos, Guide to Process Instrument Elements, New York.

Измерения, основанные на результатах воздействия тепловой или механической энергии на исследуемые системы

Эти измерения выражаются в единицах переданной энергии или оцениваются по изменению физического состояния.

Теплопроводность. Используется для ряда широко распространенных газовых смесей, особенно в бинарных системах, теплопроводности компонентов которых значительно отличаются друг от друга. Этим способом измеряют концентрацию CO , CO_2 , H_2 , NH_3 , SO_2 и H_2S в воздухе, кислороде или азоте. Наблюдают обычно за изменением температуры тонкой нагреваемой проволоки, которая охлаждается потоком исследуемого газа или пара.

Точки плавления или кипения. Это основные физические константы; если периодически измерять температуру вещества во время непрерывного нагревания или охлаждения его с постоянной скоростью, то в точке перехода в новое физическое состояние определяются названные константы. Эти измерения часто позволяют оценить чистоту многих химических веществ.

Точки замерзания (кристаллизации). Если раствор при охлаждении достигает такой температуры, что один из компонентов кристаллизуется, то определение этого компонента может быть сделано 1) путем периодического взвешивания выделенного вещества (при этом предполагается, что раствор насыщен этим компонентом); 2) путем переохлаждения и наблюдения оптическими средствами за образованием кристаллов или 3) измерением температуры, при которой они начинают образовываться.

Точка росы. Подобна точке замерзания, но применяется для паро-газовых систем. Особенно часто используется для определения начала конденсации водяного пара. Измеряют температуру, при которой поверхность, соприкасающаяся с исследуемой смесью, покрывается росой (конденсатом). Этот метод может быть применен при автоматическом управлении.

Давление пара. Состав простой системы может быть определен путем измерения давления пара при известной температуре поверхности раздела жидкость — пар.

Фракционирование. Разделение проб жидкости путем дистилляции на фракции, наряду с количественным определением весового или объемного состава, дает дополнительные данные, пригодные для идентификации фракций.

Тепловое расширение. Состав твердых тел и жидкостей иногда может быть определен (для известных систем) по характеристикам изменения длины или объема в зависимости от температуры.

Вязкость. Определяется внутреннее трение жидкой среды при помощи механического устройства, погруженного в жидкость, путем измерения затухания продольных или поперечных колебаний или измерения сопротивления потоку. Результаты измерений могут характеризовать такие переменные величины жидкой среды, как молекулярный вес или концентрация простых растворов и суспензий.

Скорость звука. Состав газов, жидкостей и твердых смесей, особенно бинарных систем, может быть охарактеризован по затуханию или изменению скорости прохождения звуковых волн через образец. Прохождение звука определяет молекулярную структуру и межмолекулярные взаимодействия.

Плотность. Состав простых систем, состоящих из газов и жидкостей, может быть определен с помощью измерения плотности. При этом измеряется или подъемная сила, действующая на поплавки, или силы, передаваемые массой анализируемого вещества, как это делается в измерителях плотности газа, основанных на принципе измерения его вязкости.

Системы измерения рН

Ввиду важности рН-метрии для производственных процессов и частого ее применения (по сравнению с другими способами анализа химического состава), здесь дается краткое описание основ этого способа. Для непосредственного измерения рН применяются:

1) химические индикаторы (измерение по изменению окраски) и 2) потенциометрические приборы, так называемые рН-метры. Первые применяются в основном в лабораториях.

Потенциометрическое измерение рН. Система для потенциометрического измерения рН (рис. V-71) включает в себя: 1) чувствительный к рН электрод, например, стеклянный, сурьмяный, хингидронный или водородный; 2) эталонный электрод, обычно каломельный или хлоросеребряный; 3) измеритель напряжения, обычно прибор типа лампового вольтметра.

рН-метры. Электронные рН-метры представляют собой вольтметры со шкалой, градуированной в единицах рН (единица рН соответствует при 25°C 59,15 мВ). Эти приборы делятся на два основных класса: 1) использующие потенциометрическую схему, у которой выход электронного усилителя подключен к нуль-гальванометру и 2) те, у которых выходное напряжение усилителя подается непосредственно на измеритель. Измерительные приборы могут быть портативными, с батарейным питанием или могут работать от сети. Они снабжаются переключателями для перехода от шкалы рН к шкале милливольтов для измерения потенциалов окислительно-восстановительных процессов. Растущий интерес к окислительно-восстановительным системам делает желательной возможность такого переключения.

Напряжение на паре специальных электродов заданного типа может не быть точно равным нулю при проверке показаний прибора в буферном растворе, на который был рассчитан прибор. Это напряжение называется потенциалом асимметрии; оно различно для отдельных электродов. Так как потенциал стеклянного электрода в зависимости от рН может быть теоретически вычислен, то потенциал асимметрии можно скорректировать с помощью системы автоматической регу-

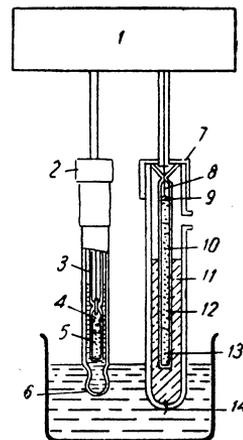


Рис. V-71. Потенциометрическая система измерения рН:

1 — измеритель напряжения (потенциала) с высокоомным входом, откалиброванный в единицах рН; 2 — стеклянный электрод; 3 — буферный раствор; 4 — ртуть; 5 — каломель; 6 — чувствительная к рН стеклянная головка; 7 — эталонный электрод (каломельный); 8 — платиновая проволока; 9 — ртуть; 10 — ртутно-каломельная паста; 11 — насыщенный раствор KCl; 12 — стеклянная вата; 13 — контактная жидкость; 14 — асбестовое волокно.

Рисунок

Принцип действия

Применение

Взвешивание движущихся материалов

Весы управляют работой ленточного питателя. Лента весов движется непрерывно, но материал на нее поступает прерывисто, с интервалами, не загружая полностью ее длину, так что в каждый данный момент взвешивается определенная порция. Эти порции следуют друг за другом, поэтому питание материалом происходит почти непрерывно. Весы соединены с питающим бункером. Питающий бункер наполняется до определенной отметки, после чего питающий клапан закрывается. Бункер разгружается автоматически, вес регистрируется, и цикл повторяется. Для обеспечения точной по весу подачи материала используется отклонение стержня весов, включающего либо двигатель весов, либо двигатель бункера, что позволяет разгружать бункер только в том случае, если вес материала на ленте меньше заданного.

Используются для регистрации приема и выдачи сыпучих материалов, а также для дозирования твердых частиц. Применяется в случаях, когда точность таких расходов, как объемные, или дозирующих насосов — недостаточна.

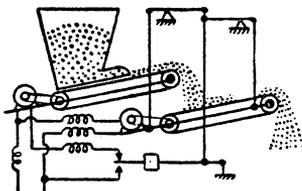


Рис. V-78. Полунепрерывный ленточный весовой питатель.



Рис. V-79. Непрерывные конвейерные весы:
1 — задвижка; 2 — уравновешивающая часть конвейера.

«Взвешивающая» секция ленточного конвейера, используемая для определения общего веса потока материала, выполняется самым различным образом. Применяются разнообразные автоматические устройства, в том числе подпружиненные коромысла, тензометрические системы и самоуравновешивающиеся весы с электрическим приводом. Суммирующее устройство интегрирует мгновенные веса груза по скорости ленты, учитывая таким образом возможные колебания скорости транспортера.

Применяются при взвешивании сыпучих материалов, когда необходима непрерывная регистрация для целей учета. Такие весы быстро реагируют на изменение нагрузки, но следует иметь в виду некоторое уменьшение суммарного веса материала из-за прилипания материала к ленте транспортера.

Дозирующие питатели

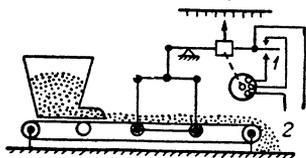
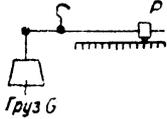
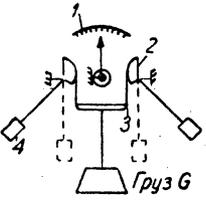
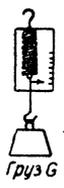
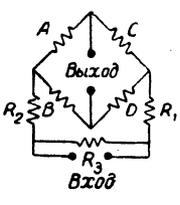


Рис. V-80. Ленточный дозатор с подвижным уравновешивающим грузом:
1 — уравновешивающий двигатель;
2 — линия.

Балансная система управляет заслонкой бункера для поддержания постоянного веса груза на ленте.

Используется для подачи твердых частиц и для поддержания постоянной скорости подачи.

Приборы для измерения веса и весового расхода в потоке

Рисунок	Принцип действия	Применение
 <p data-bbox="12 503 373 572">Рис. V-74. Весы с подвижным грузом.</p>	<p data-bbox="412 247 875 281"><i>Взвешивание с фиксированной нагрузкой</i></p> <p data-bbox="399 298 850 520">Простейшие весы балансного типа. Взвешиваемое тело на коротком плече рычага уравнивается с помощью подвижного груза (или дополнительных гирь плюс груз) на длинном плече рычага. Промышленные весы обычно снабжаются добавочными рычагами, которые увеличивают отношение неизвестного веса к подвижному грузу.</p>	<p data-bbox="869 298 1275 469">Широко используется для промышленных целей. На этом принципе работают как ручные, так и автоматические весы. Индикация возможна на дисковой шкале. Некоторые типы весов печатают вес автоматически.</p>
 <p data-bbox="12 888 373 982">Рис. V-75. Весы с балансирующим маятником: 1 — шкала; 2 — кулачок; 3 — лента; 4 — груз.</p>	<p data-bbox="399 666 850 947">Один или более маятников отклоняются при увеличении веса, так как при этом изменяется создаваемый ими момент силы тяжести (у вертикали нуль, у горизонтали максимум). Так как взвешиваемый груз уравнивается моментом, пропорциональным синусу угла отклонения маятника, то, чтобы получить линейную шкалу, используют кулачки. Кулачок может быть на маятнике или на стрелке. Передача движения — ленточная.</p>	<p data-bbox="869 666 1275 862">Принцип действия используется в торговых и промышленных весах, особенно, если желательна дисковая шкала. Для записи и печати также употребляются весы с фотоэлектрическим выключением. Разрабатывается дистанционная цифровая регистрация для весов.</p>
 <p data-bbox="12 1246 373 1281">Рис. V-76. Пружинные весы.</p>	<p data-bbox="399 1076 850 1263">Растяжение пружины в определенных пределах прямо пропорционально нагрузке, так что растяжение пружины может быть использовано в качестве меры подвешенного веса. Передача нагрузки на пружину может осуществляться также через гидравлическое устройство.</p>	<p data-bbox="869 1076 1275 1238">Этот метод обычно используется для маленьких торговых весов, но применяется также и в автоматических промышленных весах. Он же используется в грузоподъемных весах с крюком и для других промышленных целей.</p>
 <p data-bbox="12 1588 373 1622">Рис. V-77. Весы с тензодатчиком.</p>	<p data-bbox="399 1400 850 1571">Тензометр наклеен на прокалиброванный «тензоэлемент», удлинение которого пропорционально определяемому весу. Изменение сопротивления тензодатчика измеряется в мостовой цепи. Натяжные тензометры могут быть использованы для малых нагрузок.</p>	<p data-bbox="869 1400 1275 1571">Используется для измерения как статических, так и динамических нагрузок. Пригоден для взвешивания цистерн, ящиков. Иногда снабжается автоматическими печатающими устройствами. Нагрузка допускается до 23 т на один датчик.</p>

Рисунок

Принцип действия

Применение

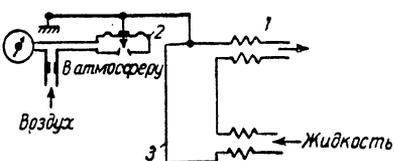


Рис. V-84. Сосуд для взвешивания протекающей жидкости:
1 — гибкие соединения; 2 — преобразователь линейного перемещения в давление воздуха, работающий на принципе силовой компенсации; 3 — взвешиваемый сосуд с протекающей через него жидкостью.

Через сосуд определенного объема непрерывно протекает жидкость; сосуд взвешивается автоматически с помощью весов; на рисунке показано, как вес жидкости, находящейся в сосуде, преобразуется в пропорциональное ему давление воздуха.

Применяется для автоматического регулирования плотности, а также для измерения удельного веса любой жидкости.

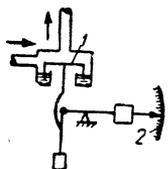


Рис. V-85. Весы для измерения удельного веса газа:

1 — плавающий газовый мерник;
2 — шкала.

Вес газовой колонки в воздухе определяется при помощи коромысла с противовесом и с указателем.

Система, похожая на описанное выше устройство с двумя трубопроводами, только более удобная. Пригодна для любых газов. Позволяет вести запись.

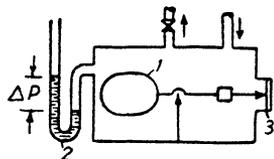


Рис. V-86. Газовый плотномер:
1 — вытеснитель; 2 — манометр; 3 — окно.

Принцип замещения. Вытеснитель, расположенный на конце коромысла весов в сосуде, уравнивается только при определенном давлении нагнетаемого в сосуд воздуха; величина давления считывается по манометру. Затем в сосуд вместо воздуха нагнетают газ, и его давление изменяется до тех пор, пока снова не будет достигнуто равновесие. Соотношение давлений дает плотность газа по отношению к воздуху.

Используется в основном для высокоточных лабораторных измерений.

Нельзя применять для непрерывного контроля.

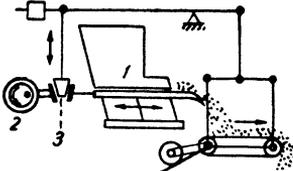
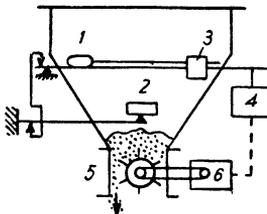
Рисунок	Принцип действия	Применение
 <p>Рис. V-81. Уравновешенная система с механическим питателем: 1 — вибрационный питатель; 2 — эксцентрик; 3 — клин.</p>	<p>Короткая лента транспортера, уравновешиваемая противовесом, загружается с помощью механического вибрационного питателя (в последних моделях — небольшого размера). Подача материала регулируется автоматически подниманием или опусканием упругого клина, через который передаются колебания.</p>	<p>Используется как для подачи всех типов твердых материалов, так и для регулирования скорости подачи. Лопастной питатель с переменной скоростью может быть заменен вибратором. Пределы подачи регулируются от 45 до 4500 кг/ч.</p>
 <p>Рис. V-82. Питатель с уравновешивающим грузом: 1 — двигатель, перемещающий груз; 2 — стержень; 3 — груз; 4 — регулятор; 5 — лопастной питатель; 6 — двигатель с переменной скоростью.</p>	<p>Бункер весов разгружается с помощью лопастного (звездчатого) питателя, вращаемого мотором с переменной скоростью. По коромыслу весов непрерывно перемещается уравновешивающий груз с помощью мотора, вращающегося с постоянной скоростью. Пневматический регулятор стремится уравновесить коромысло, воздействуя на скорость разгрузки бункера.</p>	<p>Применяется при подаче сухих материалов в производстве удобрений, пластмасс и в других отраслях промышленности. Может работать с гранулированными, кусковыми, нитевидными и другими материалами. Скорость перемещающего уравновешивающий груз мотора регулируется. Диапазон подачи от 180 до 18 000 кг/ч.</p>

ТАБЛИЦА V-15

Приборы для измерения и регулирования плотности и удельного веса жидкости

Рисунок	Принцип действия	Применение
 <p>Рис. V-83. Ручной ареометр.</p>	<p>Цилиндрический стеклянный поплавок, загруженный определенным количеством дробы, имеет в верхней части тонкую трубку со шкалой. Чем глубже погружается ареометр, тем меньше удельный вес жидкости, в которую он погружен.</p>	<p>Широко используется в тех случаях, когда не требуется автоматического управления.</p>

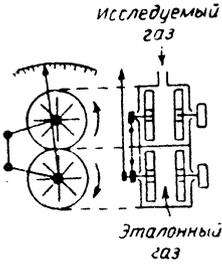
Рисунок	Принцип действия	Применение
 <p>Исследуемый газ</p> <p>Эталонный газ</p>	<p>Использован принцип вязкости. Вращающиеся импеллеры в эталонной и измерительной газовой камерах создают противоположно направленные потоки в газовых колонках. Невращающиеся импеллеры, связанные шарнирно между собой, измеряют разность воздействий. Точка равновесия зависит от плотности испытуемого газа по отношению к плотности эталонного.</p>	<p>Используется для определения состава бинарных газовых смесей — чаще при анализе, чем при измерении плотности. Тарирован по данным об измеряемых газах.</p>

Рис. V-90. Газовый плотномер.

ТАБЛИЦА V-16

Приборы для контроля влажности газов

Рисунок	Принцип действия	Применение
---------	------------------	------------

Психрометр



Рис. V-91. Обычный психрометр:

1 — сухой баллон термометра;
2 — влажный материал.

Основан на измерении разности температур сухого и влажного термометров. Оба термометра скреплены вместе. Один измеряет температуру контролируемого газа; другой покрыт внизу материалом, хорошо впитывающим влагу, он измеряет температуру насыщенного влагой газа, причем подвеска вращается с целью создания быстрого воздушного потока для максимального охлаждения при испарении. Относительную влажность и точку росы можно определить по психрометрическим таблицам. Записывающий психрометр основан на этом же принципе, с той только разницей, что термометры двухканального записывающего психрометра омывает воздушный поток со скоростью не менее 4,5 м/сек. Влажный термометр смачивается водой из резервуара.

Наиболее простой и дешевый прибор для измерения относительной влажности воздуха; широко применяется в промышленности.

Неудобство в том, что один из термометров необходимо непрерывно увлажнять.

Гигрометры

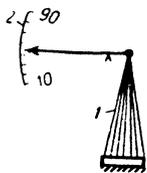


Рис. V-92. Гигрометр, основанный на изменении размеров:

1 — волоски; 2 — шкала.

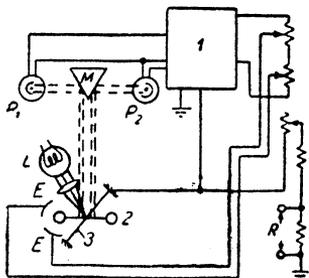
Различные органические материалы меняют, как известно, свои линейные (или объемные) размеры при изменении относительной влажности. Так себя ведут, например, человеческие волосы (из которых получают наиболее точные гигрометры), различные сорта дерева, перепонки животных и т. д. Завиток деревянной стружки укрепляется с помощью проволоочной пружины и изгибается наподобие биметаллического термометра, давая возможность производить непосредственный отсчет показаний.

Преимуществом является непосредственное считывание относительной влажности. Недостатки: медленная реакция; температурные погрешности.

Рисунок

Принцип действия

Применение

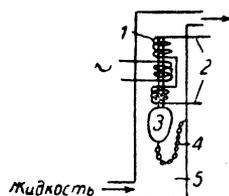


Прибор с нуль-индикатором. Плотность газа измеряется по всплытию (подъемной силе) одного из шаров подвески, выполненной в форме гантели; второй шар не испытывает подъемной силы ввиду наличия в нем отверстия. Поворот покрытой родием гантели, подвешенной на горизонтальной кварцевой нити, вызывает эффект электростатического взаимодействия между электродами и шаром. Уравновешивающий потенциал E выравнивает гантель, вследствие чего на фотоэлементы P_1 и P_2 будет падать одинаковое количество света. Отношение уравновешивающего потенциала к начальному пропорционально отношению удельного веса газа к удельному весу воздуха.

Позволяет вести непрерывное измерение в потоке. Барометрические помехи компенсируются. Тарирование вручную по известному газу обычно по воздуху. Однодиапазонный прибор дает 0,100 единиц; многодиапазонный до 1000 единиц (по отношению к воздуху).

Рис. V-87. Газовый плотномер:

1 — источник питания; 2 — гантель;
3 — кварцевая нить.

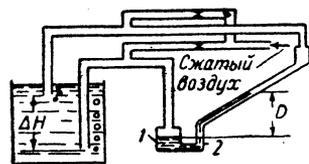


Поплавок, помещенный в сосуд, по которому непрерывно протекает жидкость, удерживается от всплытия половиной веса легкой цепочки, погруженной в жидкость средней плотности; при этом поплавок находится в точке, соответствующей середине диапазона изменения плотности. Цепочка прикреплена к низу поплавка и к стенке сосуда на половине его высоты. Увеличение плотности вызывает подъем поплавка и большей части цепи; уменьшение плотности ведет к тому, что поплавок поддерживает меньшую часть цепи. Положение поплавка передается с помощью индуктивного дифференциального датчика на вторичный записывающий прибор.

Используется для регистрации и для регулирования. Может применяться в жидкостях, вызывающих коррозию, а практически — в любой жидкости. Это, в сущности, — метод взвешивания определенного объема жидкости. При изменении температуры жидкости следует вводить коррекцию.

Рис. V-88. Устройство для измерения и записи плотности с поплавком и цепочкой:

1 — индуктивный дифференциальный датчик; 2 — выход датчика на мост переменного тока; 3 — поплавок;
4 — цепочка; 5 — сосуд.



Воздух при определенном давлении и в определенном количестве барботирует через две трубки, опущенные в жидкость на различную глубину. Разность давлений в них является мерой веса столба жидкости высотой ΔH , равной разности заглубления трубок, а следовательно, мерой удельного веса жидкости. Высота столба индикаторной жидкости D прямо пропорциональна удельному весу жидкости в баке.

Пригоден практически для всех жидкостей, кроме тех, которые кристаллизуются в измерительных трубках. Может быть использован для суспензий, для неподвижных или текущих жидкостей. Вместо воздуха также применяется жидкость.

Рис. V-89. Пьезометрический измеритель удельного веса:

1 — чашечный микроманометр; 2 — индикаторная жидкость.

Приборы для контроля влажности твердых материалов

Рисунок

Принцип действия

Применение

Измерители сопротивления

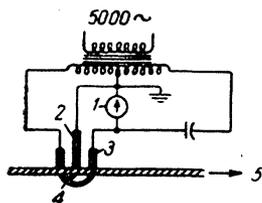
Сопротивление кускового материала измеряется с помощью вилки, зубья которой вонзаются в материал на определенном расстоянии друг от друга. Сопротивление пылевидных материалов определяется с помощью двух пластин, между которыми материал сжимается под определенным давлением. Для измерения используются мостовая схема Уитстона и индикатор.

Применяются для порошков, опилок, табака и других подобных материалов. Тарирование производится по материалам с известным содержанием влаги.

Измерители диэлектрической постоянной

Так как у воды по сравнению с большинством материалов в 15—20 раз более высокая диэлектрическая постоянная, то небольшие изменения влажности существенно влияют на изменение диэлектрической постоянной материала. Исследуемый материал закладывается в испытательный конденсатор, и частота колебаний контура, в котором стоит этот конденсатор, сравнивается с частотой колебаний эталонного кварцованного контура. При подстройке частоты положение движка определяет значение влажности материала.

Используется преимущественно для семян, гранул и порошковых химических продуктов.



В камере над движущимся влажным материалом помещается конденсатор с гигроскопическим диэлектриком между пластинами. Влажность воздуха в камере и диэлектрика выравнивается с влажностью движущегося материала. Таким образом, влажность движущегося материала оценивается по емкости конденсатора с помощью высокочастотной мостовой схемы.

Обычно используется для измерения влажности бумаги в процессе ее изготовления на бумагоделательной машине.

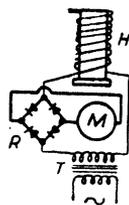
Рис. V-96. Измеритель диэлектрической постоянной движущегося материала:

1 — нуль-индикатор; 2 — экранирующая пластина; 3 — измерительный конденсатор; 4 — край активного поля; 5 — движущийся лист бумаги.

Рисунок

Принцип действия

Применение



Проволока, бифилярно намотанная на легкий каркас — изолятор, покрыта гигроскопической пленкой, содержащей хлористый литий, который увеличивает свою проводимость при увеличении влажности. Влажность окружающей среды определяет проводимость покрытия и, следовательно, ток в измерительном приборе.

Быстродействие и высокая точность — главные преимущества этого метода. Может быть использован переменный ток с выпрямительным мостиком. Сопротивление может замеряться с помощью моста Уитстона. Может быть предусмотрена температурная автокомпенсация.

Рис. V-93. Гигрометр, основанный на принципе изменения электрического сопротивления.

Точка росы

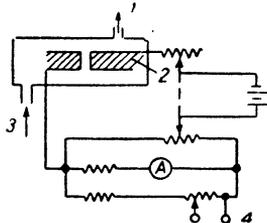


По внешнему виду измеритель похож на изображенный на рис. V-93, но работает на другом принципе. Проволока, бифилярно намотанная на каркасе — изоляторе, покрыта гигроскопическим проводящим составом (раствор хлористого лития). Внутри изолятора расположен баллон термометра. Ток низкого напряжения, проходя по проволоке, нагревает проводящее покрытие таким образом, чтобы наступило равновесие между испарением и поступлением влаги. Температура точки равновесия, измеренная с помощью термометра, соответствует точке росы.

Используется при высоких температурах, но прекрасно работает при температуре исследуемой пробы 100° С и ниже, указывает непосредственно точку росы, весовое количество водяного пара, или влажность в процентах на единицу объема. Не требует ни снабжения водой, ни охлаждения.

Рис. V-94. Электрический измеритель точки росы гигрометрического типа:

1 — термометр; 2 — нагреваемое покрытие LiCl; 3 — баллон термометра.



Водяной пар в потоке газа непрерывно проходит над пленкой частично гидратированной пятиокиси фосфора и абсорбируется ею. В детекторной ячейке происходит электролиз абсорбированной воды между платиновыми электродами. Ток, потребляемый в процессе электролиза, прямо пропорционален (по закону Фарадея) количеству абсорбированной воды. Измеритель А, включенный последовательно с ячейкой, дает показания, прямо пропорциональные количеству воды в потоке газа.

Определяют количество влаги в различных неорганических газах, углеводородных газах и парах, фторированных углеводородах. Основные соединения, такие как аммиак и органические соединения типа метанола, затрудняют анализ.

Рис. V-95. Водяной электролитический анализатор:

1 — выходное отверстие; 2 — гигроскопический материал; 3 — проба газа; 4 — подключение самописца.

Рисунок

Принцип действия

Применение

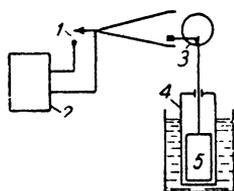


Рис. V-101. Вискозиметр:

1 — контакт, замыкающийся в начале и в конце опускания поршня; 2 — отметчик времени; 3 — двигатель подъема; 4 — цилиндр; 5 — поршень с зазором.

Поршень регулярно подымается вверх с помощью мотора и опускается вниз (в жидкость) под действием силы тяжести. Зазор между цилиндром и поршнем образует измерительное отверстие (сужение). Время опускания поршня регистрируется в качестве меры вязкости жидкости.

Может использоваться для ньютоновских и неньютоновских жидкостей, а также для высокополимерных жидких соединений в промышленных и лабораторных установках.

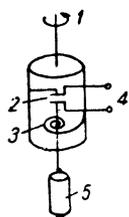


Рис. V-102. Измеритель момента, погруженный в жидкость:

1 — привод; 2 — конденсатор переменной емкости; 3 — калибровочная пружина; 4 — выходной сигнал; 5 — шпindelь.

Синхронный мотор вращает цилиндр, увлекающий вертикальный шпindelь (с диском или лопатками на его оси). Шпindelь погружен в испытуемую жидкость. Вращение цилиндра передается шпindelю с помощью калиброванной пружины. Угловое отставание шпindelя от цилиндра пропорционально вязкости и измеряется различными способами. Регулятор может определять угол отставания с помощью периодически замыкаемых электрических контактов. Записывающие устройства, являющиеся приспособлением к этому прибору, могут измерять угол отставания тремя путями: по изменению емкости или сопротивления, а также с помощью подсчета частоты следования (или периода) импульсов.

Может использоваться в открытых или закрытых сосудах, под давлением или в вакууме, при высоких и низких температурах. Пригоден для ньютоновских жидкостей или взвесей.

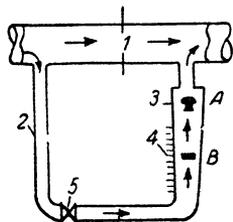


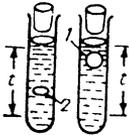
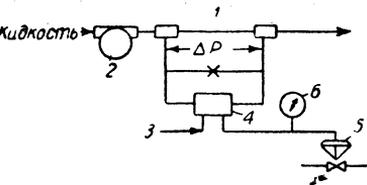
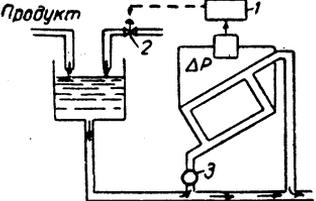
Рис. V-103. Ротаметр для определения вязкости:

1 — диафрагма; 2 — обвод; 3 — индекс скорости потока; 4 — шкала вязкости, 5 — палец или клапан.

Поплавки ротаметра могут быть сконструированы как чувствительными так и нечувствительными к вязкости. При постоянной скорости потока положение чувствительного поплавка может быть прокалибровано по вязкости. Нечувствительный к вязкости поплавок может быть использован для определения скорости потока по специальной отметке.

Используется для визуального и дистанционного измерения и регулирования вязкости ньютоновских и неньютоновских жидкостей и взвесей в непрерывном потоке.

Приборы для измерения и регулирования вязкости

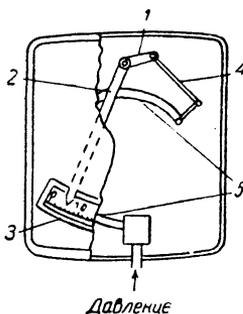
Рисунок	Принцип действия	Применение
 <p>Рис. V-97. Истечение через сопло.</p>	<p>Сосуд с короткой капиллярной трубкой; время истечения жидкости при заданной температуре характеризует ее вязкость.</p>	<p>Обычно используется для определения вязкости масел.</p>
 <p>Рис. V-98. Падение шарика или подъем торондального поплавка: 1 — шарик; 2 — торонд.</p>	<p>Время падения шарика или подъема торонда в жидкости, содержащейся в трубке, пропорционально абсолютной вязкости, так как в обоих случаях вязкая жидкость протекает через сужение определенного размера.</p>	<p>Также применяется для измерения вязкости масел в лаборатории. Метод падающего шарика дает отсчет времени с большой точностью (шарик используется как сердечник, проходящий внутри электрических катушек в начале и конце подъема).</p>
 <p>Рис. V-99. Дроссельная трубка: 1 — дроссельная трубка; 2 — насос, подающий жидкость с постоянной скоростью; 3 — вход управляющего воздуха; 4 — преобразователь разности давлений ΔP; 5 — управляющий клапан; 6 — индикатор.</p>	<p>Жидкость, нагнетаемая насосом, проходит с постоянной скоростью через дроссельную трубку. Падение давления на концах трубки измеряется пневматическим дифманометром, который снабжен устройством, работающим на принципе силовой компенсации и выдающим отсчет в единицах абсолютной вязкости.</p>	<p>Может использоваться для дистанционной регистрации и регулирования многих промышленных жидкостей. Метод исключительно прост. Не требует тщательности наблюдения. Дает непосредственное решение уравнения Пуазейля.</p>
 <p>Рис. V-100. Непрерывный регулирующий консистомер: 1 — записывающий регулятор; 2 — клапан, управляющий разбавлением; 3 — насос.</p>	<p>Шестеренчатый насос отводит часть общего потока в мостовую схему, где давления измеряются в двух эталонных точках. Разность давлений является мерой консистенции материала.</p>	<p>Измеряется, регистрируется и регулируется консистенция волокнистых или шламовых взвесей.</p>

приборов служат усилие или механическое перемещение, пневматическое и гидравлическое давление, температура, влажность и пр., если эти переменные механическими средствами воздействуют непосредственно на показывающий прибор.

Методы измерения, реализуемые в приборах

Индикаторные и регистрирующие приборы могут быть: 1) непосредственной оценки (не требующие энергии от внешнего источника или с вспомогательными источниками энергии), 2) нуль-индикаторными (с ручной компенсацией или с сервоприводом).

Приборы непосредственной оценки в процессе измерения находятся под непрерывным воздействием измерительного сигнала; так, в манометре с пружинной Бурдона



Давление

Рис. V-104. Пружинный манометр:

1 — рычаг; 2 — указатель; 3 — шкала; 4 — тяга Бурдона.

измеряемое давление внутри сплюсненной С-образной трубки отклоняет ее свободный конец, движение кинематически передается к указателю (рис. V-104). Если измеряемый сигнал ограничен по мощности, можно использовать дополнительную мощность от постороннего источника. Типичным примером является усилитель, обычно применяемый в осциллографах для усиления низковольтных измеряемых сигналов до уровня, способного отклонить луч (электронный пучок).

В общем, приборы непосредственной оценки просты,

прочны и дешевы как при изготовлении, так и в ремонте. Мощность, потребная для отклонения показывающей стрелки, невелика и позволяет использовать приборы без дополнительных источников энергии. Многие механические самописцы такого типа работают без добавочных источников энергии, используя энергию измеряемых величин, — таких, как абсолютное или разностное давление; сюда же можно отнести самописцы, работающие с пневматическими дистанционными передачами. Электрические автономные самописцы применяются для измерения электрических сигналов среднего или высокого уровня (по мощности). Уровень мощности, который способны дать термомпары, термометры сопротивления, тензометры и многие виды аналитических приборов, обычно недостаточен для удовлетворительного управления самописцами без дополнительных источников энергии. В этом случае обычно используют или дополнительное усиление или нуль-индикаторные приборы.

Усилители приборов непосредственной оценки обычно охвачены обратной связью; коэффициент обратной связи выбирается большим для обеспечения точного соответствия (пропорциональности) между входными и выходными сигналами.

Нуль-индикаторные приборы сравнивают измерительный сигнал с сигналом обратной связи, который вырабатывается прибором и определяется по величине положению указателя. При измерении указатель перемещается, изменяя величину сигнала обратной связи так, чтобы он стал равным измерительному сигналу. В нуль-индикаторных приборах, управляемых вручную, отклонение от нуля (разница между измеряемым сигналом

и сигналом обратной связи) представляется в форме, удобной для оператора, который затем манипулирует устройством компенсации, чтобы получить нуль-баланс; при сигнале обратной связи, равном измеряемому сигналу, положение указателя на шкале дает величину измеряемого сигнала. В следящем устройстве нуль-детектор вызывает перемещение указателя с помощью усилителя и сервомотора, причем одновременно с этим перемещением изменяется величина сигнала обратной связи. Это обеспечивает непрерывную компенсацию измеряемого сигнала с целью получения нулевого баланса и благодаря этому непрерывную индикацию величины измеряемого сигнала (рис. V-105).

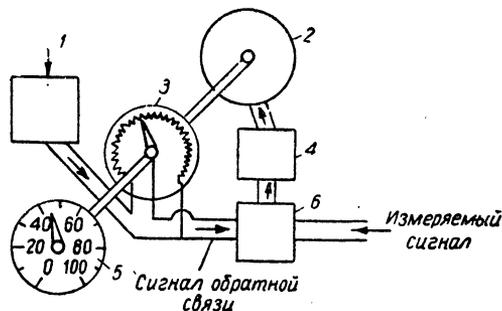


Рис. V-105. Типичный самоуравновешивающий прибор:

1 — источник постоянного тока; 2 — сервомотор; 3 — потенциометр; 4 — сервоусилитель; 5 — шкала; 6 — детектор.

Там, где требуется самая высокая точность, отдается предпочтение нуль-балансным индикаторам и самописцам. Типичными лабораторными приборами высокой точности являются различные мосты. Следящая система применяется в тех случаях, когда требуется непрерывная индикация, а также при недостаточной мощности измеряемого сигнала или при значительной величине мощности, потребной для работы записывающего или индицирующего механизма. Многие самописцы, ведущие запись на ленточную диаграмму в прямоугольной системе координат, снабжены следящей системой; самописцы с широкой диаграммной лентой (обычно употребляемый размер около 270 мм) почти всегда имеют такую систему. Мощность от внешнего источника энергии используется для питания не только следящей системы, но и дополнительных устройств и сигналов и для выполнения других функций в дополнение к индикации и записи.

Эксплуатационные свойства приборов

Быстродействие. Быстродействие современных приборов вполне достаточно для применения их в химических процессах. Быстродействие механических приборов ограничивается в основном измерительным элементом. Быстродействие нуль-балансных приборов зависит от характеристик сервомеханизмов. Время полного перемещения пера диаграммного самописца по стандарту составляет от 2 до 3 сек, иногда по специальному требованию его доводят до 1/4 сек. Для больших скоростей применяются специальные высокоскоростные приборы непосредственной оценки, а также осциллографы и осциллоскопы. Существуют также преобразователи, которые преобразуют практически почти все механиче-

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Способы передачи информации

Индикация и регистрация (запись) служат для передачи информации человеку. Форма представления информации является важным фактором и должна быть серьезно рассмотрена при проектировании специальных приборов. Хотя факторы, учитываемые при выборе, могут казаться решающими, они не должны заслонять основное требование — адекватность показаний.

Индикация и регистрация могут производиться и в аналоговой и в дискретной (цифровой) форме. Аналоговая индикация характеризуется непрерывно меняющейся величиной. Перемещение стрелки по шкале, чернильная линия записи на графике или фотографическая запись кривой с осциллографа — все это аналоговая форма. Дискретная индикация является цифровой по форме. Цифровой счетчик, набранная или напечатанная таблица или запись в цифровом коде на бумаге или магнитной ленте являются дискретной формой показаний.

Аналоговой индикации отдается серьезное предпочтение в химической технологии и подобных производствах. Механизмы для аналоговой индикации почти всегда проще, дешевле, имеют больший срок службы и во многих случаях предпочтительнее, чем цифровые индикаторные устройства. Особенно важно то, что положение указывающей стрелки обеспечивает наглядную и точную индикацию значения любой переменной величины. Цифры труднее прочесть быстро и точно. Записи в аналоговой форме дают непрерывную графическую картину изменений процесса как по величине, так и по направлению. Такая непрерывность имеет большое значение, выявление тенденции очень существенно в процессе управления; и анализировать график (диаграмму) визуальное много легче, чем колонку цифр.

Цифровая индикация имеет очевидные достоинства там, где необходима регулярная оценка цифровых показаний через определенные интервалы времени, независимо от того, записывает ли оператор в таблицу данные измерений параметров процесса, или они печатаются измерительным прибором. Путем использования соответствующего количества разрядов чисел основная погрешность считывания может быть снижена до любого желаемого уровня. Полученные средние значения могут характеризовать результаты считывания миллионов цифр, но это не означает, что измеренная величина получена с заданной точностью. Для расчетов и вычислений часто требуется иметь данные в цифровой форме.

Цифровая индикация имеет ограниченное применение в химической промышленности, она используется для суммирования и усреднения. Некоторое применение находят цифровые индикаторы там, где наблюдается ряд переменных с помощью одного вручную переключающегося прибора (в каждый данный момент времени регистрируется только одна из переменных). Многие электрические лабораторные приборы мостового типа и подобные им измерительные приспособления используют декаду (цифрового типа) переменных сопротивлений.

В настоящее время существуют электронные цифровые индикаторы (быстродействующие электронные счетчики, цифровые вольтметры и индикаторы, которые являлись вместе с цифровыми вычислительными маши-

нами); эти индикаторы — обычно дорогие и сложные приборы.

Цифровая регистрация переменных химико-технологических процессов является особой процедурой. Регистрация значения переменной печатанием обычно осуществляется при взвешивании, а также и в других случаях в химической технологии. Запись показаний приборов в виде большого количества цифровых величин часто применяется для управления заводами и реже — в технологических процессах. Данные печатаются через определенные интервалы времени или же по специальной команде; можно сделать прибор, который будет печатать данные, когда их значения превзойдут допустимую величину. Автоматические самописцы могут пробовать перфокарты одновременно с печатанием. Такой прибор, автоматически записывающий параметры процесса, объединяют с автоматической развертывающей системой и системой сигнализации. Стоимость передачи, программирования, сканирования и печатания значительна и мало зависит от числа регулируемых переменных; стоимость одной записанной переменной значительно выше, если не записывается большое количество переменных. Показания могут выдаваться в виде ленты (как в суммирующей машине) или в виде листа с напечатанными результатами измерений параметров процесса. Виды записи, так же как и детали записывающих механизмов, проектируют применительно к специфическим условиям их использования.

Физическая природа измерительных сигналов

Показывающие и записывающие приборы индицируют измеряемую величину регулируемой переменной, например, температуры. Регулируемая переменная может непосредственно воздействовать на прибор; в других случаях могут быть использованы датчики для преобразования регулируемой переменной в сигналы какой-либо другой физической природы, например, преобразование термопарой температуры в э. д. с. Сигнал датчика преобразуется в стандартный пневматический или электрический измерительный сигнал, который используется почти во всех приборах промышленных систем регулирования. Пневматические или электрические измерительные сигналы обеспечивают передачу информации центру управления. Стандартный измерительный сигнал облегчает взаимозаменяемость показывающих, записывающих и регулирующих приборов.

Измерительный сигнал — это сигнал, поступающий непосредственно в показывающий или регистрирующий прибор, он может не быть тождественным регулируемой переменной. Указатель индикатора или регистратора движется вдоль шкалы соответственно величине измерительного сигнала. Пределы шкалы представляют собой алгебраическую разность между максимумом и минимумом значения индицируемой или регистрируемой переменной.

Индикаторы и регистраторы, которые реагируют на электрический измерительный сигнал, классифицируются как электрические, вне зависимости от того, какова физическая природа регулируемой переменной. Таким образом, автоматический самопишущий потенциометр, который измеряет э. д. с. термопары в милливольтах, а записывает единицы температуры, классифицируется как электрический. Незаэлектрические индикаторы и регистраторы классифицируются как механические приборы. Измерительными сигналами для механических

это, конечно, без учета ошибки считывания и ошибки, которая вносится термопарой.

Параллакс. В индикаторных приборах стрелка всегда находится на некотором расстоянии от шкалы. Если при считывании показаний с прибора линия «глаз оператора — стрелка прибора» не перпендикулярна к плоскости шкалы, то в результате такого считывания появится ошибка «параллакса». Там, где очень важна точность считывания, эта ошибка параллакса должна быть исключена за счет конструкции шкалы прибора и его расположения, а также тренировки оператора.

ИНДИКАТОРНЫЕ ПРИБОРЫ

Индикаторные приборы могут быть 1) с подвижной стрелкой: а) с круглой шкалой (стрелка движется внутри угла больше 180° , обычно около 270°); б) с сек-

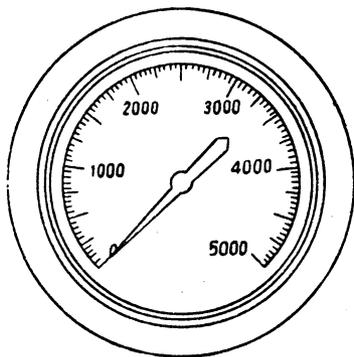


Рис. V-107. Манометр.

ную непосредственно с первичным элементом, но чаще связь между ним и стрелкой обеспечивается некоторым дополнительным звеном (тягой, рычагом и пр.). Эта конструкция относится к простейшим; она обеспечивает возможность настройки нуля и диапазона шкалы; два указателя (и больше) легко устанавливаются в одном приборе.

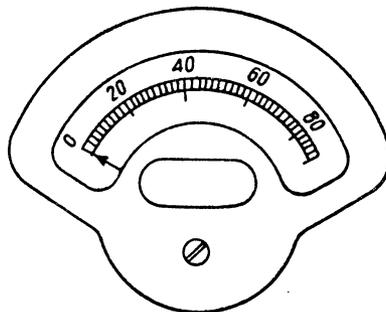


Рис. V-108. Вольтметр.

Существует несколько видов индикаторов с подвижной стрелкой и секторной шкалой. Наиболее распространен индикатор, в котором стрелка движется в плоскости шкалы. Таков стандартный (типа д'Арсонваля) вольтметр постоянного тока (рис. V-108). Этот прибор занимает много места на монтажном щите. Широко применяется также прибор с профильной шкалой. Здесь стрелка вращается вокруг оси, совпадающей с осью цилиндрической шкалы. Стрелка может двигаться вверх — вниз (вертикальная профильная шкала) или в горизонтальной плоскости (горизонтальная профильная шкала). Если стрелка имеет большую длину (по сравнению с длиной шкалы), то перемещение стрелки происходит почти прямолинейно. Такие индикаторы компактны, так как наличие длинной стрелки не сказывается на площади, которую прибор занимает на мон-

торной шкалой (стрелка движется внутри угла, меньше 180° , обычно меньше 90°); 2) с вращающейся шкалой и 3) бесстрелочные приборы с «движущимся телом» (жидкостью, поплавком и т. п.).

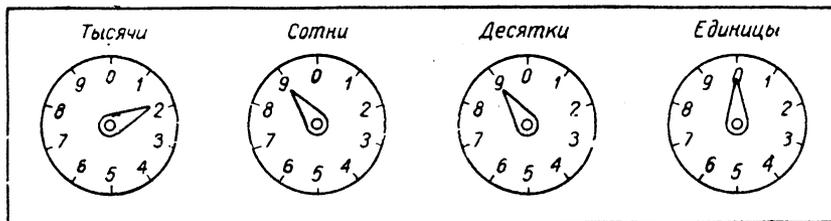


Рис. V-109. Многострелочный индикатор.

Индикаторы с подвижной стрелкой распространены гораздо больше других. У стандартного манометра (рис. V-107) шкала круглая. Угол поворота стрелки обычно составляет от 240 до 330° . Такие приборы компактны, и шкала их довольно длинная, хотя они занимают небольшую поверхность. Индикаторы с круглой шкалой применяются как в электрических, так и в механических устройствах.

Существует много типов индикаторов с подвижной стрелкой и с секторной шкалой. Наиболее широко распространены индикаторы с углом поворота стрелки от 10 до 100° . В электрических индикаторах стрелка обычно соединена непосредственно с измерительной рамкой. Градуировка шкалы производится электрически. Механические индикаторы могут иметь стрелку, соединен-

ную непосредственно с первичным элементом, но чаще связь между ним и стрелкой обеспечивается некоторым дополнительным звеном (тягой, рычагом и пр.). Эта конструкция относится к простейшим; она обеспечивает возможность настройки нуля и диапазона шкалы; два указателя (и больше) легко устанавливаются в одном приборе.

Прямолинейное движение стрелки относительно редко встречается среди простых индикаторных приборов; оно применяется чаще всего в прямоугольнокоординатных самописцах.

Многострелочные индикаторы. Счетчики ватт-часов и простейшие суммирующие устройства часто снабжаются несколькими шкалами — для единиц, десятков, сотен и т. д. (рис. V-109). Такая конструкция проста и недорога; она очень мало нагружает ведущий механизм

ские параметры в электрические сигналы, когда требуется максимально высокое быстродействие.

Точность и четкость шкалы (читаемость). Определения американских стандартов для электрических терминиров гласят: «Точность прибора — число или количество, определяющее пределы его ошибки... Ошибка есть разность между показанием прибора и истинным значением измеряемого количества». В определении точности обычно предполагают, что ошибка в считывании показаний и ошибка в «истинном» значении величины настолько малы, что ими можно пренебречь.

Условия, при которых измеряется ошибка, очень существенны.

Существуют американские стандарты для приборов. Ассоциация фирм-изготовителей приборов для научных исследований устанавливает оценку точности при различных условиях. Для выбранных приборов важно установить условия, при которых определяется точность, так как различные фирмы используют похожие термины с достаточно разными оттенками значений, создавая тем самым некоторый беспорядок при сравнении характеристик и тарифовочных данных.

Повторяемость, или, как иногда ее называют, правильность измерений¹, близка понятию точности. Во многих случаях главными задачами являются точное соблюдение рабочих условий, наблюдение за информацией при известных тенденциях ее изменения или сравнение результатов при заранее заданных изменениях рабочих условий. Для этих целей повторяемость является более решающим критерием, чем абсолютная точность. Так как повторяемость может быть на порядок выше абсолютной точности, важно разграничивать эти требования при выборе приборов.

Следует выбирать приборы с достаточной точностью и повторяемостью. Не менее важно определить пределы практически требуемой точности. Включение в перечень аппаратуры приборов с более высокой точностью, чем это реально необходимо, может значительно увеличить первоначальную стоимость, а также привести к выбору сложной аппаратуры, обладающей пониженной надежностью и более трудоемкой в обслуживании. Это особенно невыгодно, если точность заказываемых приборов выше принятой стандартом заводов-изготовителей, которые должны, таким образом, заняться специальным проектированием, изготовлением и тарированием приборов.

Так как назначение индикации и записи состоит в передаче информации человеку-оператору, читаемость шкалы должна быть существенным признаком при оценке прибора. Как уже сказано, точность прибора обычно характеризуется без упоминания о читаемости шкалы; показания, прочтенные по шкале, включают в себя и погрешность прибора, и ошибку оператора при считывании со шкалы.

Требования к читаемости зависят от условий эксплуатации. Широкая стрелка, рельефные деления на шкале, а также расположение шкалы на уровне глаз или выше этого уровня облегчает считывание со шкалы на расстоянии. С другой стороны, чтобы получить максимальную точность при считывании, хорошо иметь ножевидную стрелку, много мелких делений на шкале с тонкими рисками и расположить шкалу ниже уровня глаз. Большой прибор с длинной шкалой, если рассматривается только его шкала, облегчает считывание. Наоборот, если количество наблюдаемых переменных

велико, компактные приборы, которые могут быть размещены близко друг к другу, несут максимальное количество информации при минимальной общей площади, занимаемой ими, а также значительно облегчают наблюдение за состоянием всей системы.

В случае, когда требуется максимальная точность считывания, прибор должен быть удобно расположен, а шкала его — равномерно освещена. В этом случае положение ножевидной стрелки или линии, вычерчиваемой пером, может определяться с погрешностью до 0,8 мм; при необходимости можно определять их в таких условиях с погрешностью до 0,25 мм. На

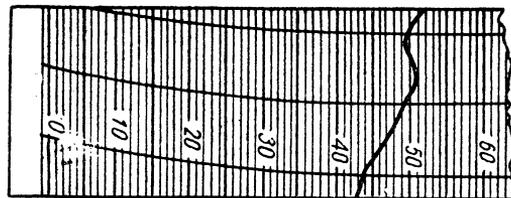


Рис. V-106. Запись на диаграмме со шкалой.

рис. V-106 показан участок шкалы стандартного записывающего устройства. На ленте нанесены штрихи через каждый миллиметр. Положение линии записи оценивается с погрешностью до четверти деления. Следовательно, при длине шкалы в 100 мм погрешность составляет 0,25%. Этого вполне достаточно для большинства измерений в химических процессах, тем более что основная погрешность измерения редко бывает меньше 0,5%.

Приборы с растянутой шкалой. Читаемость показаний может быть улучшена путем использования прибора с растянутой шкалой (со шкалой без нуля). Прибор для измерения температуры может давать показания от 0 до 1000°С с ценой деления от 2 до 3° на 100-миллиметровой шкале. Если область рабочих температур лежит между 600 и 800°, можно снабдить прибор шкалой от 600 до 800° с ценой деления 1/2 градуса. Растянутая шкала улучшает читаемость, но точность прибора может увеличиваться, а может оставаться без изменений. При таких измерениях, как измерение давления, всегда можно проверить правильность показаний прибора на нулевой точке шкалы (отключив прибор). Прибор с растянутой шкалой может быть проверен таким способом, если на шкале имеется ноль. В механических приборах, где укрупнение делений может быть достигнуто только за счет увеличения передаточных чисел механических связей, растянутая шкала не увеличивает абсолютную точность, а наоборот, может даже ее уменьшить, если возросшая из-за увеличения передаточных чисел нагрузка будет искажать характеристику первичного элемента. С другой стороны, многие приборы, воспринимающие измерительный сигнал от датчика, характеризуются погрешностью (в процентах от разности пределов шкалы), которая не зависит от величины измеряемого сигнала. Например, самоуравновешивающийся потенциометр-самописец, измеряющий температуру с помощью чувствительного элемента — терморпары, должен иметь ту же ошибку в 0,5% как в пределах 0 ÷ 550°С (около 30 мВ), так и в пределах 300 ÷ 400°С (примерно 7 мВ). Для диапазона температур от 0 до 500°С ошибка прибора может достигать 2,5°С, в то время как для диапазона 0 ÷ 100°С максимальная ошибка составляет 0,5°С. Все

¹ В СССР принято понятие «вариация показаний», характеризующее наибольшую разность показаний при измерениях одной и той же величины в строго одинаковых условиях. — Прим. ред.

механические и электрические самописцы, измеряющие переменную по методу непосредственной оценки или имеющие сервопривод¹, могут осуществлять многочисленные функции, включая управление процессом и дистанционную передачу его параметров.

Круговая диафрагма имеет ряд преимуществ. Запись на ней чрезвычайно удобна для большей части процессов. Стомиллиметровое поле записи, скорость движения диаграммы (в средней части поля записи) 15—18 мм/ч и возможность пользоваться одним бланком в течение суток делают круговую диаграмму применимой для ряда процессов. После снятия с самописца она

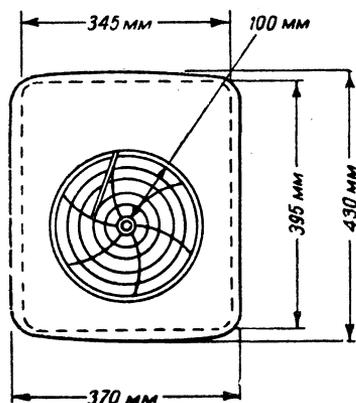


Рис. V-111. Типичная круговая диаграмма самописца.

остается плоской и не имеет тенденции к деформации. Круговые диаграммы снимаются с самописца много проще, чем ленточные. Точность записи на диаграмме превосходна (см. ниже). Крепление диаграммы и механизм привода очень просты, надежны и экономичны.

Механические и электрические приводы стандартны и взаимозаменяемы в большинстве приборов. Приборы с механическими часовыми приводами не требуют мощных источников энергии и применяются в случаях, когда переменный ток постоянной частоты недоступен или же прибор размещен во взрывоопасных помещениях. Самописцы с круговой диаграммой изготавливаются для осуществления непрерывной одно-, дву-, трех- или четырехточечной записи; выпускаются также приборы с шеститочечной дискретной записью. Самописцы с круговой диаграммой выпускаются многими фирмами, как в обычном, так и в брызго- и влагозащищенном исполнении для работы на открытом воздухе.

На применение самописцев с круговой диаграммой накладываются некоторые ограничения. Первое ограничение вызывают габариты самого самописца; это может быть существенно в управляющем центре, где должны регистрироваться многие переменные. Удобство считывания обеспечивается при размещении стандартных самописцев на панели не более чем в три ряда, предпочтительнее — в два ряда. Самописцы различных заводов-изготовителей отличаются друг от друга по ширине; горизонтальный размер обычно составляет 380 мм, но доходит до 400—430 мм для некоторых самописцев (рис. V-111). Увеличение поверхности панели невыгодно (возрастает стоимость), а поле об-

зора при этом увеличивается, что значительно ухудшает для оператора условия наблюдения за процессом.

Смена диаграмм, вращающихся со скоростью один оборот в сутки, должна происходить приблизительно в одно и то же время каждый день, и это создает трудности в некоторых случаях. Если диаграммы собираются ежедневно для наблюдения и обсчета, это не представляет трудностей. Однако если самописцы находятся в удаленных и труднодоступных местах, ежедневная смена диаграмм вырастает в проблему. Если измеряемая переменная изменяется медленно, целесообразно использовать 7- и даже 30-дневные диаграммы. В последнее время разработаны автоматические устройства для смены диаграмм, применяющиеся при использовании стандартных самописцев с круговой диаграммой. Они снабжаются месячным запасом диаграмм и программой — автоматически через 24-часовые интервалы менять диаграммы.

В самописцах, используемых с аналитическими целями, для записи экспериментальных данных и других величин обычно предпочитают употреблять прямоугольную ленточную диаграмму. В круговых диаграммах ось времени и ось регистрируемой переменной представляют собой обычно дуги. В некоторых случаях то обстоятельство, что длина одной и той же единицы времени на витке, близком к центру, и на витке, близком к краю круговой диаграммы, различны, может вызывать неудобства. Кроме того, при записи специфических данных с переменной продолжительностью жестко фиксированное время одного оборота круговой диаграммы часто не является оптимальным. Необходимо отметить, что для многих непрерывных технологических процессов вычислительная техника и аппаратура создавались с учетом применения круговых диаграмм. Типичным примером является газовый счетчик, который производит непрерывное интегрирование корня квадратного из произведения статического и дифференциального газового давления, записанных на стандартных круговых диаграммах.

Самописцы с ленточной диаграммой. Самописцы с ленточной диаграммой имеют самое различное оформление. Наиболее часто для промышленных технологических целей применяются самописцы с ленточной диаграммой шириной 305 мм и «миниатюрные» технологические самописцы, хотя для отдельных частных случаев используются другие разнообразные приборы.

Самописец с ленточной диаграммой шириной 305 мм имеет длину шкалы около 280 мм, снабжен электрическим сервоприводом, имеет прямоугольные координаты и дает непрерывную запись показаний из одного или двух мест измерения; такие самописцы изготавливаются также с устройством для многоточечной дискретной записи. Этот тип самописца был разработан для измерения температуры с помощью термопары; он широко применяется для записи электрических измерительных сигналов преобразователей неэлектрических переменных, но непригоден для непосредственного ввода механических или пневматических измерительных сигналов. Прибор точен и надежен; он универсален и может осуществлять дополнительные функции, например, управление процессом, сигнализацию при авариях и дистанционную передачу данных. Скорости диаграммы самописцев изменяются от нескольких десятков миллиметров в сутки до метров в минуту. Скорость пера характеризуется временем пробега шкалы, которое составляет обычно 1 или 2 сек, а иногда $\frac{1}{4}$ сек. Самописцы изготавливаются также с приводом диаграммы от переменной величины, что обеспечивает запись функций двух переменных; это иногда предпочтительнее, чем

¹ К последним относятся автоматические уравновешенные мосты (реализующие нулевой метод измерения) и потенциометры (с компенсационной схемой измерения). — *Прим. ред.*

(в отличие от цифрового счетчика, который создает значительную нагрузку при переходе, скажем, от 199,999 к 200,000). Опытный оператор легко и безошибочно читает многострелочную индикацию, но новичок обычно делает ошибки. Например, на рис. V-109 надо читать 1890, а не 2990, как может показаться на первый взгляд.

Кроме простых механических стрелок, существует ряд других конструкций указателей. Например, существуют приборы с движущимся световым лучом — гальванометр со световым пятном и осциллограф. В других

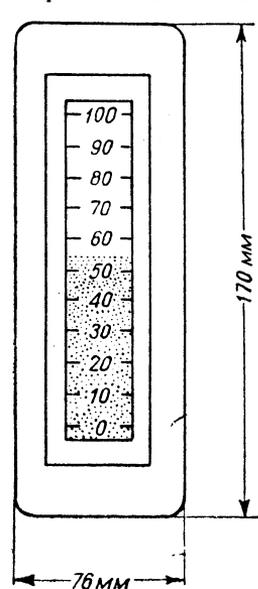


Рис. V-110. Двухцветная лента-индикатор.

приборах граница между различно окрашенными участками вертикально движущейся двухцветной ленты выполняет роль указателя (рис. V-110). Такая конструкция обычно используется для индикации уровня. Часть ленты более темного цвета показывает количество жидкости в сосуде, светлая часть ленты, которая расположена над темной, указывает, какую часть пространства занимают пары (или газ), что позволяет получать наглядную индикацию уровня.

Индикаторы с вращающейся шкалой. В таких приборах шкала перемещается, а указатель неподвижен (фиксирован). Так устроен, например, циферблат с нанесенными на нем делениями. Считывание производится всегда в одном и том же месте — около неподвижного указателя. Ошибки из-за параллакса минимальны. Такой индикатор полезен, в частности, когда сигналы датчиков нескольких переменных подсоединяются поочередно с помощью переключателей к одному индикатору, показания с которого снимаются через определенные промежутки времени. Шкала может представлять собой вращающийся барабан, ось которого лежит в плоскости, параллельной лицевой части прибора; это позволяет пользоваться длинной шкалой, хотя прибор при монтаже потребует очень мало места. Еще большей длины шкалу можно получить, если использовать перематывающуюся ленту вместо вращающегося барабана. Индикаторы с оптическими указателями часто снабжаются движущейся шкалой. Оптические проекционные системы могут проецировать по частям очень длинную шкалу, занимая при этом на пульте небольшую площадь.

Если не считать оптических систем, механизмы с вращающейся шкалой обычно имеют большие вес и габариты, чем с подвижной стрелкой; кроме того, у них больше потребляемая мощность. Часто они приводятся в движение сервоприводом. Приближенное значение измеряемой переменной легче оценить по шкале с подвижной стрелкой, чем по индикатору с вращающейся шкалой.

Индикаторы с «движущимся телом». Смотровое стекло для измерения уровня жидкости, манометр со стеклянной трубкой для измерения абсолютного давления или разности давлений, расходомер с переменной площадью проходного сечения (ротаметр с поплавком внутри стеклянной трубки) и стеклянный ртутный тер-

мометр — все это разновидности приборов, в которых индикация осуществляется по положению «движущегося тела». Как все приборы непосредственного отчета, они очень просты, надежны, экономичны. В определенных условиях эти приборы вполне удовлетворительны.

Недостатки приборов с непосредственным отсчетом очевидны. Принцип прямого отсчета требует контактирования прибора с веществами, которые используются в технологическом процессе. Смотровое стекло должно омываться измеряемой жидкостью, стеклянный термометр должен быть непосредственно погружен в какой-либо из резервуаров (или реакторов) или помещен в трубопроводе линии рабочего потока; ротаметр должен быть также расположен в линии потока. Поэтому наиболее широкое применение такие приборы нашли в области низких и умеренных давлений и температур и при обслуживании емкостей с взрывобезопасными жидкостями. Для более тяжелых условий применяют специальные устройства, однако при этом теряется основное преимущество — простота. Жидкостные стеклянные манометры обычно имеют небольшую длину шкалы (до 1300 мм), что обеспечивает максимальный диапазон измерений до 1750 см вод. ст. Индикаторы с «движущимся телом» и непосредственным отсчетом нельзя применять там, где требуется регистрация показаний.

ЗАПИСЫВАЮЩИЕ ПРИБОРЫ

Записи измерительных приборов-самописцев используются во многих случаях. Для обоснования выбора прибора полезно перечислить некоторые из таких случаев. Технолог-оператор наблюдает за регистрируемые величинами и их отклонениями для воздействия на ход процесса и для управления им. Контролер наблюдает за качеством процесса и любыми возможными ненормальностями. Механик, отвечающий за состояние приборов, просматривает запись, желая, главным образом, убедиться, правильно ли работает аппаратура. Обслуживающий технический персонал использует записи для анализа работы системы. Суммарный расход и другие подпадающие обсчету величины вычисляются по записи. Эти и многие другие возможности обеспечиваются самописцами.

Самописцы могут быть классифицированы по виду используемой диаграммы: с круговой диаграммой и с ленточной диаграммой. Их можно разделить на группы по способу осуществления записи: одно- или многоточечная непрерывная запись, производимая пером и жидкими чернилами; многоточечная дискретная запись, осуществляемая острым или печатающим роликом с помощью полужидких чернил или специальные способы записи.

Самописцы с круговой диаграммой. Самописцы с круговой диаграммой используются в различных производствах. Для технологических записей обычно выбирается круговая диаграмма с радиусом (или полем записи шкалы) около 100 мм (рис. V-111); меньшие круговые диаграммы применяются для специальных целей. Большая часть круговых диаграмм рассчитана на один оборот за 24 ч, но бывают и другие скорости — от одного оборота в минуту до одного оборота в месяц. Единицы шкалы и масштабы времени очень разнообразны. Часто изготавливаются специальные диаграммы. Для приборов, выпускаемых разными фирмами, диаграммы не взаимозаменяемы.

Самописцы с круговой диаграммой пригодны практически для любого вида технологического процесса;

на широкой ленточной диаграмме. При использовании самописцев применяют согласующие усилители, что дает возможность записывать слабые сигналы. Скорости диаграммы таких самописцев доходят до десятков сантиметров в секунду.

Механизмы записи. Наиболее распространенная запись — пером и чернилами на диаграммной бумаге. Она проста, надежна и экономична. Чернила, перо и бумага подбираются изготовителем так, чтобы линия записи была непрерывной и четкой при различных температурах и влажности окружающей среды. При записи перо должно минимально нагружать приводной механизм.

Запись производится непрерывно, причем сигналы поступают из одного или нескольких мест измерения. Если две или более переменных записываются на одном и том же участке диаграммы, они опознаются по цвету чернил. При такой системе линии записи могут расплываться в местах их пересечения. Поэтому линии записи не должны располагаться близко друг к другу и часто пересекаться.

Записывающие перья делятся на перья с пишущей частью, неотделимой от источника чернил и движущейся вместе с ним, и капиллярные перья с трубкой-капилляром, соединяющим пишущую часть пера с источником чернил, расположенным неподвижно в определенном месте прибора.

Многоточечная дискретная запись используется для поочередной записи ряда переменных. Точка определенного цвета или точка и рядом с ней опознавательный номер печатаются на диаграмме для каждой измеряемой переменной через определенные промежутки времени. Печатающий механизм состоит из мягкой чернильной ленты, пропитанной полужидкими чернилами на масляной основе (подобными штемпельной краске); лента подводится к печатающему острию или колеснику. После этого острие (или печатающее колесико) прижимается к диаграмме в месте, соответствующем величине измеряемого сигнала (так как оно перемещается вместе с указателем измерительной системы). Механизм обеспечивает соответствие цветов точек или номеров печатающего колесика (или и то и другое вместе) определенному измерительному сигналу, так что на одном и том же участке ленты получается несколько легко идентифицируемых записей.

Определив стоимость одной записанной точки, можно утверждать, что при не очень большом числе переменных наиболее экономична запись данных на многоточечном самописце. Самописцы особенно незаменимы для многоточечных температурных измерений при использовании в качестве датчиков терморпар или термометров сопротивления. В самописцах многих типов имеются устройства сигнализации. Механизм записи выполняет сложные операции синхронизированного переключения и печатания, он очень тщательно разработан, достаточно прочен и надежен, не требует больших эксплуатационных расходов.

Диаграммы самописцев. Все диаграммы для самописцев печатаются на бумаге, специально изготовленной с необходимыми для записи свойствами. Обычно бумага гигроскопична и ее размеры изменяются в зависимости от влажности, но довольно плотная бумага, применяемая для круговых диаграмм, изменяется в размерах менее чем на 0,1% при увеличении или уменьшении относительной влажности на 10%. Тонкая бумага, используемая для ленточных диаграмм, имеет большой коэффициент деформации.

При установке круговых диаграмм в самописец используется пробитое в их центре отверстие. Это отвер-

стие должно иметь допуск не свыше 0,05 мм на диаметр и такой же допуск на concentричность по отношению к напечатанному на диаграмме окружностям. Втулка диаграммы также должна быть сделана строго по размеру и точно установлена. Если требуется сохранение точности при изменении влажности, применяют специальные круговые диаграммы, изготовляемые некоторыми заводами из листов бумаги с негигроскопичным пластмассовым основанием.

Ленточные диаграммы устанавливаются и приводятся в движение с помощью отверстий, пробитых по краям ленты; в них входят штифты вращающегося барабана, перемещающего диаграмму (отверстия на одном из краев ленты имеют овальную форму, что обеспечивает возможность некоторого изменения размеров ленты). Необходимость соблюдения жестких допусков на размеры отверстий и их расположение относительно напечатанных на диаграмме линий, а также на размещение штифтов барабана усложняют задачи обслуживания и ремонта самописцев с ленточной диаграммой.

Многоточечные записи — и непрерывные, и дискретные — позволяют уменьшить расходы на аппаратуру и сэкономить на площади панели пульта. Для таких измерений, как измерение влажности с использованием мокрого и сухого термометров и измерение расхода газа с помощью измерителей статического давления и его перепада, желательно иметь записи на одной диаграмме.

Диаграммы с перекрывающейся записью. Запись двух или более переменных на одном и том же участке диаграммы производится очень часто при регистрации параметров процесса. Это удобно при записи показаний мокрого и сухого термометров гигрометра, где результаты обоих измерений читаются по одной и той же температурной шкале, и температура мокрого баллона термометра всегда меньше температуры сухого баллона. В расходомерах статическое давление и перепад давлений обычно требуют разных шкал.

Возможны три варианта:

1. Используются деления от 0 до 100 с постоянным множителем для получения действительных величин.

2. Одни и те же деления диаграммы могут быть использованы и для статического давления и для перепада давлений, если их оцифровка напечатана на всех линиях времени поочередно (допустим, на линии «0 часов» оцифрована шкала статического давления, а на линии «6 часов» — перепада).

3. Там, где требуются разные шкалы для различных переменных (например, шкала расхода пропорциональна квадратному корню из статического давления и перепада давлений), чередующиеся временные зоны на диаграмме могут быть отпечатаны с различными делениями и оцифровкой (допустим, от 0 до 6 часов — шкала статического давления, а от 6 до 12 часов — шкала перепада давлений).

В самописцах с перекрывающейся записью ширина диаграммы подбирается по длине шкалы одной переменной (той, у которой длина шкалы больше). Это обеспечивает максимальное использование ширины диаграммы. При непрерывной записи для того, чтобы перья не сталкивались, необходима небольшая разница во времени между записями. Нежелательно делать записи, линии которых проходят слишком близко друг к другу.

Параллельная запись. Кривые записи могут располагаться рядом на диаграмме, не перекрывая друг друга. При этом нужна диаграмма, значительно более широкая, соответственно длинам обеих шкал. Записи должны быть точно синхронизированы. Параллельная запись обычно применяется в высокоскоростных

запись изменения во времени одной или более переменных.

Приборы с ленточной диаграммой различных завод-изготовителей неодинаковы по величине. Обычно они больше; типовые размеры самописца: ширина около 500 мм и высота около 400 мм (рис. V-112).

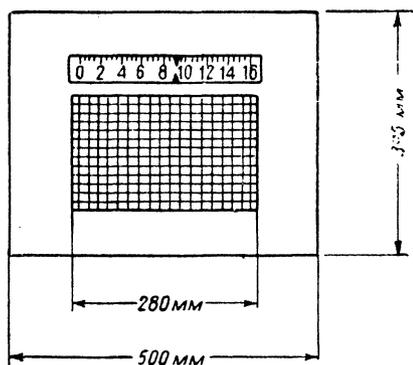


Рис. V-112. Регулятор с ленточной диаграммой для записи.

Эти самописцы относительно дешевы и обычно используются внутри помещения, так как по конструкции они не влагозащищенные. Ролик диаграммы стандартный, длиной 30 м с запасом на разрывы диаграммы или ее скручивание. Для протяжки диаграммы и для работы сервосистемы требуется источник электрической энергии.

Самописцы с широкой диаграммой применяются для управления промышленными технологическими процессами в качестве устройств, измеряющих (с помощью терморпар) и записывающих температуру, а также регулирующих этот параметр. Они используются в управлении опытными установками, для записи данных эксперимента и во многих специальных случаях, когда важны точность прибора и удобочитаемость прямоугольнокоординатной записи. В помещении пункта управления (операторской) такие самописцы обычно применяются для измерения и записи температуры, измеренной с помощью терморпар во многих точках.

Миниатюрные самописцы с ленточной диаграммой конструируются с целью уменьшить площадь панели, на которой они монтируются в помещении для управления технологическим процессом. Конструктивно миниатюрные самописцы такие же, как и 300-миллиметровые самописцы с круговой диаграммой, но отличаются от них по габаритам. Наиболее общим типом можно считать самописец с высотой и шириной около 160 мм и шкалой диаграммы 100 мм (рис. V-113). Миниатюрные самописцы в настоящее время применяются только в качестве записывающих приборов, принимающих входные сигналы в виде изменения давления от 155 до 775 мм рт. ст. (или от 155 до 1400 мм рт. ст.) с выхода пневматических передатчиков или входные элект-

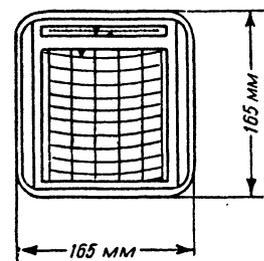


Рис. V-113. Миниатюрный самописец.

рические сигналы постоянного тока с амплитудами от 1 до 5 мА, от 4 до 20 мА и от 10 до 50 мА (в некоторых случаях — в форме напряжений переменного тока). Эти самописцы имеют механизмы для перематывания диаграмм и большие емкости для чернил, достаточные для работы в течение целого месяца; в случае необходимости суточная запись может быть отрезана и вынута из самописца. Можно вести непрерывную запись из трех мест измерения. Чаще всего для привода диаграммы используются электрические двигатели; пневматический привод для перемещения диаграммы применяется в тех случаях, когда недоступен источник переменного тока стабильной частоты или же самописец расположен во взрывоопасном помещении. Скорость диаграммы обычно близка к 20 мм/ч.

В большей части миниатюрных самописцев с ленточной диаграммой запись ведется перьями, укрепленными на длинных перодержателях, поворачивающихся на небольшой угол (около 15°). Поэтому дуги времени на диаграммах имеют относительно небольшую кривизну. Некоторые заводы выпускают самописцы с линейным перемещением пера и прямолинейными диаграммами, но это сильно усложняет конструкцию. Самописцы этого типа не приспособлены для многоотчетной (дискретной) записи. Миниатюрные самописцы с ленточной диаграммой обычно предназначены для работы внутри помещения и не изготавливаются влагозащищенными.

Электрические и пневматические преобразователи способны преобразовать изменение практически любой физической величины в измерительный сигнал, пригодный для ввода в миниатюрный самописец с ленточной диаграммой.

Миниатюрные самописцы с ленточной диаграммой удобно размещаются на панели и всегда применяются, когда приходится пользоваться одновременно целой группой приборов. Их располагают на пульте в помещении управляющего центра.

Один из заводов выпускает ленточные диаграммы не в рулонах, а сложенными в виде гармошки с длиной каждой «складки» 40 мм. Модифицированный привод подает диаграмму к записывающему механизму, а затем автоматически снова укладывает ее в виде гармошки в нижней части кожуха самописца. Такая диаграмма имеет два достоинства: любая часть диаграммы какой угодно длины может быть в любое время извлечена и просмотрена либо во время записи, либо после укладки ленты, и при этом не приходится сматывать или перематывать ее; диаграмма записи (целиком или любая ее часть) автоматически складывается на свое место в самописце без наматывающего барабана.

Электрические самописцы с ленточной диаграммой — как с сервоприводом, так и измеряющие по методу непосредственной оценки — выпускаются различных габаритов. Самописцы с сервоприводом, похожие на 300-миллиметровые, изготавливаются с узкими диаграммами (обычная ширина ленты 178 мм); при этом снижается стоимость прибора, на панели он занимает меньше места. Самописцы, измеряющие по методу непосредственной оценки, изготавливаются с длиной шкалы от 50 до 152 мм; они предназначены для различных электрических переменных.

Для исследований и аналитических измерений выпускаются быстродействующие самописцы, измеряющие контролируемый параметр по методу непосредственной оценки с быстродействием от 100 и более циклов в 1 сек. Перемещение пера в них обычно меньше 50 мм. Имеются конструкции для записи двух переменных по перекрывающимся друг друга параллельным каналам

оператора кажутся сомнительными. Кроме того, оператор с течением времени становится достаточно квалифицированным, чтобы управлять процессом, не глядя на графическую схему производства, где отражена связь между отдельными его участками.

Полуграфические панели также дают возможность легко управлять процессом, но при этом приборы занимают очень небольшую площадь. Комбинирование вертикальной и наклонной лицевых панелей дает максимум полезной рабочей площади на метр длины панели. Индикаторы, самописцы, регуляторы и вспомогательное оборудование располагаются как можно ближе друг к другу, насколько позволяют условия. Графическое представление обычно создается схематическим изображением процесса на небольшой пластинке, размещенной над рабочими поверхностями. Это может быть просто рисунок, может быть применена окраска или подсвечивание для изображения взаимодействия приборов, переключателей и клапанов на схеме.

На рис. V-115 показан стандартный блок, предназначенный для использования с электрическими индикаторными и регистрирующими приборами. На рисунке условно изображены 12 миниатюрных самописцев с ленточной диаграммой (каждый с двумя перьями) и

24 показывающих прибора-регулятора, смонтированные на пульте общей длиной 1120 мм. Внутреннее пространство пульта предназначено для преобразователей, а также для аварийных оповещателей и сигнальных приборов. Такие пульты проектируются для использования группами при управлении крупными технологическими процессами. Объединенные в группу пульты обеспечиваются переключателями, индикаторами, оповещателями и вспомогательным оборудованием.

Описанное устройство совмещает в себе компактность и большую гибкость при стандартности блоков. Любая комбинация самописцев и регуляторов может быть смонтирована на типовом пульте. Центральная клеммная колодка в каждом пульте используется для всех внутренних связей; стандартные кабели проложены от этой колодки к каждому прибору. Место для дополнительных приборов может быть предусмотрено при первоначальной разбивке панели. Любое изменение в управлении технологическим процессом требует только изменения в соединениях на клеммной колодке и перечерчивания небольшой участка графического изображения. Все это — очевидные преимущества полуграфической панели; кроме того, надо подчеркнуть, что электрическое оборудование располагается очень компактно и легко заменяется.

ТЕЛЕМЕТРИЯ (ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ)

Согласно определению американских стандартов C42.30-1957 под телеметрией понимают «использование вспомогательных средств, позволяющих передать результаты измерения на некоторое расстояние от датчика». Это определение не оговаривает расстояния между передающим и приемным устройствами, однако считает отличительной чертой телеметрии наличие вспомогательных средств, которые обеспечивают преобразование измеряемой величины в удобный для передачи сигнал.

Телеметрия может быть разделена на два вида: «подвижная» и «неподвижная». Американские стандарты определяют «подвижную» телеметрию как «электрическую телеметрию между точками, расстояние между которыми может изменяться, вследствие чего применение соединительных проводов невозможно». При «неподвижной» телеметрии относительное расположение передающей и приемной станций остается постоянным и, конечно, с этим видом телеметрии чаще всего приходится встречаться инженеру-химику.

«Подвижная» телеметрия в связи с ее использованием для ракет и авиации обычно характеризуется малыми габаритами и весом по отношению к числу передаваемых данных. От устройств «подвижной» телеметрии требовалась высокая надежность при использовании их в жестких условиях, поэтому таким устройствам уделялось большое внимание в течение последних лет, в результате чего они достигли высокой степени совершенства. Однако большая часть этих устройств специализирована и слишком усложнена для промышленного применения.

«Неподвижная» телеметрия разрабатывалась для промышленных целей; средства «неподвижной» телеметрии также обладают высокой надежностью и универсальностью. Главными потребителями этих средств являются предприятия, где передача и распределение информации весьма существенны. Различные варианты аппаратуры «неподвижной» телеметрии широко используются в промышленности.

ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ «НЕПОДВИЖНОЙ» ТЕЛЕМЕТРИИ

Электрические сигналы можно различать и классифицировать по следующим характеристикам: по току, напряжению, частоте, уравниваемости сигнала и по пульсации или характеристикам импульса. К этому следует добавить цифровую телеметрию, в которой данные принимаются и выражаются в цифровой форме.

Составные части телеметрической системы. Полная телеметрическая система состоит из пяти частей:

1. Первичный датчик, который преобразует измеряемую величину в пропорциональный ей сигнал.
2. Передатчик, который преобразует выходной сигнал первичного датчика в аналоговую величину, удобную для передачи.
3. Соединительная линия, которая используется для передачи данных от передатчика к приемнику.
4. Приемник, который принимает передаваемый сигнал и преобразует его в форму, пригодную для окончного прибора.
5. Оконечный прибор, который является завершающим элементом системы и представляет измеряемую величину на индикаторе, на диаграмме записи или в форме цифрового или иного кода.

Первичным датчиком может быть любой измерительный прибор, который преобразует измеряемую величину в механическое перемещение, или в электрический, или в пневматический сигнал. Любой измерительный прибор может быть снабжен дополнительным устройством для передачи результатов измерения по телеметрическому каналу.

Линией связи для электрического сигнала обычно бывает двухпроводная связь или ее «эквивалент». Последнее означает, что может применяться не только проводная связь, но также любые радио- или микроволновые передающие звенья; для передачи сигнала могут быть использованы и телефонные линии. Некоторые виды электрической телеметрии все же требуют

самописцах и в осциллографах, в которых длина шкалы для каждой из переменных мала. Такая система применяется и в некоторых самописцах с широкой ленточной диаграммой, а также для записи регулируемого параметра и положения регулирующего органа при позиционном регулировании («включено — выключено»). Параллельная запись редко используется при регистрации переменных технологического процесса на круговых диаграммах или на ленточных диаграммах, имеющих ширину меньше 300 мм.

Зонная (последовательная) запись. Несколько записей могут быть выполнены на одной диаграмме, разделенной на зоны по оси времени. В этом варианте многоточечной записи привод диаграммы и система переключения и маркировки работают таким образом, что каждая точка записи определенной переменной появляется в предназначенной для нее зоне. Круговые диаграммы с 24 секторами записи и с одной точкой записи в каждом секторе в течение каждого часа фиксируют медленное изменение одной из переменных, например, температуры или влажности в складских помещениях. В самописцах с ленточной диаграммой этого типа последняя должна быть заранее заданной длины и склеена концами для образования бесконечной ленты.

Путем комбинирования удобной многоточечной дискретной записи с зонной одной самописец может произвести ясную, легко читаемую запись большого числа переменных. Так как движение диаграммы должно быть синхронизировано с системой маркировки и переключения переменных, эта комбинация обычно применяется для записи медленно меняющихся переменных.

ПУЛЬТЫ ДЛЯ ПРИБОРОВ

Хорошо разработанная система показаний, наглядная и вполне удовлетворительная при пользовании отдельным показывающим и регистрирующим прибором, иногда совсем непригодна в помещении управляющего центра, где полный комплект данных о ходе процесса, которым надлежит управлять, должен быть представлен оператору в удобной форме. Индикация и записи должны быть скоординированы с управлением, коммутацией, аварийными устройствами и вспомогательным оборудованием так, чтобы обеспечить четкую, легко наблюдаемую картину хода процесса. Для этой цели применяются пульты двух типов: полная графическая панель и полуграфическая панель¹.

Полная графическая панель, в сущности представляет собой технологическую схему с изображением основных узлов; при этом приборы размещены в соответствующих местах на самой панели (рис. V-114). На такой панели устанавливаются самописцы или комбинированные самописцы-регуляторы, почти всегда миниатюрные, с ленточной диаграммой. Такое оформление панели очень ясно показывает роль и значение каждого элемента во всем комплексе. Это упрощает процедуру обучения операторов; они делают меньше ошибок, так как наглядно видят функции отдельных узлов и их взаимодействие.

Однако размещение приборов непосредственно на панели с графическим изображением хода процесса имеет свои недостатки. Хорошее графическое изображение занимает много места на вертикальной плоскости панели. Панель обычно изготавливается по специальному заказу. Графические панели дороги и своей стоимостью

увеличивают общую стоимость всего управляющего поста. Картина хода процесса, распределенная на большой площади панели, менее удобна для оператора, особенно если несколько сходных операций могут быть

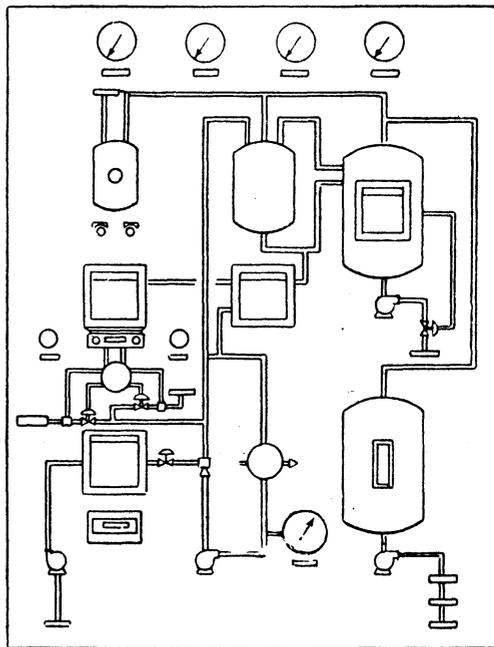


Рис. V-114. Полная графическая панель.

группированы и расположены на пульте параллельными рядами. Графическое изображение процесса не

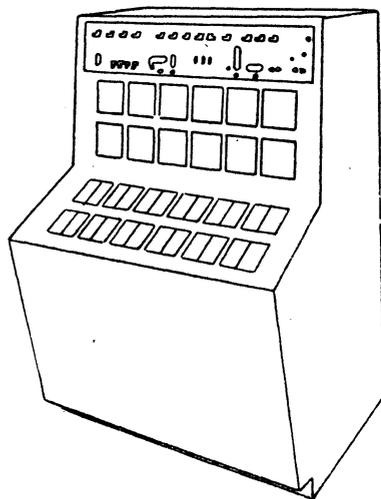


Рис. V-115. Стол оператора с приборами (полуграфическая панель).

гибкое, со временем оно устаревает, любое изменение в технологической схеме влечет за собой дополнительные расходы на реконструкцию панели. Таким образом, реальные преимущества полной графической панели для

¹ В СССР полуграфические панели называют мнемоническими схемами. — Прим. ред.

В одной системе (Minneapolis-Honeywell) ток, пропорциональный измеряемой переменной, подается в преобразователь «ток — частота». В другой (Westinghouse Freq-O-Tron) принимается сигнал в милливольтгах, который преобразуется в частоту — от 15 до 35 сек⁻¹ на весь диапазон измеряемой переменной. В третьей системе (General Electric type TFO), чаще применяемой для передачи электрических параметров, используется механизм типа счетчика ватт-часов, ротор которого вращается со скоростью, пропорциональной измеряемой входной величине. Высококоростная телеметрическая система (Leeds and Northrup) принимает входной сигнал в милливольтгах. Измерение производится высочайшим методом (в приборе перемещением движка реостата уравниваются частоты собственных колебаний двух RC-контуров).

Импульсные телеметрические системы. Импульсные системы используют разнообразные электроимпульсные устройства, непрерывно передающие импульсы (обычно с постоянной частотой следования) вне зависимости от их величины. Наиболее широко используемыми являются число-импульсные системы, в которых число передаваемых импульсов пропорционально измеряемой величине, и широтно-импульсные системы, или системы длительности импульса, в которых длительность импульса пропорциональна измеряемой переменной. Число-импульсная система использует прибор для изменения количества импульсов, передаваемых в данный момент времени, в зависимости от измеряемой величины. Приемник подсчитывает эти импульсы и индицирует результат. Эта система находит чаще всего применение для передачи нарастающего расхода и обычно не применяется для измерения его мгновенной скорости. Это упрощает систему, так как общее число импульсов является функцией интегрального расхода, а точного поддержания временных интервалов между импульсами не нужно.

Широтно-импульсные системы используются наиболее часто в промышленной телеметрии, в частности, при измерениях в нефтяных и газовых трубопроводах и в водном хозяйстве. Системы просты, надежны и устойчивы.

Как правило, эти системы используют «активный ноль», т. е. в случае отсутствия импульсов измеряемой величины передается импульс «нуля», при котором приемник должен показывать ноль. Линией передачи может служить двухпроводная связь или ее эквивалент любой длины.

Все системы длительности импульса (широтно-импульсные системы) используют механически вращаемый кулачок для получения временного интервала. Преимущество этого способа заключается в том, что для особых случаев кулачок может быть выполнен в соответствии с любым математическим законом. Это может понадобиться, например, при измерении расхода, который, как известно, является функцией квадратного корня из произведения переменных величин.

Цифровая телеметрия использует устройства из разных областей техники. Измеряемая величина должна быть преобразована в цифровой код. Если это делается на передаточном пункте, то выходной сигнал измерительной системы подается на преобразователь, который кодирует информацию, передаваемую затем любыми удобными средствами приемнику, воспринимающему используемый код. Выходной сигнал от приемника-дешифратора подается на цифровое табло, перфоратор или другую соответствующую аппаратуру.

Можно использовать широтно-импульсную телеметрическую систему, подавая сигнал этой системы на вход

прибора, преобразующего длительность импульса в цифровой код. По существу, это система импульсная, но обычно все системы с цифровым отсчетом классифицируются как цифровые системы.

УПЛОТНЕНИЕ КАНАЛА СВЯЗИ

Уплотнением канала связи называется метод передачи нескольких сигналов по одному каналу. Такое уплотнение уместно в тех видах телеметрии, в которых используется двухпроводная связь или ее эквивалент. Оно позволяет экономить передающее оборудование и особенно широко используется в случае, когда несколько передатчиков размещается в одном и том же пункте. Существуют два основных метода уплотнения канала связи: частотный и временной.

Частотный метод обеспечивает одновременную передачу данных всех измеряемых величин приемнику. Это достигается тем, что каждый передатчик использует свою несущую частоту для модулирования сигнала. На пункте приема устанавливаются соответственно настроенные фильтры для выделения различных несущих частот и распределения их по приемникам.

При временном методе (методе разделения во времени) на передающем пункте производится с помощью переключателя последовательное подключение нескольких передатчиков к одной линии связи. На пункте приема также установлен переключатель, синхронизированный с первым; он последовательно подключает линию связи к каждому (соответствующему) приемнику. При этом методе передача каждой переменной происходит периодически, с перерывами, поэтому такой метод используется там, где такие перерывы допустимы. Линии связи таких систем дешевы и позволяют уменьшить расходы на эксплуатацию.

Сводка электрических телеметрических систем приводится в табл. V-19.

ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА В ТЕЛЕМЕТРИИ

В течение многих лет пневматические методы передачи информации от первичных элементов к измерительно-управляющим центрам были наиболее распространенными в промышленных условиях. Пневматическая передача до сих пор достаточно популярна, но теперь появились тенденции к использованию других способов обработки и передачи информации, вследствие чего интерес к электрическим методам телеметрии значительно усилился¹.

Промышленные пневматические приборы обычно работают в диапазоне давлений от 150 до 750 мм рт. ст.; их сигналы передаются по металлическому или пластмассовому трубопроводу с малым диаметром. Размеры диаметра отверстия такого трубопровода обычно лежат между 5 мм и 7,5 мм, а длина изменяется от единиц до сотен метров. Пневматические приемники (регулирующие, измерительные элементы и позиционеры) обычно имеют объемы приблизительно 80 см³. Мембранный или поршневой клапаны имеют рабочие объемы от 16 · 10⁻⁴ до 0,1 м³.

В некоторых случаях система, передающая величину скорости потока, должна воспринимать малые периодические сигналы с амплитудой в несколько сот мм рт. ст. при частотах до нескольких герц. Система, передающая температуру, обычно должна реагировать на более медленные периодические изменения; при этом

¹ Considine (ed), Process Instruments and Controls Handbook, New York, 1957.

применения проводной связи или же цепей с ограниченным импедансом.

Оконечным прибором может быть простое устройство, преобразующее механический выходной сигнал приемника в показания индикатора, или это может быть пишущая машинка, или устройство для перфорирования карт.

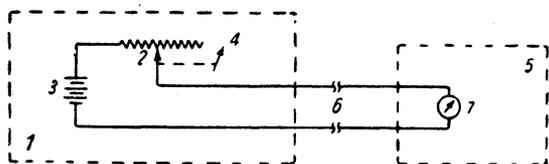


Рис. V-116. Телеметрическая система токового типа:

1 — передатчик; 2 — реостат; 3 — источник питания; 4 — измерительный прибор; 5 — приемник; 6 — линия связи; 7 — амперметр.

Токовая телеметрия. В телеметрической системе токового типа измеряемая величина передается как

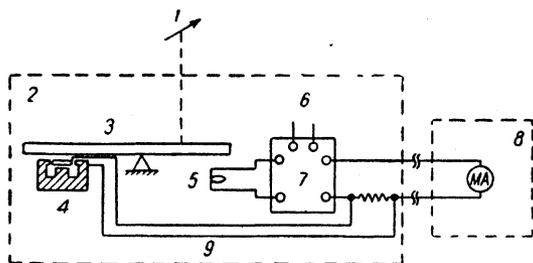


Рис. V-117. Телеметрическая токоуравновешенная система:

1 — измерительный прибор; 2 — передатчик; 3 — рычаг; 4 — катушка обратной связи; 5 — катушка генератора; 6 — питание; 7 — генератор; 8 — приемник; 9 — цепь обратной связи.

функция электрического тока. В приемном пункте ток индицируется на шкале или записывается на диаграмме, обычно оцифрованной в единицах измеряемой величины. На рис. V-116 и V-117 показаны основные разновидности телеметрических систем токового типа.

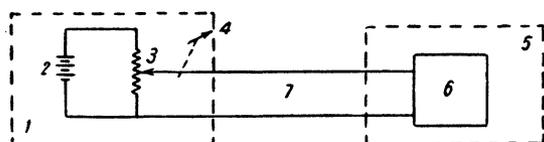


Рис. V-118. Потенциометрическая телеметрическая система:

1 — передатчик; 2 — источник питания; 3 — движок реостата; 4 — измерительный прибор; 5 — приемник; 6 — вольтметр; 7 — линия связи.

Потенциометрическая телеметрия. Телеметрическая система потенциометрического типа передает измеренную величину в виде пропорционального ей напряжения. Принципиальная схема показана на рис. V-118.

Прибор, измеряющий переменную, заставляет перемещаться движок реостата, благодаря чему изменяется напряжение, подаваемое в линию связи. Приемник обычно выполнен в виде вольтметра или потенциометра, калиброванного в единицах измеряемой величины.

В качестве примера применения потенциометрических телеметрических систем можно привести телеизмерение электрической мощности. Термический преобразователь тока превращает небольшую, но определенную часть измеряемой мощности в тепловую энергию, затем измеряет температуру термомпарами, которые выдают выходной сигнал в милливольттах для передачи в приемник. Приемником служит обычно автоматический милливольтметр. Такие системы нуждаются в двухпроводной линии связи, провода которой должны быть защищены от помех экраном.

Телеизмерения по мостовой схеме (уравновешивание сигнала). Телеметрия по мостовой схеме — это разновидность потенциометрической телеметрии (рис. V-119).

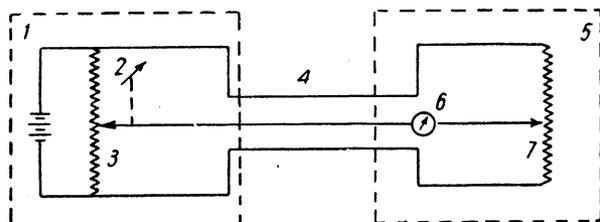


Рис. V-119. Телеметрическая система мостового типа: 1 — передатчик; 2 — измерительный прибор; 3 — движок реостата; 4 — линия связи; 5 — приемник; 6 — нуль-гальванометр; 7 — движок реостата.

В этой системе измеренная величина передается путем изменения положения движка, включенного в мост реостата, или путем изменения каких-либо других электрических характеристик плеч моста; при этом в его диагонали возникает сигнал в виде тока, напряжения, сдвига фазы и т. п.

Пропорционально изменению измеряемой переменной скользящий контакт реостата перемещается, нарушая тем самым равновесие моста, что индицируется нуль-прибором. Чтобы восстановить равновесие моста, перемещают движок реостата на приемном пункте, а шкала движка, оцифрованная в единицах измеряемой величины, показывает соответствующее значение. В других системах этого типа применяются сельсины и мосты переменного тока. Эти системы нуждаются в трехпроводной линии связи, длина которой не должна превышать 500 м. Провода должны быть экранированы, чтобы предотвратить влияние помех на показания гальванометра. Термоизмерительные системы, использующие термометры сопротивления, обычно включаются в передачи мостового типа.

Частотная телеметрия. В этих системах изменения величины измеряемой переменной вызывают изменения частоты переменного тока, поступающего на приемный пункт. В такой системе применяются устройство для преобразования измеряемой переменной в соответствующую ее величине частоту, электронный усилитель и передатчик сигнала, а на приемном пункте — специальный прибор, способный различать изменения частоты и индицировать или записывать их. Далее следует описание некоторых современных систем телеметрии.

амплитуда сигнала в несколько сот *мм рт. ст.* может меняться с частотой от нескольких единиц в минуту до долей единицы в минуту. Осуществление передачи без

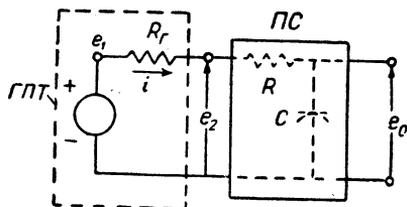


Рис. V-120. Электрическая эквивалентная схема, иллюстрирующая эффект запаздывания:

ГПТ — генератор сигнала постоянного тока; ПС — передающая система; e_1 — сигнал, который должен быть передан; e_2 — сигнал на выходе генератора; e_0 — сигнал на выходе передающей системы; σ ; R_r — внутреннее сопротивление генератора; i — ток генератора; C — емкость системы.

запаздывания в последнем случае не является проблемой до тех пор, пока длина передающего воздухопровода не превышает десятков метров. Если же нужно, чтобы сигнал об изменении переменной проходил через линию связи за 10 *сек* или меньше, то вопрос о дина-

мике пневматической системы должен быть рассмотрен отдельно.

Запаздывание передачи происходит по двум причинам: во-первых, в линии возникает задержка из-за сопротивления, которое оказывает трубопровод при распространении по нему волн давления, во-вторых, передающий прибор оказывает сопротивление потоку воздуха. Для простой пневматической системы эффект запаздывания можно показать на эквивалентной электрической системе (рис. V-120). Постоянная времени передающей системы — RC *сек*; постоянная времени системы с генератором сигнала постоянного тока — $(R+R_r)C$ *сек*. Передатчик может обладать недостаточной емкостью для подачи и отсасывания воздуха. Это соответствует ограничению тока i (см. рис. V-120) и в дальнейшем ведет к искажению сигналов. Подобная аналогия может быть распространена и на более сложные передающие системы.

Механизмы типа сопло — заслонка или сопло — флажок, применяемые в пневматических передатчиках, и сильфоны, применяемые в пневматических приемниках, вполне подобны механизмам, которые описаны далее в разделе «Автоматические регуляторы». По существу передатчик является устройством, которое вырабатывает сигналы давления, изменяющиеся по величине от 150 до 750 *мм рт. ст.* и пропорциональные измеряемой переменной. Приемник, в свою очередь, преобразует эти сигналы в перемещение стрелки индикатора, или пера самописца, или органов регулирующего механизма.

СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В простейших системах автоматического регулирования технологических процессов используются стандартные регуляторы. Регулятор получает сигнал, характеризующий измеряемую величину переменного параметра процесса, сравнивает действительную величину переменной с заданной и приводит в действие клапан или другой регулирующий орган с целью свести разницу между действительной и заданной величинами переменной к нулю. Например, в системе автоматического поддержания температуры используется манометрический термометр, выдающий сигнал в виде давления, пропорционального измеряемой температуре. Этот сигнал сравнивается с заданной величиной давления, устанавливаемой оператором по шкале путем вращения рукоятки задатчика на панели регулятора, и усиленная разность давлений используется для перемещения регулирующей задвижки, ограничивающей количество пара, поступающего к нагревателю (теплообменнику).

В настоящее время промышленностью выпускается много различных типов регуляторов; каждый из них обычно предназначается для поддержания какой-либо одной переменной на определенном уровне.

В других, более сложных системах автоматического регулирования комбинируются два или более регуляторов и различные вспомогательные приборы.

Например, на рис. V-121 показана система поддержания постоянного соотношения; на рисунке изображены три трубопровода, две заслонки и два регулятора для поддержания постоянного отношения потоков B и C к потоку A . Регуляторы могут быть установлены на поддержание различных соотношений $k_1 = B/A$ и $k_2 = C/A$.

В каскадной системе регулирования температуры с большой точностью для ректификационной колонны (рис. V-122) по отклонению температуры в средней точке колонны от заданного значения вырабатывается задание для системы, управляющей потоком пара к

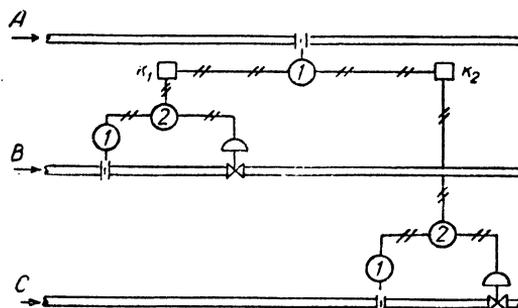


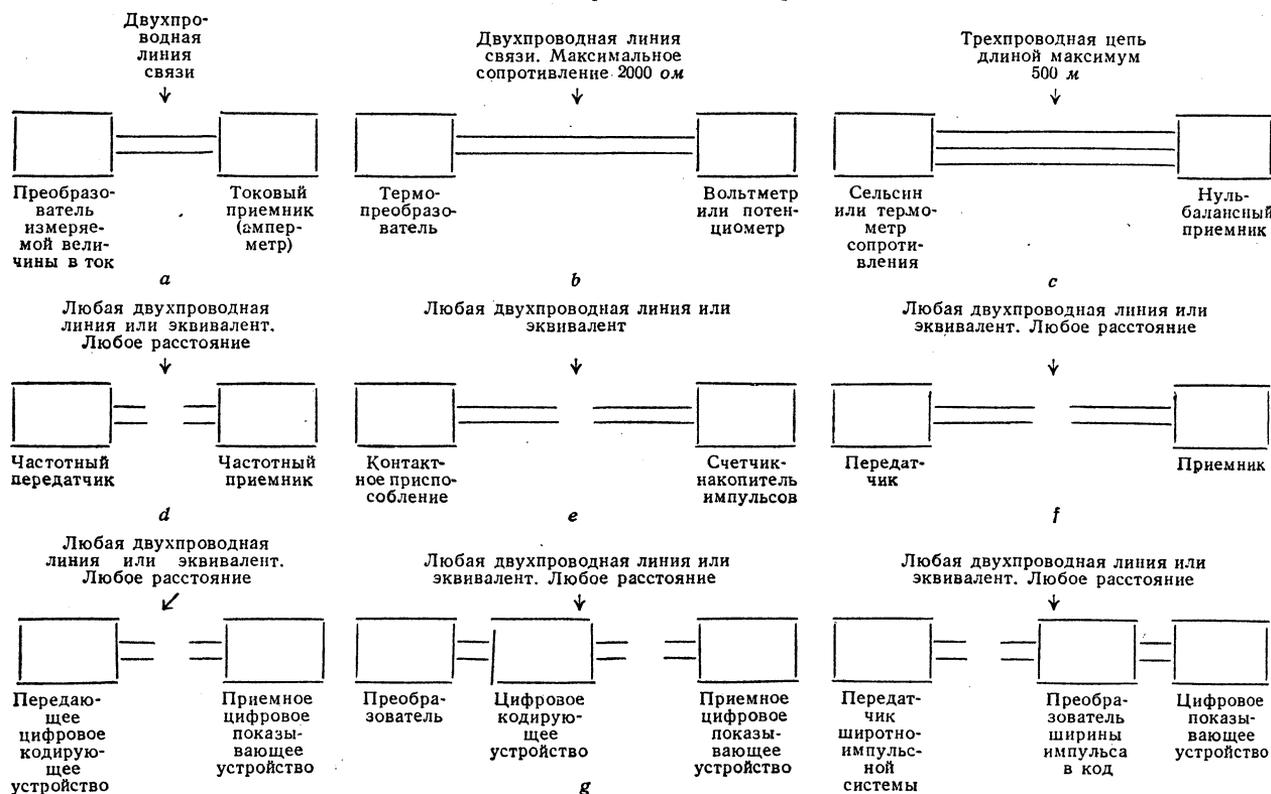
Рис. V-121. Система автоматического регулирования соотношения между потоками:

1 — датчик потока; 2 — регулятор потока.

нагревателю. Эта схема имеет существенное преимущество перед схемами с непосредственным воздействием на клапан регулятора температуры в зависимости от величины потока: побочные возмущения, например, изменение давления греющего пара, которые вызывают изменение потока пара, а следовательно, и изменение нагрева, эффективно нейтрализуются.

Вычислительные элементы используются для расчета величины расхода в зависимости от температуры,

Сводная таблица электрических телеметрических систем



Системы	Упрощенная блок-схема	Достоинства и недостатки	Применение
Токковые	a	Мгновенная передача постоянного тока по двухпроводной линии. Максимальная длина линии 8-10 км. Может работать в электронных системах регулирования.	Аналоговая передача механических измерений
Потенциометрические	b	Мгновенная передача. Сопротивление металлических проводов линии связи должно быть не выше 2000 ом, линия связи должна быть защищена от паразитных токов.	Аналоговая передача электрических величин.
Мостовые	c	Мгновенная передача. Линия связи должна быть трехпроводной и длиной не более 500 м.	Температурные измерения термометром сопротивления; другие аналоговые передачи.
Частотные	d	Практически непрерывны. Входные сигналы поступают в милливольтках или миллиамперах. Системы могут работать по проводной линии связи, на радиочастотах и в микроволновом диапазоне.	Электрические измерения; но могут быть приспособлены и для неэлектрических величин, если передача должна производиться с высокой скоростью.
Число-импульсные	e	Просты. Могут передавать информацию по проводным линиям связи, а также по радио- или микроволновым каналам.	Передача нарастающей величины расхода. Не применяются для передачи мгновенных значений.
Широтно-импульсные	f	Простое электромеханическое приспособление. Может работать с проводной линией связи, на радиочастотах или в микроволновом диапазоне.	Аналоговая передача для всех измеряемых величин.
Цифровые	g	Передача по проводному каналу связи, по радиоканалу, или в микроволновом диапазоне.	Для цифровых показывающих устройств всех измеряемых величин, особенно, если имеется управляющее устройство или требуется цифровая запись, или применяется цифровая вычислительная машина.

ройства поступают значения объемного расхода реагирующего вещества и охладителя, разности температур питающего потока и выходного потока реактора, мощности, подводимой к мешалке, и количества тепловой энергии, теряющейся через стенки реактора.

Удельная теплоемкость, количество выделенной при реакции и испарении тепловой энергии, а также другие факторы вводятся в вычислительное устройство вручную. Сигналы вычислительного устройства используются для управления реактором с целью получения постоянной производительности.

Задача других систем — максимизировать или минимизировать какие-либо характеристики процесса, например производительность или более сложные функции переменных величин, характеризующих процесс (см. раздел «Основы автоматического регулирования»). Для этой цели предложены и сконструированы различные приборы. Предположим, что характеристика качества процесса p , регулируемого с помощью изменения величины m , имеет максимум, как это указано на рис. V-125. Если будет совершаться небольшие отклонения около среднего значения переменной m , значение переменной p будет меняться, как показано на рис. V-126. При отклонении среднего значения m влево

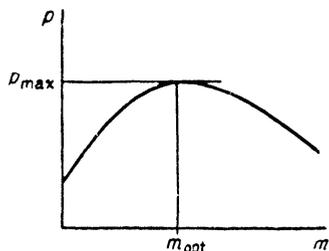


Рис. V-125. График одной из переменных процесса, имеющей максимум.

от пика (см. рис. V-125) изменения p во времени будут подобны отклонениям переменной m и «в фазе» с ними, т. е. p и m будут принимать максимальные значения, так же как и минимальные, одновременно. Если рассматривать отклонения от соответствующих средних значений, то положительные отклонения переменной p соответствуют положительным отклонениям переменной m , а отрицательные отклонения p — отрицательным отклонениям m .

Если отклонения p и m от их средних значений алгебраически перемножить, то результат будет положительным во время всего цикла, среднее значение произведений, следовательно, будет также положительным. Этот результат соответствует точке слева от пика (случай 1 на рис. V-126).

Если ту же самую операцию проделать при среднем значении m справа от пика (см. рис. V-125), то две кривых будут в «противофазе», как показано на рис. V-126. Здесь отрицательные отклонения p соответствуют положительным отклонениям m , и наоборот. Мгновенное значение произведения отклонений теперь все время отрицательно, и среднее значение произведений тоже отрицательно. Этот результат характеризует точку справа от пика (случай 3 на рис. V-126).

Как может быть установлено при рассмотрении случая 2 на рис. V-126, среднее значение произведений отклонений p и m от их средних значений будет равно

нулю, когда среднее значение m равно оптимальному m_{opt} .

Требуемые расчеты для нахождения оптимального значения m могут производиться непрерывно и автоматически с помощью фильтрующих приспособлений, в которых производится вычитание средних значений из сигналов, соответствующих p и m ; множительного устройства, где получаются произведения этих разностей,

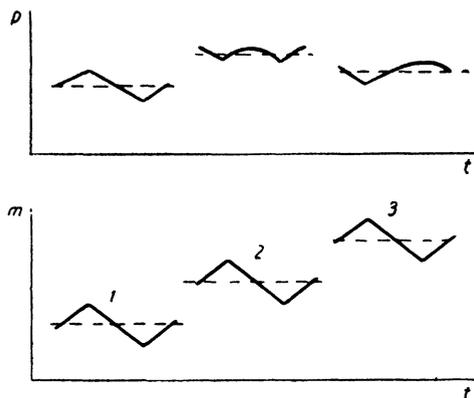


Рис. V-126. Взаимосвязь переменных в экстремальных системах синфазного типа (t — время):

- 1 — среднее значение m меньше оптимального;
- 2 — среднее значение m равно оптимальному;
- 3 — среднее значение m больше оптимального.

и еще одного фильтра для нахождения среднего значения произведений. Выходные сигналы вычислительного устройства (электрического или пневматического), отличающиеся от нуля, используются для изменения среднего значения m таким образом, чтобы оно стремилось к оптимальному значению.

Аналогичная схема, преобразованная таким образом, чтобы отыскивать минимум, использовалась для управления мотором с целью минимального расхода горючего¹.

Другой метод получения такого же результата, также использующий непрерывное изменение m , заключается в применении устройства памяти для запоминания максимального значения p . В тот момент, когда p , уменьшаясь, достигает определенного значения, направление изменения m меняется на противоположное. Эта система, как и предыдущая, вызывает колебания p около максимума (рис. V-127). Среднее значение p в этой системе, как и в системе синфазного типа, меньше максимального. Этой потерей, величина которой зависит от амплитуды колебаний m , нельзя избежать в обеих системах.

Описанные системы работают удовлетворительно, когда нет запаздывания в звеньях связи между m и p . Когда запаздывание значительно, надо применять третий тип экстремальной системы. Здесь m меняется ступенчато и p измеряется после достаточно большого промежутка времени. Если изменение p положительно, следующее изменение m делается в том же направлении, если оно отрицательно, следующее изменение m делается в обратном направлении. Процесс продолжается, пока не будет найден экстремум.

¹ V a s u, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, 79, 481—490 (1957).

давления и от разности давлений в потоке и после сужающего устройства.

Уравнение имеет вид:

$$Q = k \sqrt{\frac{P\rho}{T\rho Z}}$$

где Q — массовый расход, $m^3/ч$; ρ — разность давлений, n/m^2 ; P — статическое давление, n/m^2 ; T — температура, $^{\circ}C$; ρ — плотность, $кг/m^3$; Z — коэффициент сжимаемости; k — постоянная.

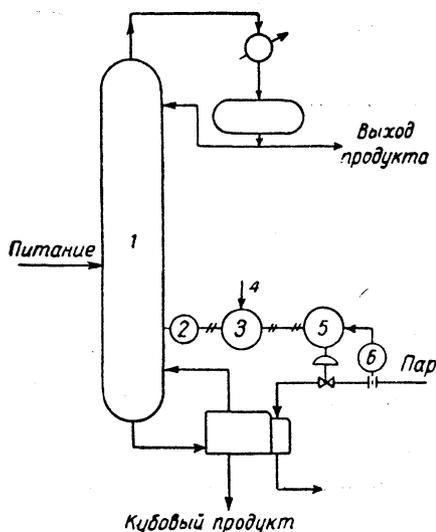


Рис. V-122. Каскадная система автоматического регулирования:

1 — ректификационная колонна; 2 — датчик температуры; 3 — регулятор температуры; 4 — уставка регулятора температуры; 5 — регулятор потока; 6 — датчик потока пара.

Для конкретного газа ρ и Z постоянные; они могут быть учтены при тарировании (градуировке) системы. Для умножения, деления и извлечения квадратного корня необходима вычислительная машина. Если рассчитанный таким образом сигнал массового расхода сравнивается с заданием и разность сигналов используется для воздействия на клапан, то описываемая система управления может называться управляющей вычислительной машиной.

В качестве регулирующего может применяться аналоговое счетно-решающее устройство, включающее в себя звено сравнения и усилительное звено для нахождения разности двух сигналов и усиления этой разности. Часто в них имеются звенья для выдачи выходных сигналов, пропорциональных интегралу или производной от этой разности. Однако такие устройства только недавно стали применяться в качестве аппаратуры для автоматического регулирования процессов.

Система, использующая устройство такого рода (рис. V-123), воплощает метод управления ректификационной колонной, основанный на поддержании теплового и материального баланса в зоне верхней тарелки (см. также стр. 483). В системе используется линейное реле, устройство для извлечения квадратного корня и множительное устройство для вычисления расхода флегмы, равного

$$R_i = R [1 + K(T_0 - T_f)]$$

где K — отношение удельной теплоемкости жидкости на верхней тарелке к ее теплоте испарения. Вычисленная величина сравнивается с заданной, и их разность вводится в регулятор, который изменяет поток дистиллята

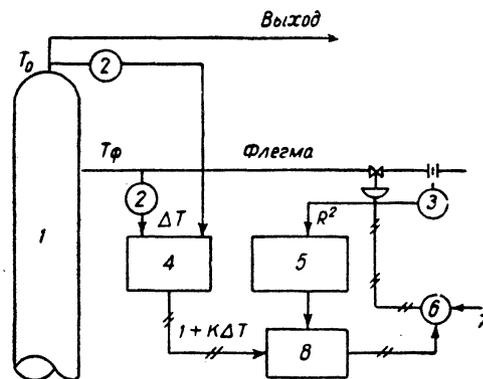


Рис. V-123. Вычислительные устройства для системы автоматического регулирования флегмы:

1 — разделительная колонна; 2 — датчик температуры; 3 — датчик давления; 4 — линейное реле; 5 — устройство для извлечения квадратного корня; 6 — регулятор; 7 — уставка регулирования; 8 — умножитель.

таким образом, что расход флегмы поддерживается постоянным.

Другая аналоговая система была построена для управления химическим реактором. Эта система¹ (рис. V-124)

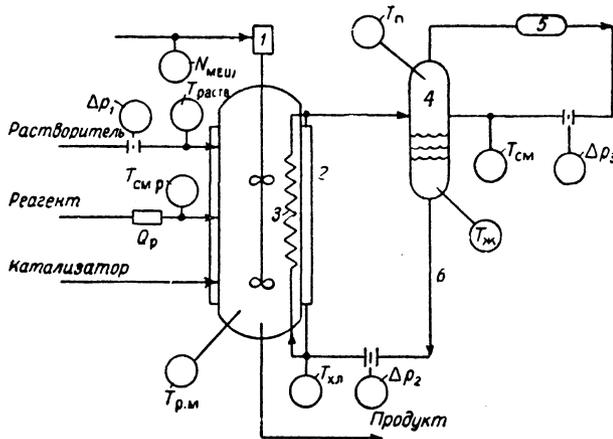


Рис. V-124. Переменные величины для автоматического регулирования химического реактора с помощью вычислительного устройства:

1 — привод мешалки; 2 — кожух; 3 — змеевик охладителя; 4 — охладитель; 5 — конденсатор; 6 — подача хладагента; $N_{\text{меш}}$ — мощность мешалки; температуры: $T_{\text{раств}}$ — растворителя, $T_{\text{см.р}}$ — смеси реагентов, $T_{\text{р.м}}$ — реакционной массы, $T_{\text{хл}}$ — хладагента, $T_{\text{п}}$ — пара, $T_{\text{ж}}$ — жидкости, $T_{\text{см}}$ — смеси; $Q_{\text{р}}$ — расход реагента.

производит расчет теплового баланса для определения количества продукта, получающегося в результате экзотермической реакции. На входы вычислительного уст-

¹ Tolin, Fluegel, J. Instr. Soc. Am., 6, 32-38 (Oct. 1959).

ние можно назвать «автоматическим регулированием с помощью вычислительных машин».

Если вычислительное устройство выполняет функцию расчетчика (рис. V-128), то показания приборов, характеризующих процесс, и данные лабораторных анализов собираются оператором и используются для расчета регулирующих воздействий. Вычислительное устройство здесь часто бывает простым, типа настольной электронно-счетной машины или арифмометра, но и полноценные ЭЦВМ находят все более широкое применение. Результаты расчетов предназначены для ввода в регуляторы и являются основанием для регулирования параметров процесса. Когда возмущающие воздействия сравнительно редки, а вычисления сложны, можно уделвориться устройствами такого рода.

В случае использования вычислительного устройства в качестве управляющей машины (рис. V-129), оно по-

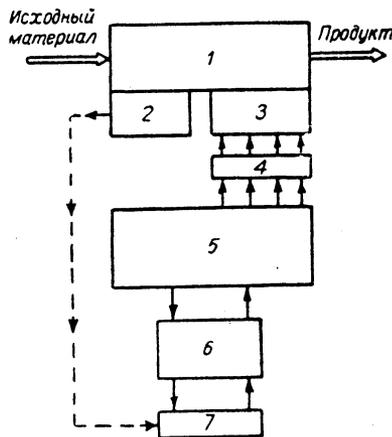


Рис. V-129. Использование вычислительного устройства в качестве управляющей машины (пунктир показывает ручную обработку данных, сплошные линии — непосредственную связь между регулятором и вычислительным устройством):

1 — регулируемый объект; 2 — датчики; 3 — регуляторы; 4 — преобразователи; 5 — вычислительное устройство; 6 — цифровые устройства ввода и вывода; 7 — оператор.

лучает информацию от оператора, но связано с процессом так, что может осуществлять непосредственно его регулирование. Системы такого типа были применены для автоматического управления прокатным станом и блюмингом. Насколько известно, управляющие машины, построенные на основе вычислительных машин общего назначения, не применялись в химической промышленности, но использовались для управления пуском и остановкой паросиловых систем¹.

Вычислительное устройство, используемое как прибор, автоматически записывающий информацию о процессе и выполняющее по ней расчеты, показано на рис. V-130. Датчики параметров процесса связаны с вычислительным устройством через преобразователи. Устройство выдает ряд необработанных данных о про-

цессе или какие-либо функции первоначальных параметров процесса (производительность или к. п. д.), ко-

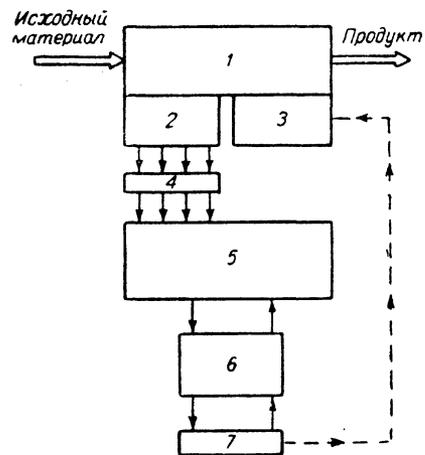


Рис. V-130. Использование вычислительного устройства для регистрации данных и рабочих расчетов (пунктир указывает на ручную передачу данных; сплошные линии обозначают непосредственную связь между датчиками и вычислительным устройством):

1 — регулируемый объект; 2 — датчики; 3 — регуляторы; 4 — преобразователи; 5 — вычислительное устройство; 6 — цифровые устройства ввода и вывода; 7 — оператор.

торые могут помочь оператору воздействовать на процесс. Ряд систем такого рода был применен на химических заводах.

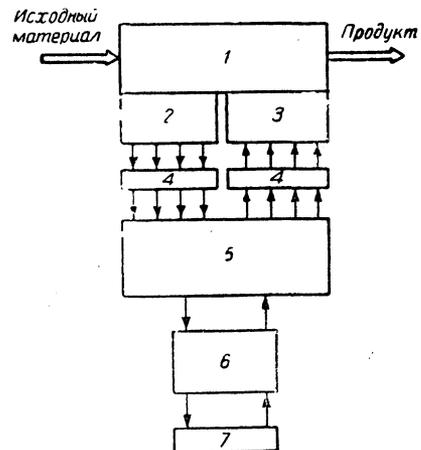


Рис. V-131. Использование вычислительного устройства в замкнутой цепи регулирования:

1 — регулируемый объект; 2 — датчики; 3 — регуляторы; 4 — преобразователи; 5 — вычислительное устройство; 6 — цифровые устройства ввода и вывода; 7 — оператор.

Такое решение задачи удобно, когда определены соотношения параметров процесса, но как схема автоматического регулирования оно имеет много недостатков.

¹ Control. Eng., 6, 38 (July 1959).

Можно предусмотреть изменение шагов поиска после достижения экстремума или другие усложнения основной схемы для процессов, в которых переменная p зависит от двух или большего количества переменных, и эти переменные можно задавать и устанавливать.

Ряд других специализированных устройств для достижения этих же целей объединяется названием «системы автоматического поиска» или «системы оптимизации», так как они используют в качестве данных для поиска экстремума параметры регулируемого процесса.

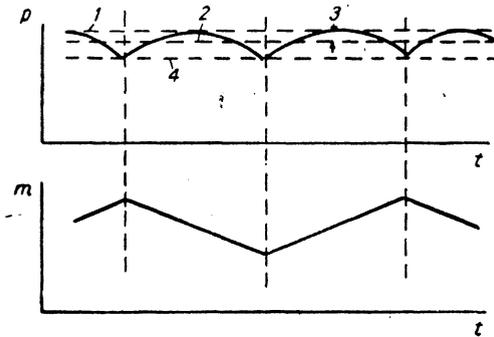


Рис. V-127. Взаимосвязь переменных в экстремальных системах противофазного типа (t — время):

1 — максимальное значение; 2 — среднее значение; 3 — потери вследствие колебания p ; 4 — значение p , при котором переменная m меняет знак производной.

Такой подход к решению, очевидно, будет наиболее успешным, если 1) процесс непрерывный, 2) количество переменных m ограничено, 3) управление процессом по верхним и нижним значениям m лучше, чем по их функциям. При этом подробных сведений о процессе не требуется.

Для процессов, в которых метод поиска неприменим, можно использовать так называемое регулирование с упреждением. Процесс представляется математической моделью, и с помощью высокоскоростных вычислений определяется наилучшая совокупность условий эксплуатации. Модель может быть аналоговой, работающей в ускоренном масштабе времени¹, или совокупностью уравнений, решаемых ЭЦВМ².

Если используется ЭЦВМ, расчеты можно вести итерационным методом, или методом «проб и ошибок», что очень похоже на поиск экстремума, описанный выше. Расчеты могут свестись к вычислениям (по формулам) оптимальных значений вводимых переменных, представляющих собой либо аналитическое решение задачи регулирования, либо совокупность предыдущих итерационных решений³. В любом случае главная идея заключается в том, чтобы предугадать или предсказать дальнейшее поведение процесса и затем, манипулируя определенными переменными, направить процесс таким путем, чтобы его характеристики удовлетворяли заранее установленным критериям. Такой подход к делу будет наиболее успешным, если 1) рассматриваются динамические ситуации (например, периодические процессы); 2) нужно управлять большим числом

переменных; 3) ограничения на управление процессом накладываются максимальным и минимальным значениями функций регулирующих переменных. Однако в данном случае требуется строить модель процесса.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ В УСТРОЙСТВАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ¹

Для управления процессом используется обычная ЭЦВМ, снабженная устройствами для приема и передачи непрерывных сигналов. В дополнение ко всем свойствам машин, используемых для научных расчетов (решения алгебраических и дифференциальных уравнений, проведения статистического анализа), машина для управления может получать информацию (сигналы) о процессе непосредственно от датчиков любого типа, преобразовывать эти сигналы в удобную форму, затем преобразовывать результаты вычислений в непрерывные управляющие сигналы и передавать последние на регуляторы.

Цифровое вычислительное устройство для управления процессом должно обладать памятью, часто представляющей собой магнитный барабан. На нем запи-

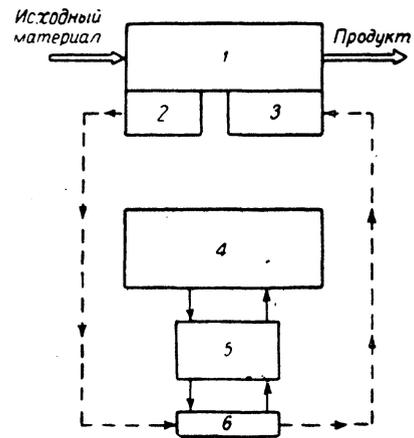


Рис. V-128. Применение цифровых вычислительных устройств, не включенных в замкнутую цепь регулирования (пунктир показывает ручную обработку данных, а сплошные линии — непосредственную связь между входным и вычислительным устройством):

1 — регулируемый объект; 2 — датчики; 3 — регуляторы; 4 — вычислительное устройство; 5 — цифровые устройства ввода и вывода; 6 — оператор.

сываются (в двоичном коде) инструкции или программа ведения процесса, постоянные величины, необходимые для расчетов, и измеренные значения переменных, характеризующих течение процесса.

Вычислительные устройства применяются в управлении процессами по-разному, и не всегда такое управле-

¹ Ziebolz, Paynter, Proc. Natl. Electronics Conf., vol. 9, 1954.

² Grabbe, Phister, Control Eng. (June 1957).

³ Stout, J. Instr. Soc. Am., 6, 98—103 (Sept. 1959).

¹ Stout, Am. Inst. Electr. Engrs. Applications a. Industry, (40), 640—651 (1959). — Phister, J. Instr. Soc. Am., 6, (Jan. 1959). — James, Boksenbom, Control Eng., 4 (9), 148—159 (Sep. 1959).

нять специальные инструкции, например градуировку аппаратуры, а также включение и выключение различного оборудования. Требуемая последовательность операций может быть запрограммирована, если достаточно емкость вычислительного устройства и предусмотрены необходимые измерения и контрольные точки.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

При расчете САР, в которой используется вычислительное устройство, удобно пользоваться рис. V-133. На схеме показана причинно-следственная связь между следующими переменными:

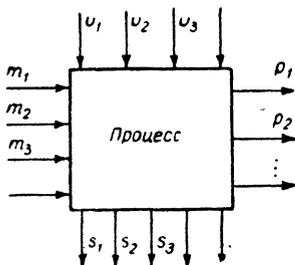


Рис. V-133. Схематическое изображение задачи автоматического регулирования процесса.

1. Возмущающие воздействия u — это такие переменные, которыми вычислительное устройство управлять не может. Они характеризуют изменения, воздействующие на процесс извне и вызывающие со стороны системы противодействие, т. е. заставляющие ее выполнять свои функции.

2. Устанавливаемые переменные m задаются непосредственно вычислительным устройством. Термин «устанавливаемые» используется потому, что до применения вычислительных устройств эти переменные часто (но не всегда) устанавливались вручную поворотом рукоятки на панели регулятора.

3. Промежуточные переменные s возникают во время течения процесса или являются промежуточным результатом расчетных операций. В принципе они могут быть рассчитаны заранее, если известны возмущающие воздействия и устанавливаемые переменные. Промежуточные переменные вводятся для удобства: 1) они легко измеряются и, таким образом, обеспечивают косвенное определение неизвестных возмущающих воздействий; 2) они упрощают расчеты параметров процесса (см. ниже). Если некоторые из промежуточных переменных должны находиться на верхнем или нижнем пределе, то их вносят в список параметров, характеризующих процесс.

4. Параметры процесса, или характеристические переменные процесса p , особо важны с точки зрения достижения целей процесса. Как доказывается ниже, один из этих параметров должен быть максимизирован, а другие должны поддерживаться в определенных пределах. Параметры процесса могут быть заранее рассчитаны, если заданы значения возмущающих воздей-

ствий, устанавливаемых и промежуточных величин. Вообще говоря, так как промежуточные переменные могут быть выражены через величины возмущающих воздействий и устанавливаемых переменных, то и параметры процесса можно считать зависящими только от возмущающих воздействий и устанавливаемых переменных.

В свете этих определений стрелки, направленные внутрь четырехугольника, обозначенного на рис. V-133 словом «процесс», представляют собой переменные, воздействующие на процесс, или «причины», а стрелки, выходящие из четырехугольника, представляют собой ответные реакции, или «следствия». Считается, что процесс можно представить группой причинно-следственных отношений, связывающей два вида переменных. На диаграмме V-133 не показаны материальные потоки, хотя скорости потоков могут быть среди переменных, указанных на диаграмме.

Проектирование САР с вычислительным устройством включает следующие операции: 1) выявление важнейших переменных процесса, 2) определение объективных показателей процесса в реальных условиях, 3) установление причинно-следственных связей, представляющих процесс, и 4) составление схемы для вычисления устанавливаемых переменных, введение которых обеспечило бы лучшее достижение цели процесса. Эти задачи ниже рассматриваются более детально.

Выявление переменных процесса

Прежде чем определять переменные процесса, надо установить пределы влияния разрабатываемой САР. Эти границы могут соответствовать «географическим пределам» процесса или только части процесса. В некоторых случаях они, наоборот, могут, охватывая даже источники сырья или пункты реализации продукции. Но в любом случае они должны быть тщательно установлены, чтобы автоматизация процесса не дала где-нибудь неожиданно отрицательного эффекта.

Возмущающие воздействия являются определяющим фактором в любой САР. Возмущение может вызывать скачкообразное или постепенное изменение регулируемого параметра. Параметры процесса могут изменяться из-за отклонений в характеристиках исходных материалов, в скоростях потоков, в активности катализаторов, в температуре и влажности окружающего воздуха, в барометрическом давлении, в температуре охлаждающей воды, а также из-за коксования реакторов, засорения теплообменников, эрозии поверхностей диафрагм, дрейфа показаний приборов и закупорки труб или сосудов.

Значительный разброс значений параметров наблюдается в процессах с большим числом реакторов, которые производят одну и ту же операцию над одним и тем же материалом. Как правило, процессы в реакторах протекают неодинаково, хотя обрабатывается одно и то же количество материала и ожидается получение одинакового количества продукции. Расхождение можно объяснить, например, отклонениями в количествах катализатора, каналобразованием в слое катализатора, начальными условиями, в которых катализатор находился, его происхождением; конструктивными различиями приборов, подводящих и отводящих трубопроводов. В связи с изменением барометрического давления и других внешних условий, воздействующих на температуру охлаждающей воды, компрессоры часто работают с меньшей нагрузкой, чем это предусмотрено расчетом.

В замкнутой САР (рис. V-131) вычислительное устройство автоматически считывает показания приборов, рассчитывает наилучшие условия работы и управляет регуляторами процесса. При нормальной работе оператор получает данные, характеризующие процесс, от вычислительной машины через печатающее устройство

Системы регулирования, использующие ЭЦВМ, обычно выполняют функции оптимизации, поиска, записи показаний и программного управления. Различные функции выполняются последовательно в соответствии с заданной программой (рис. V-132). Выполняя программу, машина поочередно подключает все устройства

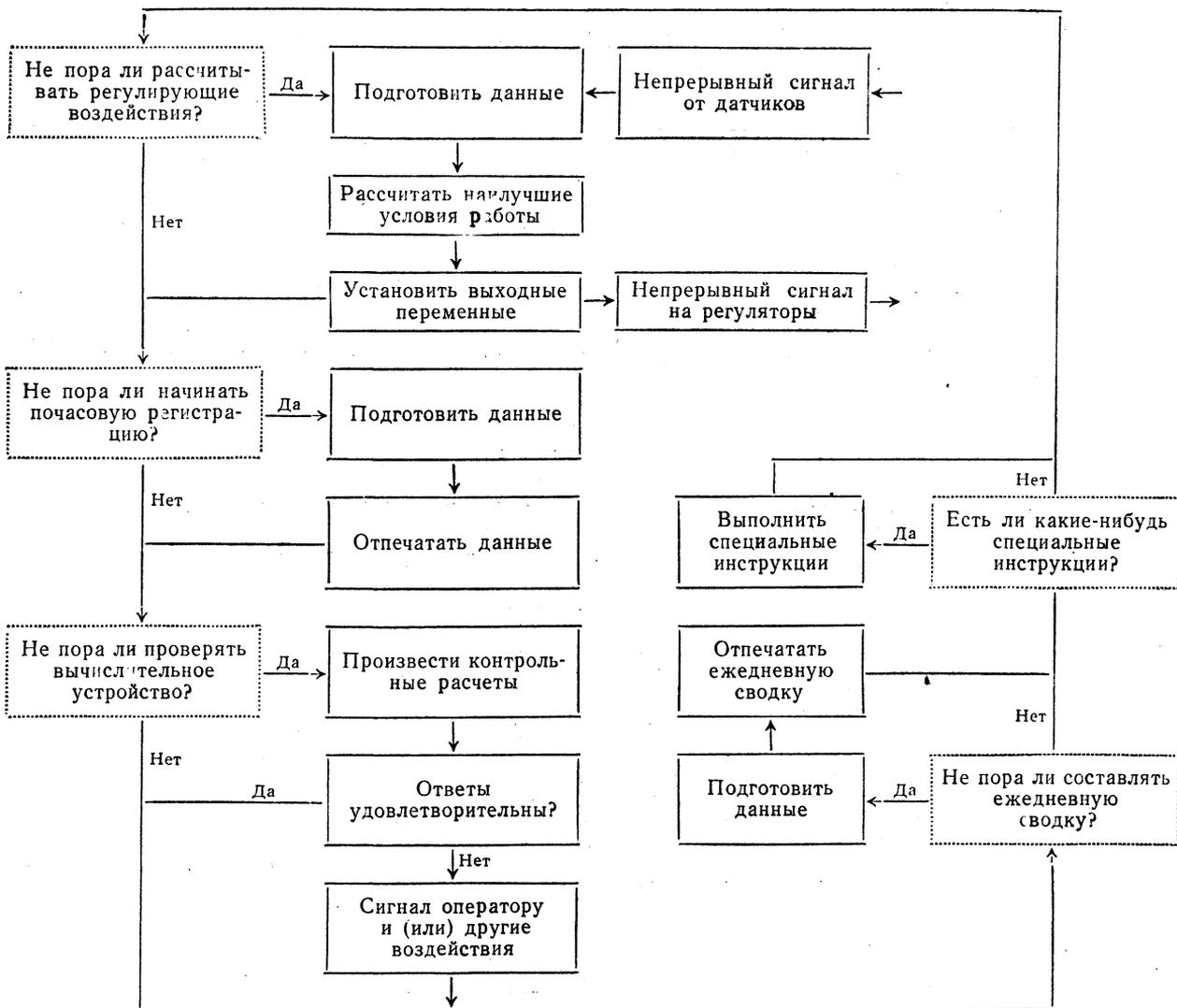


Рис. V-132. Программа работы САР с вычислительным устройством.

или специальный сигнализирующий прибор и может вводить новые данные или законченную новую программу с помощью ленты для считывающего устройства, переключателей или других входных приборов. При необходимости оператор может взять управление на себя, и тогда регулирование будет осуществляться как в предыдущем случае. Системы такого рода использовались для управления процессами каталитической полимеризации¹, получения винилхлорида², аммиака и др.

¹ Chem. Eng., 66, 102—104 (1959).

² Chem. Eng. Progr., 56, 63—67 (1960).

системы и сравнивает текущее время с заданным для выполнения каждой функции. В заданный момент вычислительная машина прекращает опрос блоков, производит вычисления, записывает время, когда осуществленная функция должна быть повторена, и возвращается к продолжению опроса. Осуществление функции управления обычно требует больше времени, чем другие функции, поэтому операции управления выполняются с перерывами, дабы обеспечить в промежутках поиск опасных ситуаций. В интервалах машина может подготавливать ежечасные или ежедневные записи, проверять свои собственные характеристики или выпол-

ременная не имеет предельного значения, то это можно рассматривать так, будто предел не существует.

Несущественно, выражены ли неравенства в форме «меньше чем» или «меньше или равно». Если вычислительное устройство показывает, что определенная температура должна быть меньше 200° , например, то неважно, выбрать ли 199° , или $199,9$, или $199,99$.

Наиболее важной частью проектирования САР с вычислительным устройством является определение числа реальных ограничений. Если их будет слишком мало, результаты расчетов могут оказаться нелепыми, например, вычислительное устройство может выдать заключение, что реакция может протекать при любой температуре и любой скорости подачи реагентов. Должны быть установлены области, где уравнения, используемые для работы вычислительного устройства, являются справедливыми. Если же определено слишком много ограничений, то свободный выбор для вычислительного устройства будет чрезмерно ограничен, и это может повлечь за собой выдачу заключения, что выбранный способ ведения процесса — единственно возможный. Поскольку процесс был предварительно обдуман человеком, то можно предположить, что заданные условия работы действительно являются наилучшими и вычислительное устройство не может внести рациональных изменений в условия ведения процесса. Тем не менее, некоторая область изменений все-таки должна существовать, иначе будет нецелесообразно применять САР с вычислительным устройством.

Верхний и нижний пределы ограничений часто изменяются во времени. В случае, когда такие ограничения, как количество сырья или производительность оборудования, играют большую роль в определении наилучших условий ведения процесса, основная функция управления может смещать пределы, чтобы максимизировать прибыль от работы завода.

Прибыль от операции может казаться наиболее приемлемой формой объективных показателей процесса, потому что получение прибыли есть основная задача большинства производственных операций. Тем не менее можно применять различные приемы для вычисления прибыли от операции, определенной, как описано выше, но приложенной к другим важным ситуациям управления процессом. Например, если важен максимальный выход продукции, можно ввести в вычислительное устройство стоимость сырья, равную нулю; при максимизации D вычислительное устройство будет максимизировать общее количество основного продукта, или, если цены основных и побочных продуктов одинаковы, то общее количество всех продуктов. Если производительность процесса постоянна (при соответствующих ограничениях), максимизация D соответствует минимизации цен наиболее важных компонентов. Если скорость подачи главных видов сырья постоянна, максимизация D соответствует максимизации производительности. Большая часть других специальных расчетов может быть выполнена подобными методами.

Лица, управляющие процессом, естественно, склонны требовать максимального количества продукции по минимальной цене и притом лучшего качества. За исключением особых случаев, невозможно максимизировать или минимизировать более чем одну функцию переменных процесса в общей для всех регулируемых переменных точке. Эта проблема иллюстрирована для двух переменных на рис. V-134. Максимальная производительность (70%) и, следовательно, минимальный расход сырья на единицу продукции имеет место при определенной прибыли (в данном случае 5000 денежных единиц в день), но увеличение прибыли можно

добиться, только работая с меньшей производительностью.

Применение понятия прибыли от операции в случаях, подобных этому, подчеркивает ту мысль, что общая прибыль важнее, чем стоимость единицы продукции. Конечно, в некоторых случаях максимальная прибыль и минимальная стоимость могут совпадать. В этом случае мы ничего не потеряем, если используем прибыль от операции в качестве единственного объектив-

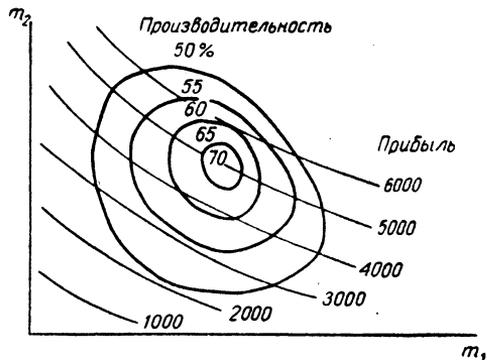


Рис. V-134. Соотношение между производительностью и прибылью (m_1 и m_2 — регулирующие переменные).

ного показателя процесса. Когда качество продукции регулируется экономическими соображениями более точно, чем просто «годится» или «не годится», для нахождения лучшего компромиссного соотношения между количеством и качеством продукции можно оценить качество продукции в денежном выражении и затем привести обе характеристики к общему знаменателю. Объективная функция хорошо приспособлена к таким расчетным операциям.

Наконец, нужно заметить, что в объективную функцию могут входить ограничения в форме стоимости нарушения этих ограничений. Эти величины могут быть реальными, например стоимость переработки продукции или стоимость поврежденного оборудования; в таких случаях надо указать на возможность получения максимальной прибыли при производстве небольшого количества непригодного материала или при некоторых издержках на обслуживание и ремонт оборудования. Эти величины могут быть и ненатуральными, тогда их можно установить столь большими, что вычислительное устройство никогда не выдает сигнал, способный нарушить данные ограничения. Этот метод может применяться для ограничений, вытекающих из лимитированного количества сырья, где большое увеличение стоимости из-за перерасхода сырья эффективно предупреждает попытки израсходовать больше материала, чем имеется в наличии. Аналогичная тактика может применяться во избежание превышения производственной мощности оборудования.

Установление причинно-следственных зависимостей

Причинно-следственные зависимости, на основании которых можно предсказать характеристики процесса, описываются уравнениями процесса или его математической моделью. Уравнения процесса могут обеспечивать

Не все возмущающие воздействия могут быть точно определены. Их следствия могут быть очевидны (например, неожиданные отклонения в качестве продукции), но источники практически невозможно определить. Однако САР должна быть работоспособной и при появлении дополнительных случайных изменений, кроме тех главных возмущающих воздействий, которые учтены при ее разработке.

Устанавливаемые (заданные) величины обычно определяются довольно легко. Часто их значение устанавливает оператор или руководящий персонал. Обычно переменные такого рода редко меняются, и неэкономично предусматривать в САР специальные средства для их изменения. Возможно, лучше иметь ручное управление установками регуляторов и основываться на данных, полученных от вычислительного устройства, чем включать в САР дополнительные блоки.

В отдельных случаях бывает трудно отделить устанавливаемые переменные от промежуточных величин или параметров процесса. Предположим, что должна регулироваться температура. Изменение температуры обычно является результатом изменения потока теплоносителя. В зависимости от устройства САР может оказаться необходимым рассматривать поток как устанавливаемую величину, а результирующую температуру — как промежуточную или как параметр процесса. Вообще говоря, термин «устанавливаемый» подразумевает, что выходной сигнал вычислительного устройства и параметр процесса должны соответствовать друг другу.

Промежуточные переменные могут быть представлены в неограниченном количестве, но каждая прежде, чем она будет использована, должна быть выражена как функция устанавливаемых переменных и возмущающих воздействий. В добавление к потоку, температуре, давлению и другим рабочим условиям на отдельных стадиях процесса перечень промежуточных переменных может включать выход или степень превращения, используемые для расчета производительности и прибыли от операции; рассчитанные концентрации и соотношения реагентов; среднюю производительность каждого из агрегатов (нужно для распределения подвоза сырья) и множество других вспомогательных параметров.

Определение объективных показателей процесса

Параметры (характеристики) процесса ввиду их исключительной важности заслуживают особого внимания. Эти переменные необходимы для составления точных количественных данных об объективных показателях процесса в форме, удобной для использования в вычислительном устройстве. Одна из таких характеристических переменных p_1 , называемая объективной функцией¹, является выражением в денежных единицах прибыли D от операции и записывается как

$$p_1 = D = v_{P_1} P_1 + v_{P_2} P_2 + \dots - v_{M_1} M_1 - v_{M_2} M_2 - \dots - D_0 \quad (V-1)$$

где D_0 — фиксированная цена; P_1, P_2, \dots — стоимость основных или побочных продуктов; M_1, M_2, \dots — стоимость сырья, энергии, катализаторов, растворителей и т. д. и v — коэффициенты увеличения цены или стоимости.

¹ Эта переменная называется также функцией цели (objective function). — Прим. ред.

Для периодических процессов прибыль от операции выражается в денежных единицах за единицу времени и суммируется за каждый период; чтобы получить общую прибыль за месяц или год, надо просуммировать прибыли, которые дали периодические процессы, проведенные за это время. В полунепрерывных процессах, например, с непрерывной подачей сырья и периодической заменой катализатора, стоимость катализатора должна учитываться при каждой замене, а не усредняться в зависимости от количества продукции. Число и время замен катализатора могут быть продиктованы вычислительным устройством, и на этой основе расчеты значительно легче довести до конца.

Если такие показатели процесса, как качество сырья или производительность оборудования, неизменны, то точные значения стоимостей и цен, используемые в выражении (V-1), могут быть несущественными. Часто сочетание «наилучших» рабочих условий имеет место для довольно широкого диапазона стоимостей и цен. В таких случаях некоторые отклонения цены могут не вычисляться.

Объективная функция может быть умножена или разделена на постоянную величину без изменения значения наиболее выгодной рабочей точки. Относительные цены и стоимости важнее абсолютных, и, следовательно, могут быть использованы для удобства масштабные графические изображения. Тем более, когда оценивается стоимость внедрения САУ с вычислительным устройством, могут быть использованы графики, выполненные достаточно точно в определенном масштабе.

Значения P и M , используемые в выражении (V-1), могут быть функциями свойств исходных материалов или качества продукции. Так, цены на некоторые продукты химической промышленности зависят от количества примесей или от концентрации чистого вещества, а на продукты нефтяной промышленности (например, газOLIНОВЫЕ смеси) — от октанового числа. Цены и стоимость могут быть также функциями затрат природного газа или электрической энергии.

Объективная функция должна быть максимизирована с помощью выбора значений устанавливаемых переменных. В то же время должен быть найден ряд других величин, так называемых ограничений, которые выражаются неравенствами:

$$p_{iL} \leq p_i \leq p_{iU} \quad i = 2, 3, 4 \dots \quad (V-2)$$

или равенствами:

$$p_i = p_{iS} \quad i = 2, 3, 4 \dots \quad (V-3)$$

Ограничения налагаются требованиями к производительности оборудования. Они определяются условиями рынка или вместимостью складских помещений; определенным качеством продукции или ограниченным количеством сырья и полуфабрикатов; ограниченной емкостью оборудования, требованиями техники безопасности и другими соображениями. Все параметры: потоки, давления, температуры, уровни, концентрации — в любой части процесса не должны выходить за эти пределы. В противном случае возможна порча оборудования или возникновение таких ситуаций, когда бесполезно тратится время или материалы или персоналу причиняется вред.

Иногда удобно рассматривать равенство, выражающее ограничение, как два неравенства, верхний и нижний пределы которых близки или даже совпадают. В этом случае все ограничения могут быть выражены неравенствами. Практически, если ограничиваемая де-

лученные функции нулю. Этот метод редко можно применить в чисто теоретической форме вследствие слишком большого числа и сложности уравнений процесса. Тем не менее в точке максимума объективной функции частные производные, действительно, обращаются в нуль, и это может быть принято за основу для расчетного определения оптимальных условий процесса. Используя математическую модель и задавая произвольными начальными условиями, придают малые приращения каждой из регулирующих переменных по очереди и вычисляют аппроксимированные частные производные. Когда все они вычислены, новые значения регулирующих переменных находят, добавляя к первоначальным значениям приращения, пропорциональные частным производным и имеющие тот же знак; если производная положительна, регулируемую переменную увеличивают, и наоборот. Этот прием можно повторять многократно; чтобы уменьшить число необходимых вычислений, приращения можно добавлять к регулирующим переменным без пересчета значения частных производных до тех пор, пока максимум не будет достигнут; в этой точке надо вычислять новые частные производные. Известные под названием «градиентных» или «методов наискорейшего подъема», эти методы рассматриваются в специальной литературе¹.

На практике, конечно, нельзя пренебрегать ограничениями. Если ограничение является непосредственно верхним или нижним пределом регулирующей переменной, то решение просто: прекратить увеличение или уменьшение переменной, когда она достигает своего предела. Если же ограничение является пределом функции двух и более переменных, то проблема более сложна. Применяя метод пошаговых расчетов, после каждого шага следует проверить, не было ли нарушено ограничение. Если нет, то расчет можно продолжать. Если же ограничение нарушено, то надо изменить регулирующие переменные. Для завершения расчета прибавляют измененные приращения, пропорциональные, но обратные по знаку частным производным от функции регулирующих переменных, имеющей ограничение. В отдельных случаях для оперирования с ограничениями функций регулирующих переменных применимы другие методы.

Ограничения функций могут обрабатываться с помощью множителей Лагранжа². Это простой, хотя и специальный метод; он предусматривает разбивку исходных материалов на некоторое число параллельных групп, которые не сильно отличаются друг от друга по своим характеристикам³. (Аналогичная проблема в другой области техники — распределение нагрузки между параллельно работающими электрическими генераторами⁴). Например, если производительность равна

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad (V-4)$$

причем производительность каждого отдельного аппарата является соответствующей функцией скорости подачи сырья (и других переменных) и определяется как

$$P_i = p_i(F_i, \dots) \quad (V-5)$$

и если суммарная скорость подачи сырья постоянна и равна

$$F_t = F_1 + F_2 + F_3 + \dots \quad (V-6)$$

то распределение сырья, дающее максимальную производительность, находится с помощью формирования новой функции

$$\Phi = P_t + \lambda(F_t - F_1 - F_2 - F_3 - \dots) \quad (V-7)$$

и дальнейших обычных операций. В этом выражении λ есть множитель Лагранжа. Уравнение (V-7) дифференцируется по переменным скоростям подачи сырья и полученные частные производные приравняются нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial F_1} &= \frac{\partial P_1}{\partial F_1} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial F_2} &= \frac{\partial P_2}{\partial F_2} - \lambda = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial F_3} &= \frac{\partial P_3}{\partial F_3} - \lambda = 0 \end{aligned} \quad (V-8)$$

и т. д. Эти выражения справедливы при

$$\frac{\partial P_1}{\partial F_1} = \frac{\partial P_2}{\partial F_2} = \frac{\partial P_3}{\partial F_3} = \dots = \lambda \quad (V-9)$$

т. е. если небольшое изменение в скорости подачи сырья к одной группе аппаратов вызывает увеличение производительности, которое точно компенсируется уменьшением производительности другой группы.

В тех случаях, когда объективная функция и ограничения представляют собой линейную комбинацию переменных, используется особая техника расчетов, называемая линейным программированием. Немного проблем автоматического управления процессами можно решать этим методом; он был использован для решения вопросов программирования работы нефтепергонного завода¹, смешения материалов², производства цемента и т. д.

Большую трудность представляют собой динамические проблемы, в которых объективная функция есть интеграл от величин, изменяющихся во времени. Один из методов сводится к расчету вариаций³, связанных в простейших случаях с интегралом вида:

$$I = \int_0^T f(x', x, t) dt \quad (V-10)$$

где $x' = dx/dt$. Вопрос здесь заключается в том, чтобы найти лучшую группу вариаций x во времени для максимизации интеграла. Решение находится из соотношения:

$$\frac{\partial f}{\partial x} - \frac{d}{dt} \cdot \frac{df}{\partial x'} = 0 \quad (V-11)$$

Расширение этого основного метода позволяет рассматривать случаи, когда имеется несколько переменных и метод множителей Лагранжа может быть использован для ограничений, записанных в форме уравнений. Расчеты вариаций трудно в чистом виде применить для случаев, когда ограничения даны в форме неравенств. Метод был использован для исследования

¹ Tompkins, Modern Mathematics for the Engineer, ch. 18, New York, 1956.

² Hildebrand, Methods of Applied Mathematics, 1952.

³ Stout, J. Instr. Soc. Am., 6, 98-103 (Sept. 1959).

⁴ Kirchmayer, Economic Control of Interconnected Systems, New York, 1959.

¹ M a n n e, Scheduling of Petroleum Refinery Operations, Cambridge, 1956.

² G a s s, Linear Programming, New York, 1958.

³ H i l d e b r a n d, там же.

или не обеспечивать полноту описания процесса. Уравнения необходимы для определения каждого параметра процесса или промежуточной величины как функций от устанавливаемых величин и возмущающих воздействий. При этом подразумевается, что для каждой определяемой переменной нужно одно уравнение, и обычная математическая модель состоит из системы уравнений. Использование большого числа простых уравнений, вместо нескольких длинных и сложных, диктуется техникой цифровых вычислений.

Уравнения процесса можно классифицировать по роду операции, которую они описывают, по виду самого уравнения или по методике, применяемой для его раскрытия. Для выражения взаимосвязей процесса могут быть использованы различные типы уравнений. В непрерывных длительных процессах можно предполагать относительно постоянными скорости подачи сырья и выхода продукции; можно ожидать, что так же мало изменяются давление, температура, концентрация и др. Возмущения могут иметь ступенчатый вид и являться случайными результатами, например, резкого изменения в подаче сырья или в качестве продукции. Основной задачей автоматического управления такими процессами является определение наилучших условий работы в установившихся режимах, поскольку отклонения от этих режимов непродолжительны. Поэтому здесь наиболее предпочтительна математическая модель, состоящая из алгебраических уравнений. Эта модель составляется из энергетического и материального балансов, производительности или обратных ей величин, фазовых соотношений, статических уравнений и других видов уравнений, знакомых химикам.

В периодических процессах поток сырья намеренно время от времени прерывается и условия протекания процесса обычно меняются во времени. Такой процесс никогда не находится в статическом состоянии, и его математическая модель должна состоять из дифференциальных или разностных уравнений, которые представляют ход процесса как функцию времени. Аналогичная модель требуется для описания течения непрерывного процесса на отрезке времени, следующим сразу за большим возмущающим воздействием, или в моменты пуска и остановки. Обычно такой процесс описывают дифференциальными уравнениями, составленными на основе принципов кинетики химических реакций, гидродинамики, тепло- и массообмена. Если пользоваться ЭЦВМ, которая может быстро повторить серию вычислений, удобно прибегать к дифференциальным уравнениям, что позволяет находить значения многочисленных зависимых переменных в определенные промежутки времени.

Математические модели могут быть получены как теоретическим, так и эмпирическим методами. Теоретический анализ и даже аппроксимация часто обеспечивают нахождение важнейших переменных и дают ключ к выявлению функциональных связей между ними¹. Эти связи могут оказать большую помощь при проведении статистического анализа экспериментальных данных.

Если используется небольшое число данных из слишком ограниченного количества переменных, то статистический анализ может дать такие кривые или экспоненты, которые, вообще говоря, невозможны с точки зрения теории. Модель, основанная на теоретическом анализе, заслуживает большего доверия, чем эмпири-

ческая модель, так как ошибки подобного рода в ней невозможны.

В настоящее время хорошо известны экспериментальные методы для построения динамической модели процесса, включающие в себя снятие частотных характеристик при ступенчатом возмущении¹. Были сделаны также попытки применить корреляционные методы². С помощью АВМ можно наиболее эффективно получить динамическую модель процесса, так как можно быстро провести большое количество экспериментов, устанавливая различные значения параметров в вычислительном устройстве до тех пор, пока характеристики модели не станут подобными характеристикам процесса³.

Статистические методы создания стационарной модели процесса были подробно обсуждены в литературе⁴. Не следует упускать из вида возможность использования статистических методов обработки данных. Если переменные параметры процесса, например, производительность, можно вычислить несколькими независимыми путями, опираясь на различные ряды переменных, измеренных со случайными ошибками, то наиболее вероятные значения измеренных переменных можно найти, применяя метод наименьших квадратов⁵.

Получив математическую модель, конструктор системы должен проверить ее с помощью данных, не использованных при разработке модели. Такая проверка может потребовать постановки специальных опытов; при проведении их параметры процесса желательно задавать так, чтобы результат проверки можно было сразу же наблюдать. В любом случае проверка точности модели является необходимым этапом расчета системы. Статистические методы используются для того, чтобы сделать вывод, насколько точно предсказывается ход процесса.

Составление схемы автоматического регулирования

В вычислительном устройстве САР математическая модель или уравнения процесса используются для расчета оптимальных значений устанавливаемых переменных в заданный момент времени или их переменных значений как функций времени. Эти значения обладают такой характерной особенностью, что любое отклонение от них вызывает нежелательное изменение объективной функции или нарушение введенных ограничений. Различные средства, выбор которых зависит от того, является ли модель статической или динамической, могут быть применены для определения регулирующих переменных, удовлетворяющих объективной функции.

Если рассматривать только установившийся процесс, временно игнорируя существование ограничений, то для нахождения регулирующих переменных, максимизирующих объективную функцию, естественно дифференцировать ее по каждой из переменных и приравнять по-

¹ Laspe, J. Instr. Soc. Am., 3, 134—138 (April 1956). — Young, Introduction to Process Control Design, Pittsburgh, 1955.

² Florentin, Hainsworth, Reswick, Westkott, Joint Symposium Instrumentation and Computation in Process Development and Plant Design, London, 1959.

³ Batke, Franks, James, J. Instr. Soc. Am., 4, 14—18 (Jan. 1957). — Woods, Ind. Eng. Chem., 50, 1627—1630 (1958). — Williams, Chem. Eng., 67, 121—126, Feb. 8; 131—136, Mar. 7; 139—144, Apr. 4; 121—126, May 2; 97—102, May 30; 113—118, June 27 (1960).

⁴ Davies, Design and Analysis of Industrial Experiments, New York, 1954.

⁵ Deming, Statistical Adjustment of Data, New York, 1948.

¹ Anderson, Chem. Eng. Progr., 55, 61—67 (April 1959). — Pinchbeck, Chem. Eng. Sci., 6, 105—111 (March 1957).

раз, чтобы снизить ошибку, возможную из-за неправильного отбора данных, то эта процедура дает достаточно точное представление о размере ожидаемой прибыли. Поскольку стоимость системы может быть оценена с довольно большой точностью, получаемые данные об экономической эффективности применения САР заслуживают доверия.

Наиболее точное определение эффективности системы можно получить, конечно, после ее внедрения, когда установлены действительные стоимости и прибыль. Тем не менее следует высказать несколько предостережений по поводу оценок эффективности после внедрения системы. Так как производственные процессы обычно организованы достаточно хорошо, то ожидаемая прибыль не так уж велика: обычно производительность увеличивается на 2—5%. Измерения параметров процесса часто сопровождаются ошибками такого же порядка. Бывает даже так, что измерения показывают ухудшение характеристик процесса, хотя на самом деле имеет место улучшение. Такие случаи можно предотвратить, используя больше данных и проводя статистический анализ. Следует считать, что чем меньше среднее улучшение и чем больше ошибки измерений, тем больше данных потребуется для правильного подсчета. Соответствующие статистические критерии описаны почти во всех трудах по этому вопросу; были также опубликованы примеры их применения к проблемам такого рода¹.

Наконец, при сравнении управления с помощью САР и без нее предполагают, что все остальные факторы, способные влиять на характеристики процесса, постоянны. Если же они меняются (например, используется новое сырье или новое оборудование), то надо сделать соответствующие допущения в расчетах.

НАЛАДКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

После того как модель процесса создана, ограничения определены и процедура оптимизации установлена, можно определить количество переменных, которые должны измеряться или регулироваться с помощью вычислительного устройства. Обычные системы имеют 25—100 входов в вычислительное устройство и 5—30 выходов. При назначении этих чисел полезно предусмотреть, чтобы все переменные, регулируемые вычислительным устройством, также измерялись бы (для контроля работы системы). При проектировании системы необходимо предусмотреть возможность ее дальнейшего совершенствования. Чем раньше будет определено число входов и выходов вычислительного устройства, пусть даже приблизительно, тем раньше изготовитель сможет начать сборку входных и выходных приборов.

Конструкторы системы должны также выбрать первичные датчики для измерения переменных величин, вводимых в вычислительное устройство. Многие измерения, например потока, давления, температуры, уровня, скорости и положения относительно просты. Но они существенно усложняются, если необычны пределы измерения или внешние условия. Измерения других переменных, например, характеризующих физические или химические свойства исходных материалов и конечных продуктов, могут представлять значительные трудности. Так, при работе со спектрометрами некоторых ти-

пов вычислительное устройство должно решить ряд уравнений для того, чтобы желаемая информация поступила в устройство. Иногда показания приборов можно вводить в вычислительное устройство, а оно само по формулам подсчитывает желаемую величину. В других случаях, когда установленные в технологической цепочке приборы непригодны, приходится проводить лабораторные исследования, результаты которых вводят в вычислительное устройство с помощью рукояток, переключателей или перфокарт.

Даже при относительно простых измерениях, например потока, давления или температуры, следует уделить серьезное внимание системе передачи данных. Если используются пневматические приборы, то сигнал в виде давления воздуха при помощи пневмоэлектрического преобразователя должен быть представлен в форме электрического импульса. Преобразование в обратном направлении необходимо, когда электрический сигнал, выданный вычислительным устройством, должен воздействовать на пневматические регуляторы или клапаны. Электрический сигнал, генерируемый термпарой, мал, и для использования в вычислительном устройстве его надо усилить. Сигналы всех типов часто нуждаются в фильтрах для уменьшения влияния помех; фильтры устанавливаются либо в самих датчиках, либо на входе системы передачи данных. Для передачи используются реле и электронные коммутаторы; сигналы поступают в вычислительное устройство через аналого-цифровой преобразователь.

При планировании функций вычислительного устройства конструкторы и программисты должны определить объем памяти вычислительного устройства и время, необходимое для выполнения различных вычислений. Определение объема памяти требует предварительной оценки числа инструкций и данных, которые должна помнить машина для управления, оценки сигналов, регистрации, синхронизации и вспомогательных операций (например, управления печатающим устройством или перфоратором). Программа должна составляться так, чтобы время от времени можно было модифицировать часть ее, не нарушая другие разделы.

Цифровое вычислительное устройство затрачивает на выполнение расчетов некоторое конечное время. Это ограничивает частоту производства вычислений. С другой стороны, чем чаще выполняются расчеты, тем выше качество управления. Если расчеты делаются слишком редко, вычислительное устройство не приносит никакой пользы, но если они повторяются так часто, как это только возможно, то не остается времени для осуществления вспомогательных функций. К счастью, «часто» — понятие относительное, и обычно удается установить оптимальную частоту повторения расчетов.

Программа для САР отличается от программы для научных вычислений: особое значение придается соотношению быстродействия и объема памяти вычислительной машины. По сути дела, время, необходимое для выполнения программы, можно минимизировать, значительно увеличив объем памяти и число запрограммированных команд, в то время как объем памяти для длинной программы, осуществление которой требует большого отрезка времени, может быть небольшим. Наиболее выгодным будет компромисс между максимальной скоростью и минимальной длиной программы.

Другим важным свойством является надежность системы. В любой комплексной системе, в которой управление осуществляется с минимальным вмешательством человека, различные предохранительные устройства призваны оберегать оборудование от порчи. В САР с вычислительным устройством могут выйти из строя

¹ Stout, Control Eng., 7, 93 (Febr. 1960).

САУ водородным реактором периодического действия¹.

Для периодических процессов или тех случаев, когда динамика процесса существенна для решения задач автоматического регулирования, применяется и широко используется другой метод, названный динамическим программированием². Он может с успехом применяться как при решении задач, с которыми мы уже встречались при подсчете вариаций, так и других разнообразных проблем. Он сильно отличается от метода подсчета вариаций. Процесс представляется рядом дифференциальных уравнений, которые позволяют рассчитать его последовательные состояния. Выбор наилучших значений устанавливаемых переменных имеет в этом случае многозначное решение. Динамическое программирование основано на принципе оптимальности, который утверждает: «Метод оптимизации заключается в том, что каковы бы ни были начальные состояния и начальные решения, последующие решения должны составляться оптимально по отношению к результирующему состоянию, достигнутому после первого решения».

Предполагается, что в результате сделанного выбора значений устанавливаемых переменных последующие решения будут оптимальными. Это допущение позволяет значительно сократить количество расчетов, необходимых для установления наилучших режимов работы. Предположим, например, что химический процесс продолжается 30 дней и в каждый день возможны 20 комбинаций скорости протекания процесса и температуры. Чтобы проанализировать все возможности, надо оценить около 20³⁰ различных комбинаций температуры и скорости, что представляет собой непосильную задачу³.

При использовании динамического программирования расчеты начинают с последней стадии процесса. Для примера, указанного выше, последняя стадия — это последний день работы. Для различных состояний процесса к началу последнего дня, характеризующихся, например, значениями каталитической активности, которая является результатом предшествующих процессов обработки, просматриваются 20 комбинаций скорости потока и температуры и выбирается наилучшая. Затем расчеты повторяют для предпоследнего дня, учитывая определенные оптимальные значения для последнего дня. Аналогичные расчеты проводятся для предпредпоследнего дня и так далее, учитывая на каждой стадии уже известные оптимальные результаты для последующих дней. Нетрудно заметить, что этот метод дает большую экономию в расчетах.

Динамическое программирование применяется при решении многих задач, связанных с управлением химическими процессами. Например, в процессе используется катализатор, активность которого падает с течением времени, вследствие чего его надо периодически заменять; требуется выбрать условия ведения процесса и назначить сроки замен катализатора для максимизации прибыли⁴. Описаны и другие примеры⁵. Можно ожидать дальнейшего развития метода и расширения области его применения.

ОЦЕНКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Внедрение САУ с вычислительными устройствами, как и другие способы улучшения производственного процесса, должно самоокупаться за счет увеличения производительности, снижения себестоимости или улучшения качества продукции. На различных стадиях конструирования САУ с вычислительным устройством надо сравнивать ее стоимость с ожидаемой прибылью от ее внедрения.

В 1962 г. в США ожидалось снижение стоимости САУ с вычислительным устройством до 200—400 тыс. долл. Эти цифры включают в себя стоимость самой системы; входного и выходного оборудования для связи вычислительного устройства с приборами и регуляторами; новых, ранее не устанавливавшихся датчиков; реконструкции помещения, необходимой для освобождения места под вычислительное устройство, и плату за инженерный труд, включая конструирование системы, составление программы для вычислительного устройства и его установку. Суммы, определяющие стоимость систем, в дальнейшем дополняются или сокращаются в зависимости от изменений в конструкции или в назначении системы. Они достаточно велики, и такие системы требуют тщательной оценки экономической эффективности.

На ранних стадиях проектирования системы, пока еще не построена математическая модель процесса, трудно предсказать точно ожидаемую прибыль. Можно делать только ориентировочные прогнозы. Можно, например, определить разницу между теоретически максимально возможной производительностью труда и наблюдаемой в настоящее время. Если эта разница мала, то внедрение САУ с вычислительным устройством вряд ли целесообразно. Если же разница велика и есть основания думать, что применение системы управления ее уменьшит, то дальнейшие усилия по конструированию системы будут в конце концов оправданы. Подобные рассуждения применимы и к стоимости операций управления, которую можно снизить, используя автоматические устройства.

Улучшение качества продукции — другой потенциальный источник прибыли. В некоторых случаях, если некондиционная продукция идет прямо в отход или на переработку, или возвращается заказчиком обратно на завод, то расчет прибыли может быть сделан на основе учетных записей. С другой стороны, если, как ожидается, улучшение качества продукции повлечет за собой расширение рынков сбыта, то прибыль будет еще больше. Надо также заметить, что несовершенное управление процессом, которое часто ведет к разбросу параметров качества продукции, все же позволяет обеспечить довольно высокий уровень качества. Жесткое и совершенное автоматическое управление означает в таких случаях снижение разброса параметров качества, повышение нижней границы разброса и, следовательно, снижение стоимости некоторых производственных операций.

После разработки математической модели и схемы автоматического управления можно точнее оценить ожидаемую прибыль. Можно представить математически процесс управления. Для этого надо собрать данные о каком-либо характерном периоде управления без участия САУ и произвести расчет таких величин, как производительность, выход, качество продукции и стоимость наиболее важных операций для случая, когда САУ работает. Если эти расчеты повторить несколько

¹ Eckman, Control. Eng., 4, 197—204 (Sept. 1957).

² Bellman, Dynamic Programming, Princeton, 1957.

³ Weeks, Magic Memory Solves Raw Materials Mix Problems, Rock Prods. (Apr. 1960).

⁴ Roberts, Am. Inst. Chem. Engrs Symposium on Computers, 1960.

⁵ Kalman, Lapidus, Shapiro, Chem. Eng. Progr., 56 (2), 55 (1960). — Aris, Bellman, Kalaba, Rand. Corp. Rept. P-1798, Santa Monica, Sept. 1959.

никами обозначают динамические звенья (связывающие функционально входную и выходную величины), например регулируемый объект или регулятор. Эти функции связи называют передаточными функциями.

Основной задачей системы регулирования является поддержание выходной величины процесса на некотором заданном уровне. Если возмущающее воздействие отклоняет значение выходной величины от заданного, это

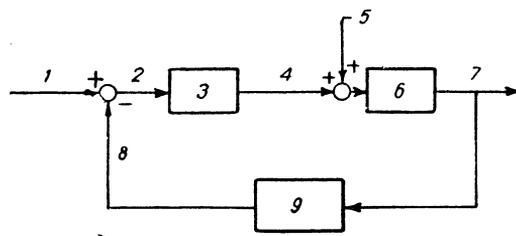


Рис. V-135. Блок-схема замкнутой системы автоматического регулирования:

1 — установка регулирования (заданное); 2 — управляющий сигнал (сигнал ошибки); 3 — регулятор; 4 — регулирующая переменная; 5 — возмущающее воздействие; 6 — процесс (регулируемый объект); 7 — регулируемый параметр; 8 — сигнал обратной связи; 9 — элементы обратной связи.

значит, что изменился регулируемый параметр или изменились некоторые характеристики регулируемой среды. Значение регулируемого параметра измеряется, и сигнал, пропорциональный этой величине, через обратную связь подается на вход системы, где сравнивается с заданной величиной. Полученная разность есть сигнал ошибки, или управляющий сигнал, который воздействует на элементы системы, чтобы изменить течение процесса и в конечном счете быть сведенным к нулю. Возмущающее воздействие может быть представлено в виде изменения регулирующей переменной, как это сделано на рис. V-135, или иначе.

Разомкнутые САР отличаются отсутствием непосредственной связи между регулируемым объектом и регулятором по величине регулируемого параметра через элементы обратной связи. Блок-схема такой системы отличается от рис. V-135 тем, что на ней нет нижней части петли, включающей элементы обратной связи; отсутствует и звено сравнения. В качестве примера можно назвать системы, использующиеся при нейтрализации отходов или смешивании гранул. Анализ и расчет таких систем существенно отличается от расчета замкнутых систем. Однако и у них должна иметь место хотя бы периодически обратная связь в форме проверки или анализа результатов управления.

Ручное управление может рассматриваться как управление с обратной связью. Человек (оператор) контролирует ход процесса либо с помощью собственных органов чувств, либо наблюдая за показаниями приборов. Если он замечает изменения в выходной величине, то предпринимает некоторые корректирующие воздействия по отношению к входным (регулирующим) переменным процесса. Такое регулирование характеризуется меньшей точностью, оно происходит медленнее и менее надежно по сравнению с автоматическим управлением. Однако человек способен лучше, чем машина, охватывать сразу сложную картину работы системы, обучаться и рассуждать, а также приспосабливаться к изменениям. Поэтому есть еще много областей, где используется и будет использоваться ручное управление. Для

него также можно составить блок-схему, в которой оператор замещает все элементы системы, кроме самого процесса и регулирующих элементов.

Система автоматического регулирования теплообменника

Значение различных звеньев САР лучше всего рассмотреть на простом примере, показанном на рис. V-136, где изображена схема теплообменника, в котором вода нагревается паром, проходящим по змеевику. Регулирующее воздействие здесь осуществляется энергией пара, поступающего в нагреватель, а регулируемым параметром является температура нагреваемой воды. Уставкой или заданным значением является желаемая температура воды, выходящей из нагревателя.

Теплообменник представляет собой регулируемый объект, и его передаточная функция есть отношение температуры выходящей воды к расходу пара, который является регулирующей величиной. Форма передаточной функции может быть значительно усложнена; ее выражение будет зависеть от конструкции теплообменника, температур пара и воды и скоростей потоков.

Цепь обратной связи включает в себя средства для измерения регулируемого параметра (температуры) и линию связи для передачи этой информации в звено сравнения, где измеренное значение сравнивается с заданным. В нашем случае измерительным средством может быть манометрический термометр с баллоном, заполненным жидкостью, расположенный или в точке *A*, где нагретая вода выходит из теплообменника, или в некоторой точке *B* трубы для нагретой воды. Звено сравнения, или суммирующее устройство, сравнивает два приходящих сигнала — результат измерения температуры и задание — и передает их разность (управ-

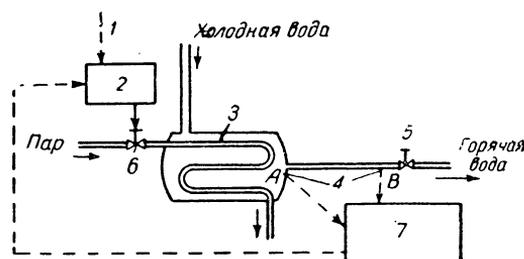


Рис. V-136. Типичный теплообменный процесс:

1 — установка; 2 — регулятор; 3 — змеевик; 4 — термометры; 5 — кран на выходе горячей воды; 6 — клапан, регулирующий поток пара; 7 — измерительный прибор и элементы обратной связи.

ляющий сигнал) регулятору, который вырабатывает регулирующее воздействие, поступающее на исполнительные элементы. Это воздействие предназначено для перемещения регулирующего органа, а следовательно, для управления регулируемым параметром. В нашем случае степень открытия клапана используется для регулирования скорости потока пара. Результатом регулирования должно быть уменьшение разности сигналов в звене сравнения, т. е. возвращение регулируемого параметра к заданному значению.

Возмущающими воздействиями могут быть любые изменения во внешних условиях или в самой системе, например: 1) изменение количества тепла, теряемого через стенки кожуха теплообменника из-за изменения

первичные датчики, кабели для передачи данных, преобразователи, регуляторы, само вычислительное устройство, а также технологическое оборудование.

Программу для вычислительного устройства с целью повышения надежности оборудования можно составить различными путями. Резкое изменение скорости потока или давления может вызвать поломку труб или клапанов; а растущее несоответствие между входящим и выходящим потоками будет служить указателем развивающейся утечки. Отказ датчика может быть замечен по внезапному изменению показания на «нули во всех разрядах» или «девятки во всех разрядах»; такие показания могут свидетельствовать также о повреждении кабелей. Отказ или нарушения в работе преобразователя можно обнаружить, подавая на вход стандартный сигнал, который, пройдя через пневмоэлектрический и аналого-цифровой преобразователи, будет сравнен с эталонным значением, хранящимся в памяти вычислительного устройства. Неисправность регулятора можно обнаружить при помощи независимого контрольного измерения регулируемой величины: если измеренная величина не находится в пределах допуска, то есть основание подозревать регулятор в неисправности.

Вычислительные устройства, установленные в настоящее время на химических производствах, имеют отличную репутацию с точки зрения надежности. Для обнаружения появляющихся все же редких неисправностей можно предпринять ряд шагов, например ответы на контрольные тесты сравнивать с заранее записанными в памяти. Вычислительное устройство может проверять результаты решения последних уравнений, сравнивая их с предыдущей группой ответов; большое расхождение будет указанием на неполадки в самом устройстве. Если такие неполадки обнаружены, то расчеты можно повторять автоматически, чтобы определить, не является ли причиной расхождения случайная ошибка. Если результаты вычислений продолжают указывать на неисправность в вычислительном устройстве, то выходные параметры процесса поддерживают на прежних значениях или возвращают на безопасный уровень. Подобные же действия предпринимают в случае прекращения подачи электроэнергии, которое прерывает работу вычислительного устройства.

Разработчики системы должны также предусмотреть взаимодействие оператора с вычислительным устройством при нормальных условиях. Чтобы оператор мог вводить данные в вычислительное устройство, последнее должно быть снабжено кнопками, переключателями, рукоятками; для величин, которые вводятся (или

выдаются) редко, иногда предусматривают перфоратор и устройство для считывания с перфоленты. Необходимы также приборы для индикации и аварийной сигнализации. Регистрирующее печатающее устройство является основным средством для записи и индикации обычных характеристик и данных процесса, в то же время другое печатающее устройство может обеспечивать запись изменений программы, специальных команд, сигналов тревоги и других редких событий.

В идеальном случае вычислительное устройство и связанная с ним аппаратура установлены в одной общей комнате, так что операторы могут держать под наблюдением всю систему.

Когда вычислительное устройство и его входные и выходные блоки изготовлены, то прежде всего надо связать входные блоки с вычислительным устройством. Проверяются характеристики преобразователей и конверторов и точно устанавливаются множители шкал для различных приборов. После выполнения этой операции вычислительное устройство проверяется с помощью обычных контрольных испытаний. Если входные — выходные блоки и вычислительное устройство работают, снова запускается контрольная программа, использующая реальные сигналы от приборов, установленных на технологическом оборудовании, но выходные блоки в это время подключаются к аналоговым индикаторным или записывающим устройствам, или к печатающему устройству. Эта проверка может продолжаться несколько недель, пока не будут внесены в схему управления изменения, обеспечивающие ее работоспособность при самых различных условиях течения процесса. Если же часть программы управления не может быть составлена без данных, которые могут быть получены только после подключения вычислительного устройства к технологическому оборудованию, то проверка может продолжаться и дольше.

Обслуживание вычислительного устройства может производиться предприятием-изготовителем по соглашению об обслуживании или персоналом, который прошел специальное обучение. Первое, пожалуй, предпочтительнее, так как изготовитель принимает на себя ответственность за обеспечение испытательной аппаратурой и запасными частями. Кроме того, так как поломки вычислительного устройства довольно редки, а характер повреждений разнообразен, следует считать, что представители завода-изготовителя, которые обслуживают много машин и, следовательно, чаще имеют дело с поломками, легче разберутся в дефектах и скорее устранят их.

ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ

ОСНОВНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В любой САР регулируемый процесс (объект) и регулирующее устройство образуют замкнутый контур. Благодаря наличию обратной связи информация о выходной величине процесса (регулируемом параметре) передается на управляющее устройство, которое регулирует процесс так, чтобы поддерживать выходную величину на любом заранее заданном уровне; поэтому такие системы часто называют системами автоматического регулирования с обратной связью. Элементы такой системы регулирования, как автоматические, так и ручные, лучше всего рассмотреть на блок-схеме обобщенной системы (рис. V-135).

Блок-схемы

Блок-схемы показывают связь между переменными параметрами системы и являются общепринятой формой иллюстрации ее поведения, отображением ее дифференциального уравнения. Они составляются по определенным правилам. Линии обозначают пути следования сигналов или потоков информации, или материала, или энергии. Кружочек — это сумматор, в котором производится сложение или вычитание входящих сигналов. Операция, которую надо осуществить, указывается с помощью математического знака у линии сигнала. Если от одной точки отходят несколько линий, это означает подачу сигнала на несколько параллельных входов без модификации сигнала. Прямоуголь-

устойчивом состоянии и испытавших затем возмущение в виде единичного ступенчатого приращения входной величины, очень наглядно изображают динамику системы.

Другое простое звено — интегрирующее. Это может быть идеальный электрический конденсатор или бак, накапливающий жидкость. Для такого случая дифференциальное уравнение имеет следующий вид:

$$C \frac{d\theta_0}{dt} = \theta_i \quad (V-14)$$

где C — емкость, а t — время. Используя операторную запись

$$D = \frac{d}{dt} \quad (V-15)$$

получим передаточную функцию:

$$G = \frac{1}{CD} \quad (V-16)$$

Рис. V-137. Кривая реакции пропорционального или усиленного звена на единичное ступенчатое изменение входной величины, происшедшее в момент времени $t = 0$.

интегрирующем (астатическом) звене для случая ступенчатого возмущения. Передаточная функция и кривая переходного процесса показывают, что это звено действует как интегратор.

В звеньях, обладающих емкостью и активным сопротивлением, переходные

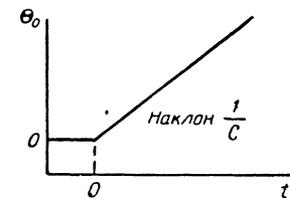


Рис. V-138. Кривая реакции астатического звена на единичное ступенчатое изменение входной величины, происшедшее в момент времени $t = 0$.

копления есть произведение емкости на скорость изменения выходной величины. Таким образом, дифференциальное уравнение можно записать:

$$\frac{1}{R} (\theta_i - \theta_0) = C \frac{d\theta_0}{dt} \quad (V-17)$$

Для получения передаточной функции его можно преобразовать:

$$G = \frac{1}{RCD + 1} \quad (V-18)$$

Произведение емкости на сопротивление, встречающееся при анализе любой системы, характеризует временное запаздывание. Это произведение называется постоянной времени, имеет размерность времени и обычно обозначается буквой T . Понятие постоянной времени и удобно и важно. Она эффективно характеризует динамику системы, исключая необходимость определять

отдельно емкость и сопротивление. Она играет существенную роль при анализе и определении характеристик звеньев. Системы с одинаковыми постоянными времени одинаково реагируют на возмущения; аналогия делается важнейшим методом для понимания динамики системы.

Рис. V-139 показывает переходные процессы RC-элемента с одной постоянной времени; три кривых отвечают трем различным по величине постоянным времени: $T_3 > T_2 > T_1$. Для случая теплообменника (рис. V-136) постоянная времени, а следовательно, и поведение системы будет меняться, если изменятся емкость

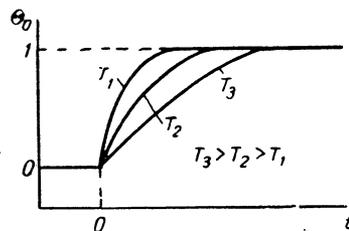


Рис. V-139. Кривые реакции звена с одной постоянной времени на единичное ступенчатое изменение входной величины, происшедшее в момент времени $t = 0$.

(объем воды в баке) или сопротивление (термическое сопротивление стенок змеевика и жидких пленок). Называя такой элемент звеном с одной постоянной времени и с сосредоточенными параметрами, мы допускаем, что теплоемкость или емкость змеевика, бака и других частей равна нулю и что вода перемешивается настолько хорошо, что температурные градиенты отсутствуют. Постоянную времени можно определить по реакции системы на типовое возмущение — скачкообразное или в виде устойчивых синусоидальных колебаний. После этого по известной постоянной времени можно предсказать реакцию системы на более сложные возмущающие воздействия.

В заключение рассмотрим еще две наиболее простые передаточные функции. Первая характеризует колебательную систему второго порядка с затуханием. Самым простым примером такой системы служит груз, подвешенный на пружине, движению которого препятствует трение, вызывая затухание колебаний. Такой вид движения чаще всего встречается в измерительных элементах систем. Он описывается дифференциальным уравнением второго порядка, из которого можно получить следующее выражение передаточной функции:

$$G = \frac{1}{T^2 D^2 + 2T\zeta D + 1} \quad (V-19)$$

в котором ζ — коэффициент затухания. Другую простую передаточную функцию можно получить для чистого запаздывания («мертвого времени»). Если обозначить чистое запаздывание через L , то

$$G = e^{-LD} \quad (V-20)$$

Эта передаточная функция может быть получена при выводе дифференциальных уравнений, описывающих звено или характеризующих его действия.

Рассмотренные передаточные функции относятся к идеальным звеньям и большинство реальных систем

температуры окружающей среды, 2) изменение давления пара, 3) изменение скорости потока воды. Возмущения удобно подразделить на два типа: по нагрузке, т. е. со стороны расхода (примеры 1 и 3) и со стороны притока (пример 2).

КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Для каждой операции существует какой-либо критерий качества. Это может быть определенное качество продукции, максимальная выгода или производительность или один из многих других параметров оценки. Задачей САР является поддержание переменных параметров на таком уровне, чтобы выходной параметр процесса находился внутри области значений, диктуемых критерием качества регулирования.

Регулируемые объекты и все звенья САР¹ обладают такими характеристиками, что восприятие изменения (сигнала) и реакция на это изменение происходят с некоторой задержкой во времени. Эти задержки не только влекут за собой запаздывание реакции звеньев системы на сигнал (изменение) входящей в звено величины, но и вызывают искажение формы сигнала, проходящего через звено. Проблема заключается в том, чтобы преодолеть вредное влияние задержек и искажений, присущих замкнутой системе регулирования, и поддерживать значение регулируемого параметра внутри желаемых пределов.

ЗАПАЗДЫВАНИЕ

Задержки в реакциях и действиях звеньев (запаздывания) возникают из-за трех свойств, которыми могут обладать звенья системы: емкость, сопротивление и большая длина линий передачи. Те звенья системы, которые обладают способностью накапливать в себе энергию или вещество (материал), именуется емкостными. Так, на рис. V-136 стенки труб змеевика и вода в баке могут накапливать энергию и, таким образом, обладать емкостью. Эта способность к накоплению и вызывает запаздывание. Например, если температура входящего в теплообменник пара увеличилась, то для передачи дополнительной тепловой энергии через змеевик воде в баке потребуются некоторое время, по истечении которого температура воды и змеевика повысится до нового значения.

Те звенья системы, которые затрудняют передачу энергии или вещества от одной емкости к другой, называются сопротивлениями. На рис. V-136 стенки труб змеевика и пленки конденсата водяного пара и воды с обеих сторон стенок препятствуют передаче тепловой энергии пара, находящегося внутри змеевика, воде, окружающей змеевик. Комбинированный эффект питания емкости через сопротивление вызывает временную задержку в передаче энергии или вещества. Такие резистивно-емкостные (RC) временные задержки часто называют емкостными или переходными запаздываниями.

Системы, имеющие одинаковое число и расположение RC-цепей, обладают одинаковыми свойствами, одинаково ведут себя в сходных условиях и одинаково поддаются автоматическому управлению. Чтобы классифицировать регулируемые объекты по числу и расположению RC-цепей необходимо допустить, что их сопротивления-емкости сосредоточены в отдельных блоках. Такое допущение при анализе называется методом сосредоточенной емкости или методом сосредоточенных пара-

метров. В некоторых объектах сопротивления и емкости распределены. Тогда они называются объектами с распределенными параметрами, и к ним должен быть применен другой метод анализа. Трубопровод с природным газом является примером распределенных емкости и сопротивления.

Третье свойство объектов и систем регулирования, которое вызывает временную задержку, это протяженность линий передачи. Для передачи сигнала из одной точки системы в другую требуется время. Например (см. рис. V-136), если понизилась температура входящей в бак воды, то пройдет некоторое время, прежде чем холодная вода пройдет бак и достигнет термометра. Эта временная задержка не вызывает замедления или запаздывания самого изменения, однако в течение определенного отрезка времени после возникновения изменения («мертвое время») звенья системы это изменение не обнаруживают. Длительность «мертвого времени» зависит как от скорости, с которой передается изменение, так и от расстояния, на которое это изменение переносится. Таким образом, на рис. V-136 «мертвое время» было бы значительно больше, если бы термометр был расположен в точке B, а не в точке A поблизости от выхода воды из бака. «Мертвое время» — это дистанционно-скоростная задержка, и оно называется чистым или транспортным запаздыванием.

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА

При анализе САР самое главное — это выявить динамику компонентов (звеньев) системы. Прежде чем применять разрабатываемую схему регулирования, надо установить, как меняется по величине выходной сигнал любого звена системы при изменении входного сигнала, какова форма переходного процесса и какое запаздывание выходного сигнала будет иметь при этом место. Для проведения такого анализа применяются математические методы.

Переходный процесс любого звена обуславливается его передаточной функцией G , которая определяется отношением выходного сигнала θ_0 к входному сигналу θ_i :

$$G = \frac{\theta_0}{\theta_i} \quad (V-12)$$

Уравнение передаточной функции обычно является дифференциальным уравнением, представляющим динамику звена. В наиболее простом случае передаточная функция представляет постоянное число; она соответствует пропорциональному (усилительному) звену:

$$G = K = \frac{\theta_0}{\theta_i} \quad (V-13)$$

Это звено нулевого порядка, так как его динамика описывается дифференциальным уравнением нулевого порядка. В таких звеньях происходит умножение сигнала без временной задержки. Коэффициент умножения K называется коэффициентом усиления звена. Чтобы избежать запаздывания, емкость звена должна быть равна нулю, а сопротивление должно быть постоянным. Примером может служить труба, через которую проходит ламинарный поток несжимаемой жидкости; здесь напор прямо пропорционален скорости течения, а величина сопротивления зависит только от трения.

Кривая реакции такого звена не единичное ступенчатое возмущение показана на рис. V-137. Кривые переходных процессов систем, находившихся вначале в

¹ Здесь речь идет об инерционных звеньях. — Прим. ред.

порядку такого звена, можно получить аналитическое выражение для построения кривой переходного процесса при единичном ступенчатом возмущении.

Уравнение

$$\theta_0 = \theta_i (1 - e^{-t/T}) \quad (V-22)$$

позволяет дать физическую интерпретацию постоянной времени. Это время, необходимое для того, чтобы выходная величина достигла 63,2% от ее нового установившегося значения θ_i , которое будет достигнуто вследствие возмущения элемента ступенчатым приращением входной величины.

Возможность автоматического регулирования системы такого типа иллюстрируется рис. V-140. Если в момент

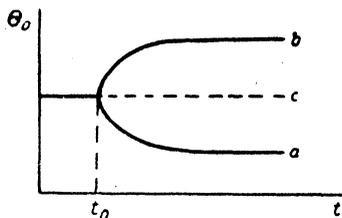


Рис. V-140. Кривые реакции звена с одной постоянной времени на ступенчатое изменение только расхода (а); только притока (b); и при одновременном изменении расхода и точном корректирующем изменении притока (с).

времени t_0 нагрузка (расход) системы резко возрастет и при этом корректирующие воздействия не будут иметь места, изменение выходной величины будет описываться кривой *a*. Аналогично, если в момент времени t_0 резко возрастает только питание (приток), то выходная величина будет изменяться, как показывает кривая *b*. Если же приток увеличивают для компенсации увеличения расхода, начиная точно в момент времени t_0 , то выходная величина остается неизменной. Итак, для системы с одной постоянной времени идеальное регулирование может исключить флуктуации выходной величины.

Рассмотрим другой тип реакции. Рис. V-141 показывает реакцию звена с двумя постоянными времени на единичное приращение входной величины. Кривая T_1 относится к звену с двумя постоянными времени, каждая из которых равна T_1 ; постоянные времени звена, реакция которого показана кривой T_2 , также равны между собой и имеют величину T_2 . Для этих звеньев переходный процесс начинается немедленно после возмущения, но скорость изменения выходной величины возрастает от нуля до максимума, а затем падает; кривая переходного процесса имеет форму буквы S. Рис. V-142 иллюстрирует реакцию системы такого типа для случая, когда расход (нагрузка) резко возрастает, а приток (питание) обеспечивает коррекцию, как это было сделано на рис. V-140 для системы с одной постоянной времени. Если увеличивается только расход, то выходная величина меняется как у звена с одной постоянной времени, что показывает кривая *a*. Но если увеличивается только приток, причем в таком размере, чтобы компенсировать увеличение расхода, то переходный процесс будет представлять собой S-образную кривую второго

порядка *b*. Таким образом, когда оба изменения происходят одновременно (кривая *c*), выходная величина не остается постоянной. По сравнению с системой первого порядка у системы, включающей звенья второго порядка с двумя постоянными времени, выходная ве-

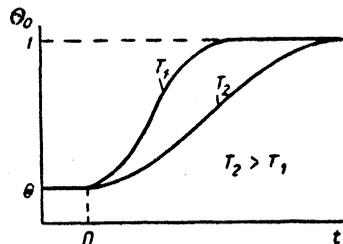


Рис. V-141. Кривые реакции звена с двумя постоянными времени на единичное ступенчатое изменение входной величины в момент времени $t=0$, показывающие влияние величины постоянной времени T на временное запаздывание звена.

личина изменяется в течение значительного времени после внезапного увеличения расхода, несмотря на то, что корректирующее изменение притока возникает немедленно. Таково главное различие в результате автоматического регулирования реальных систем с большим числом постоянных времени по сравнению с идеальной системой первого порядка.

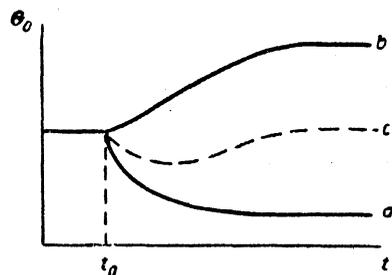


Рис. V-142. Кривые реакции звена с двумя постоянными времени на ступенчатое изменение только расхода (а); только притока (b); и при одновременном изменении расхода и точном корректирующем изменении притока (с).

Кривые переходных процессов для звеньев с несколькими одинаковыми постоянными времени при воздействии единичного ступенчатого возмущения на входе (рис. V-143) имеют ту же самую S-образную форму, как и у звена с двумя постоянными времени (рис. V-141), но запаздывание возрастает с увеличением порядка звена (или, что то же самое, числа постоянных времени).

Действие чистого запаздывания на элемент с большим числом постоянных времени показан на рис. V-144.

описывается ими недостаточно удовлетворительно. Лишь у очень немногих звеньев сопротивление или емкость имеют нулевые значения, и реальную систему с одной постоянной времени очень трудно построить. Хотя допущения о сосредоточенности параметров (например, об отсутствии градиентов температуры в баке теплообменника) и удобны, но обычно их следует рассматривать лишь как аппроксимации. Тем не менее эти простые передаточные функции очень полезны при анализе реальных систем.

Вывод точных дифференциальных уравнений, описывающих динамику реальных систем, может быть весьма затруднительным, а во многих случаях просто невозможным, или же уравнения могут оказаться настолько сложными, что решение их, даже с аппроксимацией, слишком громоздко. Часто сложный процесс можно разбить на группы простых процессов, объединенных в последовательные или параллельные цепи. Если передаточные функции простых процессов известны, то с помощью алгебраических действий можно найти передаточную функцию цепи. Если в цепи два элемента включены последовательно, передаточная функция цепи находится как произведение передаточных функций элементов, а если параллельно, то их передаточные функции складываются. Используя эти закономерности, можно получить уравнения большей части реальных систем. Например, теплообменник (рис. V-136) может рассматриваться как система второго порядка с двумя постоянными времени, при этом теплоемкость змеевика принимается за вторую емкость, а две пленки жидкости за два сопротивления. Передаточная функция системы будет определяться произведением двух передаточных функций, каждая из которых имеет постоянную времени:

$$G = G_1 G_2 = \frac{1}{(T_1 D + 1)(T_2 D + 1)} \quad (V-21)$$

где T_1 — постоянная времени нагревания стенок змеевика, а T_2 — нагревания воды.

Вывод дифференциального уравнения — только первый шаг выявления динамических свойств системы; для того чтобы определить, как реагирует система на возмущения, надо решить это уравнение. Однако для некоторых систем и входных величин решение не может быть получено.

Для облегчения задачи уравнения САР обычно линеаризуют. При этом сложное дифференциальное уравнение сводится к обычному линейному дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами; ни один из входящих в уравнение коэффициентов (например, постоянная времени) не должен быть функцией каких-либо переменных. При ограничении диапазона изменения значения переменных такая аппроксимация является вполне обоснованной. Ограничения могут соответствовать или всей интересующей нас области или небольшой ее части; в последнем случае полученное решение пригодно только для выбранного значения переменных. Такой метод является основным для теории автоматического регулирования и представляет собой очень удобный инструмент, так как дает решения, пригодность которых неоднократно проверялась на практике.

В тех случаях, когда осуществить линеаризацию трудно, следует более широко применять теорию автоматического регулирования нелинейных систем.

Элементы нелинейности можно обнаружить во всех звеньях; они служат причиной двух видов искажений реакции системы: из-за изменения коэффициента усиле-

ния элемента и из-за изменения реакции во времени (запаздывания). Сопротивление потоку, протекающему через трубу, зависит от скорости; эта зависимость нелинейна. Коэффициент теплопередачи в теплообменнике зависит от скорости потока жидкости; таким образом, постоянная времени и запаздывание являются функциями скорости передачи тепла, так же как и «мертвое время» в случае, показанном на рис. V-136, при расположении термометра в точке В, когда транспортное запаздывание зависит от скорости жидкости. Очень многие системы оказываются линейными при более строгом рассмотрении; даже электрическое сопротивление меняет свою величину в зависимости от температуры, а следовательно, и от нагрузки, которая вызывает нагревание. Но в ограниченном диапазоне изменения переменных все системы могут быть достаточно успешно линеаризованы, что обеспечивает определенную точность результатов.

Другим типом упрощения, применяемым при анализе динамики систем, является метод упрощения сложной системы другой, более простой. Если из двух постоянных времени в системе одна во много раз больше другой, то влияние первой и будет в основном определять реакцию системы, так что второй можно пренебречь и описать систему уравнением первого порядка. В теплообменнике часто теплоемкость большого количества воды является определяющим фактором, тогда как теплом, расходующимся на нагрев змеевика, можно пренебречь, и динамика системы достаточно хорошо описывается уравнением (V-18) вместо более сложного уравнения (V-21). Реакция любой системы с большим количеством постоянных времени не отличается по форме от реакции системы с двумя постоянными времени, что открывает возможности упрощения уравнений. Кроме того, поведение любой комплексной системы (т. е. состоящей из нескольких инерционных звеньев) достаточно точно аппроксимируется поведением системы с одной постоянной времени и чистым запаздыванием.

Отсюда видно, что простые системы с простыми передаточными функциями полезны как при решении задач синтеза передаточных функций более сложных систем, так и в качестве упрощенных моделей для изучения поведения более сложных систем в некоторой ограниченной области значений переменных.

РЕАКЦИЯ СИСТЕМ

Многое можно узнать о динамике систем при изучении реакций их звеньев на систематические, происходящие в реальных условиях изменения входных переменных. Внесение возмущения в виде единичного ступенчатого изменения входной величины элемента, до этого находившегося в установившемся режиме, является наиболее распространенным методом исследования, дающим наибольшую информацию о динамике элемента. Для простых звеньев, кривые реакции которых изображены на рис. V-137—V-139, решив уравнения их передаточных функций, можно получить аналитическое выражение для формы переходного процесса. Для более сложных систем это сделать трудно или чересчур утомительно. Кривые переходных процессов таких систем получают экспериментально или путем аппроксимации.

На рис. V-139 изображены кривые переходного процесса звена с одной постоянной времени. В таком звене выходная величина начинает изменяться немедленно после появления входного сигнала; первоначальная скорость реакции максимальна, затем она падает. Решив дифференциальное уравнение (V-17), описывающее ди-

духа является, возможно, наиболее общепринятым передающим средством, но используются и другие, особенно электрические сигналы и механические звенья.

Наконец, должен быть воспринимающий элемент в самом регуляторе. Он принимает переданный от датчика сигнал и преобразует его в запись на диаграмме или показания шкалы, а также вырабатывает соответствующий сигнал для звена сравнения.

Звено сравнения должно иметь, во-первых, приемное устройство для введения задания (уставки) и, во-вторых, приспособления для сравнения сигнала (обратной связи) о величине регулируемого параметра с заданием и передачи их разности (сигнала ошибки) в вычислительное устройство. Для этих целей применяются различные приборы, устройство которых зависит от вида используемых сигналов.

В часто употребляемых пневматических системах функции сравнения осуществляют пневматические дроссели типа «сопло — заслонка» или силфоны.

Анализ и вычисления определяют качество регулирования. Вычислительное устройство, основываясь на информации, которую оно получает, определяет сумму необходимых поправок и способ их введения. Запаздывания обоих типов (RC и чистое) могут иметь место во всех звеньях регулятора, так же как и в самом процессе; временные задержки могут возникать между моментом изменения какого-либо параметра и моментом восприятия регулятором информации об этом изменении и о его величине, а также между моментом выдачи регулятором корректирующего сигнала и моментом, когда процесс отреагирует на это. Вид корректирующего воздействия также определяет качество регулирования. При ручном регулировании оператор осваивает на опыте оптимальный способ введения корректирующих воздействий для поддержания выходной величины на заданном уровне. При автоматическом регулировании эту функцию выполняет вычислительное устройство.

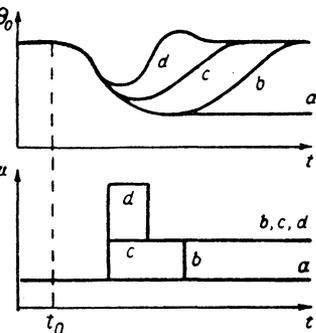


Рис. V-146. Кривые реакции регулятора на уменьшение времени задержки при обычной и избыточной коррекции процесса с большим количеством постоянных времени и ступенчатом возрастании нагрузки (μ — положение исполнительного регулирующего органа):

a — без коррекции; *b* — точная коррекция с большой задержкой; *c* — точная коррекция с маленькой задержкой; *d* — избыточная коррекция с такой же задержкой, как в случае *c*.

Рис. V-146 иллюстрирует возможность повышения качества регулирования простым изменением корректирующих воздействий. Кривые переходных процессов идеализированы и служат только для иллюстрации принципа. В момент времени t_0 нагрузка процесса¹ увеличивается скачком. Если не предпринять никаких коррекций, то выходная величина процесса примет новое установившееся значение благодаря наличию положительного самовыравнивания, как показывает кривая *a*. Если в связи с задержкой времени коррекция предпри-

нимается лишь после того, как было достигнуто новое значение выходной величины, то переходный процесс (в случае, когда коррекция идеально точная) пойдет по кривой *b*. Управляющее воздействие с большим запаздыванием нельзя считать удовлетворительным, так как слишком велико отклонение регулируемого параметра θ_0 и слишком длительно существование этого отклонения. Если регулятор может ввести коррекцию с малой задержкой, когда регулируемый параметр θ_0 только начал изменяться, и если вычислительная им коррекция этого отклонения достаточно точна, то переходный процесс пойдет по кривой *c*. Так как временные задержки всегда имеют место, то коррекция не может быть введена сразу же, как только начнет изменяться регулируемый параметр (выходная величина). Но если задержка невелика, то переходный процесс характеризуется более быстрым восстановлением исходного значения θ_0 и меньшим отклонением от него по сравнению с кривой *b*. Можно еще быстрее восстановить начальное значение регулируемого параметра и уменьшить отклонение, применив избыточную коррекцию; ход процесса в этом случае показывает кривая *d*. При такой коррекции переходный процесс может стать колебательным, но если избыточность не слишком велика, то это можно предотвратить.

Приведенный пример показывает, что избыточная коррекция может придавать желаемые качества реакции регулятора, пока процесс не перестанет быть стабильным. Избыточная коррекция как бы уменьшает временные задержки, частично компенсирует потерю времени вследствие запаздывания. Избыточная коррекция, таким образом, частично решает проблему автоматического управления процессом, имеющим значительные запаздывания. Но этот метод неприменим в объектах с малыми емкостями, например, в большинстве систем, регулирующих скорость потока.

При надлежащем выборе вида управления и при правильной настройке системы, когда задачи вычислительного устройства уже четко определены, высокие качества переходного процесса могут быть обеспечены любой системой управления. Было разработано несколько условных видов регулирования, которые дают хорошие показатели качества регулирования почти для любого процесса и используются во всех стандартных регуляторах.

Оконечный регулирующий орган управляет величиной регулируемой переменной. Его конструкция зависит от физической природы сигнала, приходящего от вычислительного устройства. Он чаще располагается у исполнительного двигателя (для быстрой и точной регулировки), чем непосредственно у источника сигнала ошибки. Дело в том, что сигналы ошибки часто очень слабы, так как звено сравнения или детектор ошибки могут выдавать сигналы большой мощности только за счет уменьшения чувствительности или точности измерения. Поэтому большинство регуляторов содержат один или два каскада усиления для увеличения мощности сигнала ошибки.

Некоторые системы управления получают необходимую для управления мощность от регулируемой среды. Такие системы называют регуляторами прямого действия. Системы, которые используют вдобавок к этому вспомогательные источники энергии, называют регуляторами непрямого действия. Дополнительная мощность может быть введена в любой удобной точке системы, например в измерительные средства, в детектор ошибки или непосредственно в усилитель.

Анализ САР может показать, что запаздывания звеньев системы оказались весьма существенными,

¹ Имеется в виду нагрузка регулируемого объекта. — Прим. ред.

Реакция на ступенчатое изменение входной величины в момент t_0 задерживается на время чистого запаздывания L , но других изменений в реакции не про-

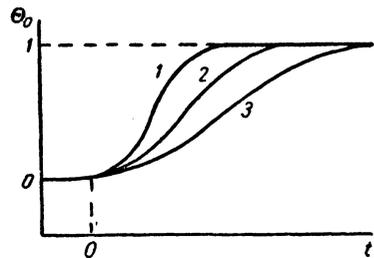


Рис. V-143. Кривые реакции звеньев с большим числом постоянных времени на единичное ступенчатое изменение входной величины:

1 — звено с двумя постоянными времени; 2 — с тремя; 3 — с четырьмя.

исходит. Временную задержку может вызывать любой элемент системы, но по определению, чистое запазды-

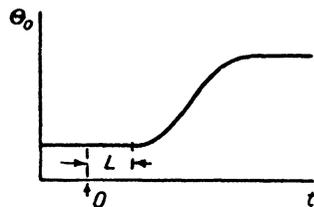


Рис. V-144. Влияние чистого запаздывания L на реакцию звена с большим числом постоянных времени при единичном ступенчатом воздействии на входе в момент t_0 .

вание — это время, которое должно пройти прежде, чем система начинает реагировать на изменение входного сигнала.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РЕГУЛИРУЕМОСТЬ ПРОЦЕССОВ

Некоторые процессы имеют тенденцию самостоятельного восстанавливать равновесие, если течение процесса нарушено каким-либо возмущением. Такое свойство носит название самовыравнивания, и объекты, которые проявляют это свойство, называют объектами с положительным самовыравниванием. Уровень жидкости в баке А (рис. V-145) зависит от величины притока и при неизменности последнего не меняется. Если же изменяется скорость поступления жидкости, меняется и уровень, который принимает новое установившееся значение. Изменение уровня приводит к новому устойчивому состоянию равновесия, так как скорость истечения жидкости (расход) также определяется высотой столба жидкости, т. е. уровнем или напором. Пределы изменения уровня, внутри которых еще происходит самовыравнивание, естественно, ограничены объемом бака.

Противоположными свойствами характеризуется бак В, который не обладает самовыравниванием (или, как

говорят, имеет нулевую степень самовыравнивания). Здесь устойчивое состояние имеет место только при одной скорости подачи жидкости. При любой другой величине притока (но при постоянной скорости откачки насосом) бак или опустеет, или переполнится. Возможно и отрицательное самовыравнивание, при котором реакция процесса на возмущение вызывает неограниченное и нарастающее увеличение разбаланса. Степень (или коэффициент) самовыравнивания является весьма важным показателем регулируемого объекта, и его неблагоприятное значение может затруднить создание надежной САР или даже сделать решение этой задачи невозможным из-за длительности переходного процесса или из-за плохой стабильности системы.

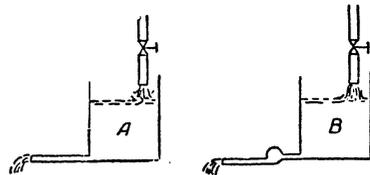


Рис. V-145. Баки, наполняемые жидкостью:

А — с положительным самовыравниванием; В — с нулевой степенью самовыравнивания (производительность насоса у бака В постоянная).

Число независимых автоматических регуляторов, которое может быть применено к какому-либо процессу, ограничено свойствами этого процесса. Состояние процесса является определенным в том случае, если все его степени свободы зафиксированы или регулируются. Излишние регуляторы могут привести к нарушению работы системы. Число степеней свободы процесса равно общему количеству переменных минус количество независимых переменных, связанных с другими переменными с помощью уравнений. Число степеней свободы определяет максимальное количество регуляторов, которое может быть применено; в большинстве реальных случаев их устанавливают меньше.

ФУНКЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА

Существуют определенные показатели приемлемого качества процесса, и проблема автоматического регулирования заключается в том, чтобы, несмотря на временные задержки и искажения сигнала, поддерживать течение процесса в заранее заданных пределах. Для этого регулятор должен осуществлять четыре первичные функции: 1) измерение какой-либо характеристики выходной величины процесса, 2) сравнение измеренной величины с желаемым значением или заданием (уставкой), 3) анализ сигнала ошибки и выработка соответствующего корректирующего воздействия и, наконец, 4) управление, т. е. изменение величины регулирующей переменной процесса.

Измерительные средства регулятора в первую очередь составляют чувствительные или первичные элементы. Виды измерений, которые производятся с их помощью, и различные приборы, которые служат для этих целей, не так легко перечислить. Существует множество стандартных датчиков и методов, и непрерывно создается и развивается новая техника.

Сигнал от датчика должен быть доставлен к регулятору с помощью передающих средств. Давление воз-

Другое свойство системы двухпозиционного регулирования можно обнаружить, рассматривая работу системы при изменении нагрузки (рис. V-149). Если нагрузка уменьшается, то регулирующий орган большую часть времени находится в положении «выключено». В результате среднее значение выходной величины сме-

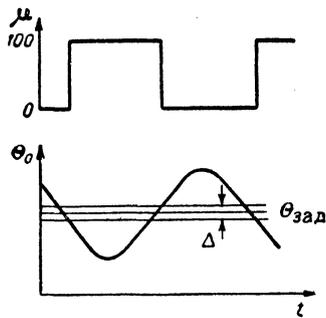


Рис. V-148. Работа двухпозиционного регулятора с зоной нечувствительности Δ .

щается в сторону уменьшения по отношению к заданному, которое ранее находилось посередине нейтральной зоны.

Двухпозиционное регулирование можно считать грубым, так как оно не может обеспечить высокое качество работы системы из-за неизбежных колебаний и

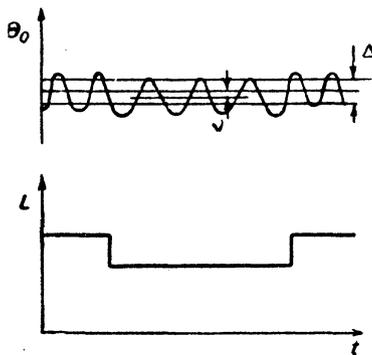


Рис. V-149. Влияние изменения нагрузки на процесс двухпозиционного регулирования при наличии зоны нечувствительности Δ . L — нагрузка; ν — статическая ошибка.

возможных отклонений от заданного значения. Поведение регулятора не зависит от величины сигнала ошибки.

При многопозиционном регулировании регулирующий орган может занимать одно из трех и более положений, соответствующих заранее заданным значениям регулируемой величины. По сравнению с двухпозиционным регулированием такое регулирование дает несколько лучшие результаты благодаря менее «грубому» воздействию, но все равно этот метод не позволяет осуществить точного регулирования; кроме того, регулируемая величина по-прежнему колеблется около среднего значения, часто отличающегося от заданного.

Можно использовать для управления не все возможное перемещение регулирующего органа, а его небольшую часть. В этом случае регулирование осуществляется более плавно, так как управляющая переменная меняется в меньших пределах и никогда не доходит до положения «полностью выключено». Однако и при таком регулировании не во всех случаях достигается точная коррекция.

При регулировании методом «среднего положения»¹ регулируемая переменная поддерживается в известных пределах благодаря тому, что среднее время нахождения регулирующего органа в положении «открыто» определяется значением регулируемой переменной. Если она выходит из заданных пределов, то регулирующий орган остается в соответствующем крайнем положении.

Двухпозиционное регулирование и его модификации часто применяются в силу дешевизны, простоты и удобства в эксплуатации. Они применяются как в домашних установках (печи, водогреи, различные приборы), так и в промышленных (установки для кондиционирования воздуха, рефрижераторы). Но часто относительно медленная реакция, колебательность процесса регулирования или большие отклонения регулируемой величины приводят к низкому качеству регулирования. В других случаях, особенно когда процесс характеризуется высокими скоростями и существенными временными задержками в отдельных звеньях системы, двухпозиционное регулирование не может обеспечить поддержание регулируемого параметра в заданных пределах.

Функциональные виды автоматического регулирования

Большинство САР основано на использовании одного или нескольких из трех наиболее характерных видов регулирования. В отличие от двухпозиционного регулирования, при этом выходная величина (регулирующее воздействие), во-первых, является функцией сигнала ошибки и, во-вторых, меняется плавно в зависимости от изменений регулируемой переменной. Сюда относятся следующие виды регулирования:

- 1) пропорциональное или статическое² регулирование (регулирование по отклонению);
- 2) интегральное или астатическое регулирование;
- 3) регулирование по производной или по скорости изменения регулируемой переменной.

Первое название для каждого вида регулирования указывает на функциональную зависимость между выходной величиной и сигналом ошибки.

Обычно рассматривают три типа входных сигналов (возмущений): 1) скачкообразный — входная величина скачком переходит в новое, устойчивое состояние; 2) линейно нарастающий — входная величина увеличивается с постоянной скоростью и 3) устойчивый сигнал синусоидальной формы. В первых двух случаях нас интересует переходный процесс изменения выходной величины, так как он показывает, насколько надежно и каким образом выходная величина вновь принимает устойчивое значение. В случае синусоидального входа изучается колебательная реакция системы, которая

¹ Методом «среднего положения» (average-position) авторы называют регулирование прерывистого действия (импульсное) с изменением длительности регулирующего импульсов в зависимости от величины отклонения регулируемой переменной (широотно-импульсная модуляция). — *Прим. ред.*

² Авторы употребляют термин «дрессельное (throttling) регулирование», не применяемый в СССР к пропорциональному регулированию. — *Прим. ред.*

особенно если речь идет о высокоскоростных процессах в охваченных обратной связью системах. В регуляторах временные задержки могут возникать из-за наличия инерционных звеньев и за счет чистого запаздывания.

Временные задержки, представляющие собой следствие наличия RC-пар, могут возникать в измерительных устройствах. Выходная величина (регулируемый параметр) должна подаваться на чувствительный элемент, чтобы вызвать измерительный сигнал, и при этом она должна преодолеть сопротивление и заполнить емкость элемента. Например, термометр обладает сопротивлением, которое оказывается потоку тепловой энергии, потребной для подъема температуры стекла и ртути; в манометре воздух, который поступает в трубку Бурдона, приходится преодолевать пневматическое сопротивление. Если не принимать во внимание эти обстоятельства при расчете и использовании измерительного устройства, то может оказаться, что его постоянная времени существенно велика по сравнению с постоянными времени самого процесса. Экраны и другие защитные приспособления могут вызывать значительное увеличение сопротивления и должны учитываться при проектировании системы.

Значительные задержки могут иметь место при передаче сигналов, особенно в случае длинных пневматических (импульсных) линий, в которых сопротивление и емкость велики. Использование электрических сигналов, хотя и приводит к уменьшению запаздывания, но имеет свои недостатки.

Постоянные времени детектора ошибки, вычислительного устройства, усилителей обычно достаточно малы, чтобы ими можно было пренебречь. Тем не менее они могут вызывать чистое запаздывание из-за трения в узлах, плохой подгонки частей и зазоров в электрических контактах.

Временные задержки в оконечном регулирующем органе могут вызываться сопротивлением трения и физической инерцией, а также дефектами механизмов вроде люфта шестерен или износа движущихся частей. В регулярном и внимательном уходе нуждаются все узлы системы, но этот особенно.

ВИДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ (ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ)

Существенной характеристикой любой САР является вид регулирования или характер действий, которые осуществляются по команде вычислительного устройства в ответ на сигнал ошибки или на отклонение регулируемой величины от заданного значения. Как указывалось выше, при применении избыточной коррекции отклонение выходной величины и его продолжительность могут быть минимизированы. Но несоответствие по величине и длительности коррекции может привести к нежелательным последствиям, а именно: 1) к большому и длительному отклонению выходной величины от заданного значения; 2) к непрерывному увеличению отклонения или 3) к колебаниям регулируемой величины, которые могут совершаться до тех пор, пока их не ограничит какой-либо внешний фактор или не выйдет из строя какое-либо оборудование. По виду реакции на возмущение регулируемые системы можно разделить на два класса: стабильные и нестабильные. В стабильных системах следствия возмущения затухают со временем, а в нестабильных увеличиваются до тех пор, пока не будут достигнуты ограничивающие пределы или не произойдет поломка. Естественно, бывают различные степени стабильности; их различают по тому, как быстро

система возвращается к равновесному состоянию. При надлежащем выборе вида управления и правильной настройке регулятора стабильность системы может быть обеспечена и переходный процесс может быть сделан достаточно кратковременным.

Разработано несколько основных видов регулирования, которые рассматриваются как типовые действия регуляторов.

Двухпозиционное регулирование

Простейшим и, возможно, наиболее распространенным видом регулирования является двухпозиционное, или регулирование по принципу «включено — выключено». Вычислительное устройство изменяет регулирующее воздействие, перемещая регулирующий орган из одного крайнего положения в другое в зависимости от того,

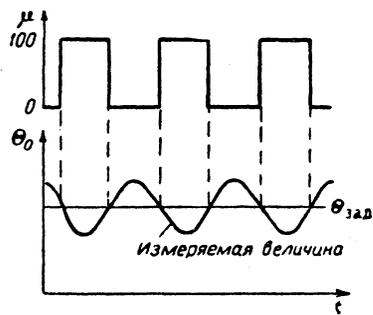


Рис. V-147. Работа двухпозиционного регулятора без зоны нечувствительности (μ — перемещение регулирующего органа в % от полной величины его перемещения).

ниже или выше заданного значения измеренная выходная величина. Рис. V-147 показывает процесс, управляемый идеальным регулятором такого типа. Если регулируемая переменная θ_0 уменьшает свое значение по сравнению с заданным, то регулирующий орган перемещается на максимум ($\mu=100\%$); он устанавливается на ноль, как только регулируемая переменная станет больше заданного значения. Указанные на рисунке колебания являются результатом наличия у реальных систем RC цепей. Чем меньше постоянные времени, тем быстрее система реагирует на изменение регулируемого параметра, амплитуда колебаний уменьшается, но частота регулирующих воздействий также должна увеличиваться. Все двухпозиционные регуляторы работают таким образом. Но бывает, что в небольшом интервале изменения регулируемого параметра, называемом нейтральной зоной, регулирующее воздействие не меняется и только после перехода регулируемого параметра через границу нейтральной зоны регулирующий орган перемещается из положения «включено» в положение «выключено» или наоборот. Это иллюстрирует рис. V-148 для системы такого типа. Регулирующий орган не включается, пока не достигнут нижний предел нейтральной зоны, и не выключается, пока не достигнут верхний предел. Амплитуда колебаний регулируемого параметра увеличивается, но это с избытком компенсируется уменьшением износа механизмов за счет снижения частоты операций управления.

где f — возвратная¹ скорость; она имеет размерность, обратную времени. Скорость, с которой изменяется выходная величина регулятора, находится так:

$$\frac{d\mu}{dt} = fE \quad (V-26)$$

Следовательно, здесь регулирующее воздействие зависит от величины ошибки. К тому же, что особенно важно, из уравнения (V-25) следует, что регулятор продолжает вводить коррекцию до тех пор, пока сигнал ошибки не будет сведен к нулю. Интегральное регулирование является уникальным в этом смысле, оно может производить точную коррекцию для любых возмущений или изменений нагрузки и приводить значение регулируемой переменной к ее заданной величине.

Передаточная функция интегрального регулятора равна:

$$G = \frac{f}{D} = \frac{1}{T_i D} \quad (V-27)$$

где $T_i = 1/f$ — время сервопривода², величина, обратная возвратной скорости, D — оператор дифференцирования.

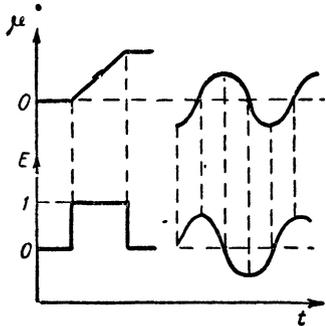


Рис. V-153. Реакция интегрального регулятора на скачкообразное и синусоидальное возмущения.

Рис. V-153 показывает переходные процессы при использовании интегрального регулятора как реакцию на единичное ступенчатое возмущение и синусоидальный входной сигнал. Для этого вида регулирования реакция на скачкообразное возмущение представляет собой непрерывное увеличение выходной величины с постоянной скоростью до тех пор, пока сигнал ошибки не превратится в нуль. Величина выходного сигнала при нулевой ошибке не является постоянной и зависит от нагрузки и от возмущений, имевших место при регулировании процесса. Реакция регулятора на синусоидальное возмущение — синусоида со сдвигом по фазе на -90° , или 90° -ным фазовым отставанием. Амплитудный коэффициент уменьшается с увеличением частоты входной синусоиды.

Интегральное регулирование может быть использовано для управления процессами в тех случаях, когда

временные задержки в системе невелики, объект быстро реагирует на возмущения, а изменения нагрузки небольшие и происходят не часто. Переходный процесс при таком регулировании протекает медленнее, чем при других его видах, и если возмущения велики или резки, то ошибка не возвращается к нулю долгое время. Обычно такое регулирование комбинируют с другими видами, чтобы ускорить переходный процесс, но сохранить свойство регулятора приводить статическую ошибку к нулю. Скорость реакции интегрального регулятора можно увеличить, повысив возвратную скорость, но опять-таки это вызывает незатухающие колебания.

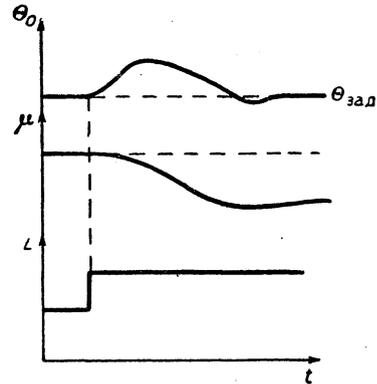


Рис. V-154. Изменение выходной величины при регулировании с помощью интегрального регулятора и при возмущении резким увеличением нагрузки.

Рис. V-154 иллюстрирует применение интегрального регулирования.

В некоторых модификациях позиционных регуляторов используется одно- или многоскоростное астатическое регулирование. Скорость изменения выходной величины не пропорциональна сигналу ошибки, а имеет одно или несколько фиксированных значений¹. В первом случае при отклонении регулируемой величины от точки регулирования выходная величина регулятора меняется с постоянной скоростью вне зависимости от величины сигнала ошибки. При многоскоростном регулировании имеется несколько фиксированных скоростей, каждая из которых соответствует определенному диапазону сигналов ошибки. В общем случае такие регуляторы имеют нейтральную зону, т. е. некоторую область значений сигнала ошибки около заданного значения регулируемой переменной, в которой положение регулирующего органа не меняется, как в нейтральной зоне двухпозиционных регуляторов. Рис. V-155 показывает соотношение между сигналом ошибки и скоростью изменения выходного сигнала у многоскоростного регулятора с нейтральной зоной.

Регулирование по производной. При регулировании по производной выходная величина пропорциональна производной от входного сигнала ошибки:

$$\mu = T_p \frac{dE}{dt} + \mu_0 \quad (V-28)$$

¹ Речь идет о позиционных (релейных) регуляторах с постоянной скоростью регулирующего органа. — Прим. ред.

¹ В отечественной литературе для обозначения понятия «возвратная скорость» (reset gate) иногда применяется термин «приведенная скорость регулирования». — Прим. ред.

² Величина T_i — время, в течение которого регулирующий орган перемещается из одного крайнего положения в другое при $E = 100\%$. — Прим. ред.

обычно называется частотной реакцией. Во всех случаях поведение системы характеризуется задержкой сигнала и его усилением. Для синусоидального входа эти величины приобретают специфическую форму. Выходная величина линейной системы представляет собой синусоиду с частотой, равной частоте входной синусоиды; отношение их амплитуд называется амплитудным коэффициентом, а смещение во времени выходной синусоиды по отношению к входной, измеремое обычно в градусах или в радианах вместо единиц времени, называется смещением по фазе (сдвигом фазы).

Пропорциональное регулирование. При пропорциональном регулировании выходная величина регулятора пропорциональна входному сигналу, или сигналу ошибки. Математически это может быть выражено так:

$$\mu = \frac{1}{b} E + \mu_0 \quad (V-23)$$

где μ — выходная величина регулятора; E — сигнал ошибки; b — пределы пропорциональности или пределы дросселирования¹; μ_0 — сигнал регулятора при $E = 0$. Зона или пределы пропорциональности представляет собой величину изменения регулируемой переменной, необходимую для стопроцентного изменения величины выходного сигнала (обычно она измеряется в процентах от наибольшего изменения входной величины). В реальных регуляторах пределы пропорциональности могут составлять от 1 до 400 и более процентов.

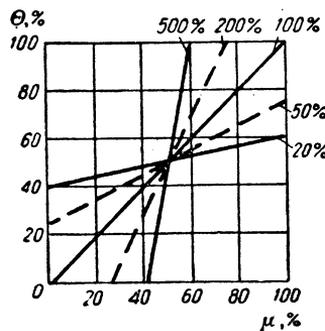


Рис. V-150. Зависимости между выходом регулятора и значением регулируемой переменной для различных величин пределов пропорциональности b (от 20 до 500%); $\theta = E$.

Рис. V-150 иллюстрирует понятие «зона пропорциональности». Пропорциональное регулирование можно характеризовать также с помощью коэффициента усиления или чувствительности K_y величины, обратной пределам пропорциональности b . Передаточная функция для пропорционального регулирования:

$$G = \frac{1}{b} = K_y \quad (V-24)$$

Рис. V-151 показывает реакцию пропорционального регулятора на ступенчатое возмущение и на синусоидальный входной сигнал. Регулятор немедленно реагирует на ступенчатое возмущение и усиливает сигнал в $1/D$ или K_y раз. Сдвиг фазы равен нулю, т. е. выходная синусоида следует за входной без всякой задержки, а амплитудный коэффициент равен $1/b$ или K_y .

Два момента, заслуживающие внимания, можно обнаружить с помощью рис. V-151. Во-первых, выходной сигнал меняется только при изменении входного, и, во-вторых, выходной сигнал может изменяться от своего начального значения μ_0 только после сигнала ошибки; другими словами, корректирующих воздействий нет, по-

ка нет отклонения регулируемой переменной от заданного значения. Поэтому по окончании процесса регулирования возникает остаточное отклонение или статическая ошибка, если у объекта, управляемого пропорциональным регулятором, меняется нагрузка. Регулятор обеспечивает точную коррекцию (без статической ошибки) только при каком-то одном значении нагрузки. Многие регуляторы снабжены ручным задатчиком для изменения уставки, но если нагрузка меняется часто, то нет смысла вводить такую ручную корректировку регулятора.

В итоге можно сказать, что пропорциональное регулирование обеспечивает хорошие переходные характеристики и может стабилизировать процесс, имеющий характерные временные задержки; в таких случаях оно широко используется. Но при изменении нагрузки возникает статическая ошибка выходной величины, так что эти изменения должны быть малы и редки. Ошибку можно уменьшить, ограничивая зону пропорциональности или увеличивая коэффициент усиления, но тогда возникают нежелательные незатухающие колебания вы-

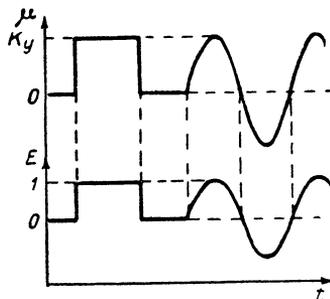


Рис. V-151. Реакция статического регулятора на ступенчатое и синусоидальное возмущения.

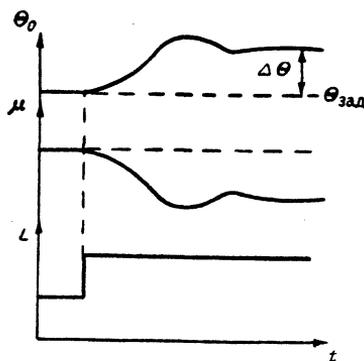


Рис. V-152. Переходный процесс в системе со статическим регулятором при внезапном увеличении нагрузки L ($\Delta\theta$ — остаточное отклонение или статическая ошибка).

ходной величины. Рис. V-152 показывает переходный процесс при использовании пропорционального регулятора в случае внезапного изменения нагрузки.

Интегральное регулирование. Выходной сигнал интегрального регулятора пропорционален интегралу от отклонения входной величины (или от сигнала ошибки) за время его существования. Математически выходная величина выражается так:

$$\mu = \int E dt + \mu_0 \quad (V-25)$$

¹ В СССР вместо термина «пределы дросселирования» (throttling range) принят термин «степень неравномерности». — Прим. ред.

мени, в течение которого выходной сигнал регулятора за счет астатической составляющей удвоится (т. е. астатическая составляющая окажется равной пропорциональной составляющей K_y).

Рис. V-158 показывает поведение системы, управляемой изодромным регулятором. На рисунке даны астатическая и пропорциональная составляющие, а также

результатирующее корректирующее воздействие регулятора при ступенчатом изменении нагрузки; здесь же приведен график изменения регулируемой выходной величины (температуры). Если нагрузка меняется мало и запаздывания невелики, такое регулирование дает хорошие результаты. Интегральное регулирование дает точную коррекцию для всех изменений нагрузки и исключает статическую ошибку, но не способствует стабильности системы.

Управлению процессом с помощью интегрального регулятора присущ один недостаток: после возвращения к заданному значению регулируемая переменная переходит через это значение и отклоняется в противоположную сторону. Вначале сигнал ошибки велик, так что интегральный регулятор вырабатывает значительную коррекцию, которая начинает уменьшаться лишь после того, как сигнал ошибки изменит свой знак. В этом проявляется запаздывание реакции при интегральном регулировании. Для уменьшения вредного влияния этого эффекта, который проявляется тем сильнее, чем больше сигнал ошибки, были разработаны соответствующие средства. В этом аспекте удачна комбинация с использованием регулирования по производной, так как выходной сигнал регулятора опережает сигнал ошибки и, следовательно, устраняет последствия запаздывания.

Регулирование по отклонению и производной. Эта комбинация применяется не так широко, как другие. Добавочное регулирование с его характеристикой, обеспечивающей быструю реакцию и предупреждение отклонения, делает возможным управление процессами с быстро меняющейся нагрузкой и большими временными запаздываниями. Регулирование по производной предотвращает большие отклонения регулируемой величины, а совместно с пропорциональным регулированием содействует увеличению стабильности системы, но при этом появляется остаточное отклонение. Поэтому такой вариант может быть использован только в тех случаях, когда допускается статическая ошибка регулирования. Регулирование по производной снижает продолжительность отклонений регулируемой величины.

Работа комбинированного регулятора показана на рис. V-159. Реакция регулятора на изменяющуюся с постоянной скоростью регулируемую величину представ-

лена суммой реакций каждого из видов регулирования в отдельности. Суммарное регулирование действует так же, как и пропорциональное, но с упреждением по времени. Это смещение называется временем упреждения или предварения. Рисунок выполнен в предпо-

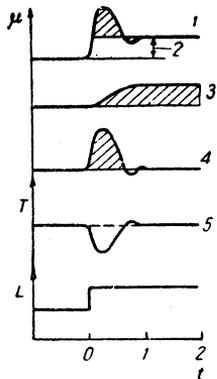


Рис. V-158. Зависимость между выходом регулятора и регулируемой переменной в случае скачкообразного увеличения нагрузки при управлении процессом с помощью изодромного регулятора (с воздействием по отклонению и интегралу):

1 — результирующая коррекция положения клапана; 2 — точная коррекция; 3 — астатическая составляющая, пропорциональная скорости; 4 — пропорциональная составляющая; 5 — заданное значение; μ — положение клапана; T — температура; L — нагрузка; t — время.

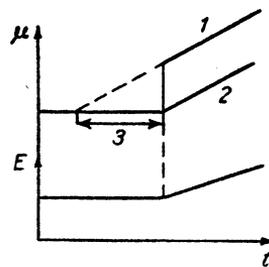


Рис. V-159. Реакция пропорционального регулятора с воздействием по производной на линейно меняющийся во времени сигнал ошибки: 1 — пропорциональное регулирование с воздействием по производной; 2 — только пропорциональное; 3 — время предварения.

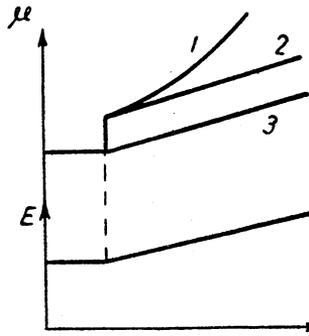
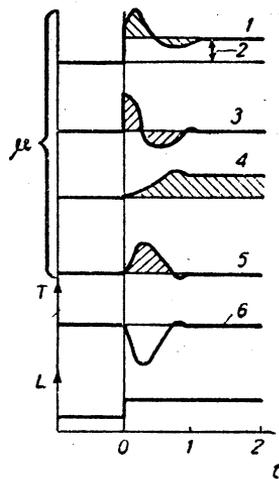


Рис. V-160. Реакция пропорционального регулятора с воздействиями по интегралу и производной на линейно меняющийся сигнал ошибки:

1 — пропорциональное регулирование с воздействиями по интегралу и производной; 2 — пропорциональное регулирование с воздействием по производной; 3 — только пропорциональное.

ложения, что обе реакции возникают последовательно, так что время упреждения является функцией коэффициента усиления.

Рис. V-161. Зависимость между положением клапана или выходом регулятора и регулируемой переменной T при внезапном увеличении нагрузки L ; регулирование осуществляется с помощью статического регулятора с воздействиями по интегралу и производной:



1 — результирующее положение клапана; 2 — точная коррекция; 3 — дифференциальная составляющая; 4 — астатическая составляющая, пропорциональная интегралу; 5 — пропорциональная составляющая; 6 — заданное значение температуры.

Регулирование по отклонению, производной и интегралу. Комбинация из всех трех основных видов регулирования обеспечивает наилучшее возможное управление. Сохраняются преимущества каждого вида — пропорциональное воздействие статического регулирования с исключением статической ошибки благодаря интегральному регулированию и преодолением любых запаздываний благодаря стабилизирующему быстрдействию регулированию по производной.

где T_n — время предварения¹. Выходной сигнал изменяется только в том случае, если меняется сигнал ошибки; коррекции не происходит, если сигнал ошибки постоянен, какой бы величины он ни был. В этом заключается существенное отличие данного вида регулирования.

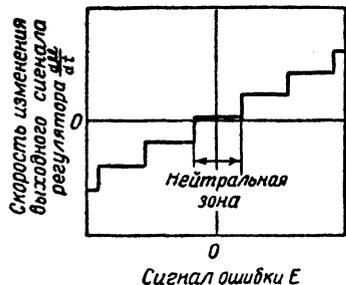


Рис. V-155. Зависимость между скоростью изменения выходной величины регулятора и сигналом ошибки у многоскоростного регулятора с нейтральной зоной.

Передаточная функция для регулирования по производной:

$$G = T_n D \quad (V-29)$$

Рис. V-156 иллюстрирует зависимость между входным сигналом ошибки и выходом регулятора при регулировании по производной в случае линейно меняющегося и синусоидального сигналов ошибки.

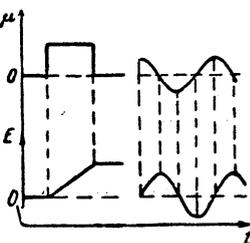


Рис. V-156. Реакция регулятора с воздействием по производной на линейно меняющийся во времени и синусоидальный сигналы ошибок.

Регулирование по производной не может обеспечить удовлетворительного управления в силу того, что корректирующий сигнал возникает только при изменении сигнала ошибки. Оно используется лишь в комбинации с другими видами регулирования и тогда дает сильный стабилизирующий эффект, так как обладает быстрой и сильной реакцией на все виды возмущений. Выход регулятора всегда направлен так, чтобы регулируемая величина возвращалась к заданному значению. Этот вид регулирования особенно эффективен при наличии

задержек в любом из звеньев системы и может быть использован для преодоления некоторых последствий «чистого запаздывания». Находит применение также и инверсная модификация регулирования по производной, в которой выход пропорционален отрицательной производной от сигнала ошибки¹.

Комбинированные виды регулирования. Большинство систем управления процессами, особенно таких, где требуется высококачественное управление при наличии значительных колебаний нагрузки или больших задержек времени, выполняется с помощью комбинирования трех основных типов регулирования. Как уже указывалось, в таком случае можно взять лучшие характеристики от каждого из типов регулирования. Обычно применяют три основные комбинации: 1) по отклонению и интегралу (изодромное регулирование), 2) по отклонению и производной, 3) по отклонению, производной и интегралу.

Регулирование по отклонению и интегралу (изодромное регулирование). Сочетание интегрального регулирования с пропорциональным образует одну из наиболее широко применяющихся систем управления. Пропорциональное регулирование характеризуется быстротой реакции на большую часть вариантов возмущений и может быть использовано в системах с умеренными запаздываниями. Интегральное регулирование допускает большие изменения нагрузки и исключает возможность появления статической ошибки. Поэтому такая комбинация дает хорошие результаты почти во всех случаях, за исключением процессов с очень резкими возмущающими воздействиями или очень большими запаздываниями. Регуляторы такого типа иногда называют регуляторами с автоматической обратной перестановкой, так как они автоматически сводят к нулю статическую ошибку, возникающую при пропорциональном регулировании.

Рис. V-157 иллюстрирует реакцию пропорционально-интегрального регулятора на единичное скачкообразное изменение нагрузки. Результирующая реакция может быть представлена как сумма двух реакций: пропорционального и интегрального регуляторов. Здесь возвратная скорость есть функция коэффициента усиления, вследствие чего оба действия — пропорциональное и интегральное — происходят последовательно. Однако в некоторых случаях эти действия происходят параллельно, и тогда возвратная скорость не зависит от коэффициента усиления. Интегральное время², или величина, обратная возвратной скорости, для рассматриваемой системы должно быть равно отрезку вре-

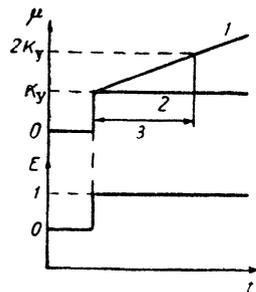


Рис. V-157. Выходная реакция регулятора с воздействием по отклонению и интегралу на единичное скачкообразное изменение входной величины при статическом коэффициенте усиления, равном K_y (зона пропорциональности $b = 1/K_y$):

1 — воздействие по интегралу и отклонению; 2 — только по отклонению; 3 — интегральное время (величина, обратная возвратной скорости).

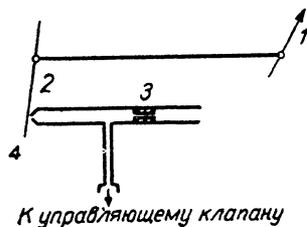
¹ Для обозначения этого понятия (negative derivative of error) в СССР принят термин «обратное предварение». — Прим. ред.

² Для обозначения этого понятия (integral time) в СССР приняты термины «время изодрома» или «время удвоения». — Прим. ред.

¹ Авторы употребляют термин «скоростная постоянная времени» (rate time constant). — Прим. ред.

ное, либо минимальное давление на мембрану, перемещающую клапан в полностью открытое или в полностью закрытое положение.

Существуют различные механические устройства для решения этой задачи, но основная идея остается неизменной. Рис. V-162 показывает принцип действия такой системы.



Скорость реакции системы очень невелика. Диаметр отверстия сопла должен быть настолько мал, чтобы силой струи воздуха, действующей на заслонку, можно было пренебречь, считая ее малой по сравнению с силами, действующими на заслонку со стороны измерительной системы. В некоторых конструкциях это достигается путем разделения воздушного потока на две струи и размещения заслонки между ними. В других случаях вместо заслонки

Рис. V-162. Схема двухпозиционного пневматического регулятора с соплом и заслонкой:

1 — измерительное устройство; 2 — сопло; 3 — постоянный дроссель; 4 — заслонка.

применяют запорный подпружиненный шарик. При маленьком диаметре сопла диаметр дросселя также мал. В результате этого изменения давления внутри линии, ведущей к управляющему клапану, происходит весьма медленно, внося запаздывание в систему, особенно в линиях с большой емкостью. Установка пневматического реле между дросселем и управляющим клапаном устраняет запаздывание, сводя емкость регулирующей части системы к минимуму.

Реле со сбросом воздуха в атмосферу и без сброса. Реле может быть со сбросом воздуха или без сброса.

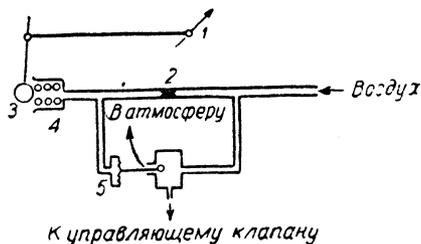


Рис. V-163. Схема двухпозиционного пневматического регулятора, снабженного пневматическим реле расходного типа и устройством с запирающим шариком:

1 — измерительное устройство; 2 — постоянный дроссель; 3 — шарик; 4 — пружина; 5 — мембрана.

таким образом, чтобы при совмещении стрелок измерительного устройства и системы управления регулирующей клапан был неподвижен.

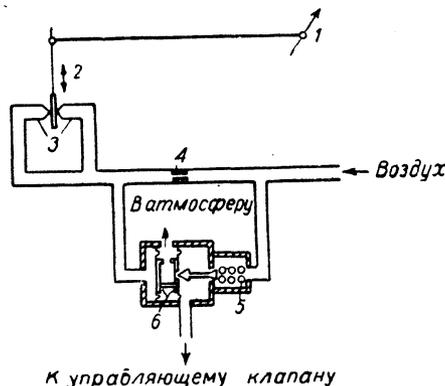


Рис. V-164. Схема двухпозиционного пневматического регулятора, показывающая «раздвоенные» сопла детектора ошибки и реле безрасходного типа:

1 — измерительное устройство; 2 — заслонка; 3 — сопла; 4 — постоянный дроссель; 5 — пружина; 6 — блок мембран.

Пропорциональное регулирование. Для обеспечения пропорционального регулирующего воздействия к обычному двухпозиционному регулятору типа «включено — выключено» добавляют сильфон обратной связи (см. рис. V-165). Ради простоты на схеме детали управля-

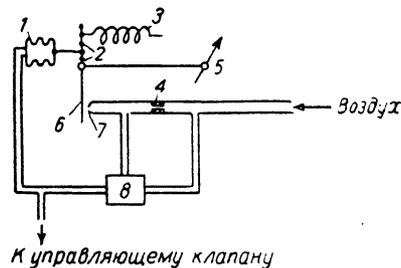


Рис. V-165. Схема пропорционального пневматического регулятора:

1 — сильфон обратной связи; 2 — устройство для установки пределов пропорциональности; 3 — пружина; 4 — постоянный дроссель; 5 — измерительное устройство; 6 — заслонка; 7 — сопло; 8 — реле.

ющих клапанов не показаны, изображен только узел регулирования (заслонка и сопло).

Пропорциональность регулирования обеспечивается тем, что сильфон обратной связи под воздействием выработанного пневматическим реле сигнала перемещает заслонку к начальному положению, как это показано на рис. V-165. Воздух из реле воздействует и на сильфон обратной связи, и на управляющий клапан. Сильфон связан с рычагом, который перемещает заслонку по отношению к соплу таким образом, чтобы давление в пневматическом реле оказалось пропорциональным измеряемой величине. Поэтому для того, чтобы управляющий клапан полностью переместился, т. е. воспринял

т. е. «расходное» и «безрасходное» (рис. V-163 и V-164). В первом случае воздух поступает либо к управляющему клапану, либо стравливается в атмосферу, а во втором выходит между мембранами в атмосферу только при нулевом давлении на клапан, когда питание в реле не поступает.

Заданное значение регулируемого параметра устанавливается с помощью ручного механизма, который перемещает индикатор по шкале и приближает (или отдаляет) заслонку к соплу. Настройка производится

Реакция выходной величины регулятора с управлением по отклонению, производной и интегралу на линейно меняющуюся величину сигнала ошибки показана на рис. V-160. На рис. V-161 дано изменение выходной величины регулятора, составленное из всех видов реакций регулирования, и результирующее отклонение регулируемой переменной, управляемой статическим регулятором с воздействиями по интегралу и производной. Эти рисунки показывают, как каждый вид регулирования участвует в выработке выходной величины такого регулятора.

ВЫБОР ВИДА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Возможно, наиболее трудным вопросом при расчете и конструировании САР является выбор вида регулирования. Обычно принимается компромиссное решение, сочетающее удовлетворительное качество регулирова-

при настройке и ремонте. Однако если возникают сомнения, то надо включать всю отобранную аппаратуру, так как экономические потери от переоснащения приборами значительно меньше потерь качества и количества продукции из-за экономии средств на аппаратуру регулирования и контроля.

В табл. V-20 указаны виды регулирования, пригодные для процессов с различными характеристиками, но эти указания должны рассматриваться лишь как ориентировочные. Таблица не заменяет экспериментов с реальными объектами или их моделями и не исключает необходимости проведения строгого частотного анализа с последующей интерпретацией его компетентными специалистами. Здесь надо напомнить, что динамика процессов с одноместными объектами определяется одной из их резистивно-емкостных пар, в то время как многоместные процессы обладают двумя или более резистивно-емкостными парами значительной величины.

ТАБЛИЦА V-20

Характеристики процессов и виды регулирования

Число емкостей в регулируемом объекте	Реакция процесса	Запаздывание процесса		Изменение нагрузки		Пригодный вид регулирования
		емкостное	чистое	величина	скорость	
Одна	Медленная	От умеренного до сильного	Малое	Любая	Любая	Двухпозиционное или его модификация
Одна (объект с самовыравниванием)	Быстрая	Малое	Малое	Любая	От медленной до умеренной	Интегральное или его модификация
Много	От медленной до умеренной	Умеренное	Малое	Малая	Умеренная	Пропорциональное
Много	Умеренная	Умеренное	Малое	Большая	От медленной до умеренной	Пропорционально-интегральное (изодромное)
Много	Любая	Любое	Умеренное	Малая	Любая	По отклонению и производной
Много	Любая	Любое	Умеренное	Большая	Любая	По отклонению, производной и интегралу
Любое	Быстрее, чем у системы управления	Малое или около нуля	От малого до умеренного	Любая	Любая	Пропорциональное с широкими пределами пропорциональности и с быстрым управлением по интегралу

ния с разумной стоимостью системы. Удовлетворяя всем критериям качества, САР не должна содержать таких усовершенствований, которые не являются абсолютно необходимыми. Излишние улучшения повышают стоимость и могут значительно увеличить объем работ

Процессы с очень маленькими емкостями, особенно процессы с жидкими средами, успешно регулируются с помощью одного астатического регулятора или широкогодиапазонного пропорционального регулятора в сочетании с сильным воздействием по интегралу.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Как правило, конечной задачей любого пневматического регулятора является подача воздуха на мембрану пневматического исполнительного механизма. Для большинства САР давление должно лежать в пределах 0,2—1,0 ат. Некоторые специальные системы используют другие диапазоны давлений. При различных давлениях, приложенных к мембране клапана, клапан

занимает различные положения. Это управляющее действие осуществляется следующим образом. В линии установлен постоянный дроссель, подводящий воздух к соплу, которое прикрывается или открывается заслонкой, связанной с индикатором измерительной системы. При открытом сопле давление в линии минимальное, при закрытом — максимальное.

Двухпозиционное регулирование. При двухпозиционном регулировании необходимо обеспечить либо пол-

выходное давление реле, пропорциональный регулятор почувствует изменение и будет немедленно реагировать. При наличии дросселя в линии действие обратной связи будет задержано, так что управляющий клапан переместится дальше, чем это произошло бы при обычном пропорциональном регулировании. Чем больше изменение входной величины, тем дольше будет двигаться управляющий клапан; он будет двигаться до тех пор, пока измененное давление не распространится через дроссель, после чего начнет действовать обратная связь. При неизменности регулируемой величины дроссель не играет никакой роли в управлении. Дифференциальное время (время предупреждения) регулируется различной степенью открытия или закрытия дросселя.

Установка с концентрическими сильфонами обеспечивает непрерывное пропорциональное воздействие на внутренний сильфон обратной связи, эффективная площадь которого, воспринимающая давление, составляет всего лишь около $\frac{1}{5}$ эффективной площади внешнего сильфона. В результате этого снижаются пределы пропорциональности и управляющий клапан открывается больше, чем это произошло бы при обычном пропорциональном регулировании. Затем воздух проходит через регулируемый дроссель, заполняет емкость и большой внешний сильфон, вследствие чего восстанавливаются прежние пропорциональные соотношения, которые сохраняются до тех пор, пока снова не произойдет изменение входной величины.

Пропорциональное регулирование с воздействием по интегралу и производной (регулирование по отклонению, интегралу и производной). Этот вид регулирования может быть осуществлен на пневматических устройствах. Различные элементы в сложном регуляторе

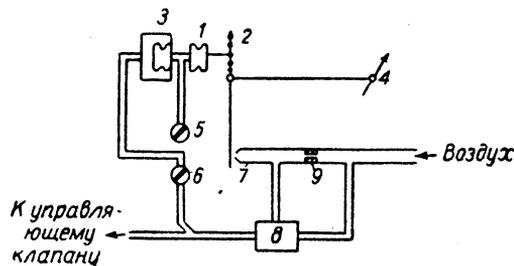


Рис. V-170. Схема типичного пневматического изодромного регулятора с предварением:

1 - сильфон пропорциональной составляющей; 2 - регулировка пределов пропорциональности; 3 - сильфон интегральной составляющей в коробке; 4 - измерительное устройство; 5 - настройка времени изодрома (спуск в атмосферу); 6 - настройка времени предупреждения; 7 - сопло; 8 - реле; 9 - постоянный дроссель.

(рис. V-170) функционируют так же, как и в менее сложных устройствах.

Регуляторы блочного типа. Современная тенденция в конструировании регуляторов заключается в отделении системы управления от измерительной системы и от индикатора или регистрирующего устройства. Благодаря этому можно разместить измерительную систему и систему управления в непосредственной близости к процессу, в то время как регистрирующее устройство и индикатор можно поместить на центральную панель управления. Индикатор при этом может быть гораздо меньше, чем в случае, когда все элементы регулятора размещали в одном корпусе, и это позволяет приме-

нять графические и полуграфические панели, что значительно упрощает визуальное наблюдение за процессом. Задающий пневматический сигнал, обычно в виде давления 0,2—1,0 ат, подводится к регулятору. Измеренная величина подается также в виде пневматического сигнала в диапазоне 0,2—1,0 ат, а не в форме

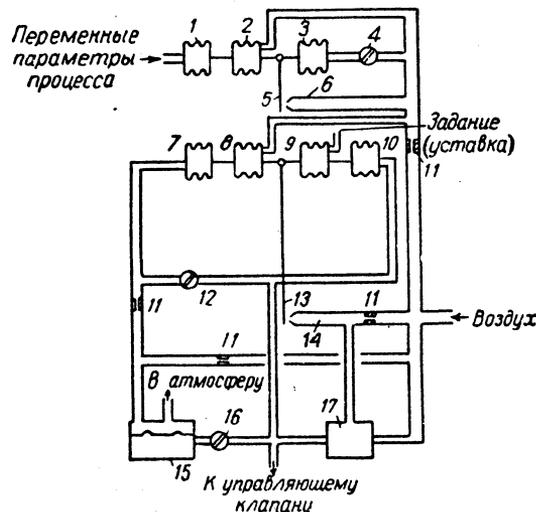


Рис. V-171. Схема пневматического регулятора блочного типа:

1 - сильфон переменных параметров процесса; 2 - дифференцирующий сильфон; 3 - дифференцирующий сильфон обратной связи; 4 - регулировка времени предупреждения; 5 - заслонка; 6 - сопло; 7 - сильфон положительной обратной связи; 8 - сильфон для ввода суммы дифференциальной и пропорциональной составляющих; 9 - сильфон задатчика; 10 - сильфон отрицательной обратной связи; 11 - постоянный дроссель; 12 - настройка пределов пропорциональности; 13 - заслонка; 14 - сопло; 15 - интегрирующая коробка; 16 - настройка времени изодрома; 17 - реле.

механического воздействия. На рис. V-171 показан типичный пневматический регулятор блочного типа. Рис. V-172 показывает, как решают проблему разделения на блоки различные фирмы.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

В определенных случаях гидравлические регуляторы имеют преимущество перед всеми другими. Скорость реакции у них гораздо выше, чем у пневматических регуляторов, благодаря несжимаемости жидкости. Блоки питания могут быть меньших размеров, чем в пневматических регуляторах, где используются высокие давления. Гидравлические системы весьма просты, но обычно они занимают больший объем, чем пневмостемы, и к тому же необходима дополнительная магистраль для отвода регулирующей жидкости. Основным недостатком гидравлических систем являлся до сих пор тот факт, что наиболее удобные для систем жидкости были, как правило, огнеопасны. В настоящее время эта проблема успешно преодолена.

Гидравлические управляющие реле. Все принципы, применяемые в пневматических устройствах, применимы также и в гидравлических. Некоторые изменения конструкции, безусловно, необходимы ввиду использования различных сред. Главное различие состоит в

наибольший управляющий сигнал, требуется максимальное изменение регулируемой величины.

Пределы пропорциональности можно изменять с помощью механизма, перемещающего точку соприкосновения тяги сильфона с хвостовой частью заслонки, вследствие чего ее качание будет уменьшаться или увеличиваться при одном и том же перемещении тяги сильфона.

Устройство, обеспечивающее воздействие выходной величины на вход системы, реализует контур обратной связи.

Пропорционально-интегральное регулирование. Интегральное воздействие можно получить, добавив к пропорциональному регулятору второй сильфон, емкость и

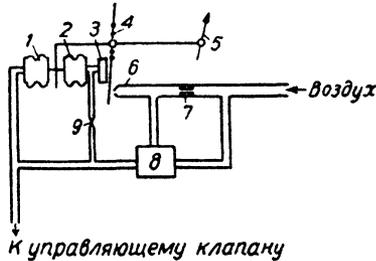


Рис. V-166. Схема пропорционального пневматического регулятора с воздействием по интегралу:

- 1 — сильфон пропорциональной составляющей (обратной связи); 2 — сильфон астатической составляющей; 3 — емкость; 4 — установка пределов пропорциональности; 5 — измерительное устройство; 6 — сопло; 7 — постоянный дроссель; 8 — реле; 9 — регулируемый дроссель.

спускное устройство. В регуляторе, показанном на рис. V-166, возмущение, вызывающее перемещение заслонки, меняет и выходное давление реле. Допустим для определенности, что давление уменьшается; в этом случае в сильфоне обратной связи давление также

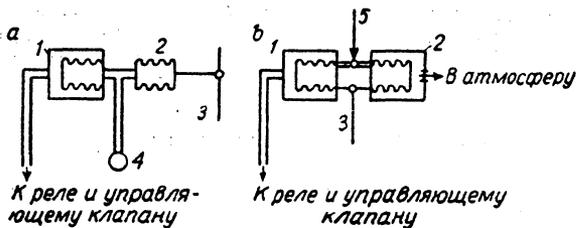


Рис. V-167. Изодромные пневматические регуляторы: а — с устройством для спуска воздуха в атмосферу, б — с устройством для перепуска воздуха из одного сильфона в другой;

- 1 — сильфон интегральной составляющей в коробке; 2 — сильфон пропорциональной составляющей; 3 — заслонка; 4 — регулируемый спуск воздуха в атмосферу; 5 — регулируемый дроссель.

уменьшается, а в сильфоне астатической (интегральной) составляющей, в силу наличия постоянного дросселя в подводящей линии, давление на некоторое время остается высоким, после чего заслонка будет отдаляться от сопла и это вызовет соответствующее перемещение регулирующего клапана. Если ошибка имеет обратный знак, давление на сильфон интегральной со-

ставляющей ниже, чем на сильфон обратной связи, и заслонка после выравнивания давлений будет стремиться еще больше закрыть сопло, опять-таки усиливая корректирующее воздействие.

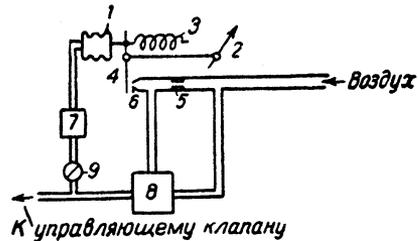


Рис. V-168. Статический пневматический регулятор с предварением:

- 1 — сильфон пропорциональной составляющей; 2 — измерительное устройство; 3 — пружина; 4 — заслонка; 5 — дроссель; 6 — сопло; 7 — емкость; 8 — реле; 9 — регулируемый дроссель.

Другие методы получения интегрального воздействия показаны на рис. V-167. И здесь сильфоны интегральной составляющей усиливают корректирующее воздействие в течение того периода, пока существует отклонение. Когда регулируемая величина достигает заданного значения, это дополнительное корректирующее воздействие исчезает.

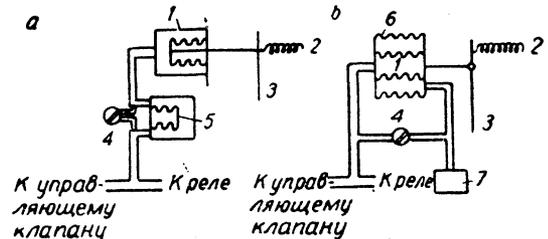


Рис. V-169. Узлы управления статического пневматического регулятора с предварением:

- а — сильфоны в коробке; б — концентрические сильфоны. 1 — сильфон пропорциональной составляющей; 2 — пружина; 3 — заслонка; 4 — регулируемый дроссель; 5 — дифференцирующий сильфон; 6 — внешний сильфон; 7 — емкость.

Пропорциональное регулирование с воздействием по производной. Воздействие по производной (или по скорости) — важный фактор, способствующий стабилизации процесса, так как позволяет осуществлять корректирующее воздействие наиболее быстро, сразу же после появления возмущения. Оно добавляется к пропорциональному воздействию регулятора; для этой цели в линию обратной связи, ведущей к сильфону, вводятся емкость и регулируемый дроссель (рис. V-168). Другие средства для достижения того же самого эффекта показаны на рис. V-169.

В пропорциональном регуляторе давление на сильфон обратной связи всегда равно выходному давлению пневматического реле. При введении в линию, идущую к сильфону, дросселя возникает временная задержка, в результате чего сначала изменяется выходное давление реле, но только через некоторое время это изменение дойдет до сильфона обратной связи. Если, например, заслонка приближается к соплу, то увеличится

гом, что жидкость обладает определенной стоимостью и поэтому все клапаны и реле не должны иметь «сброса в атмосферу»; должны быть также предусмотрены возвратные линии и накопительные емкости для управляющей жидкости.

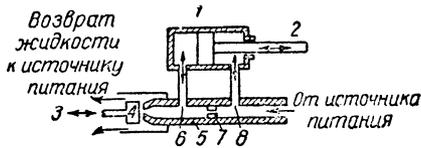


Рис. V-173. Гидравлическое струйное реле с двойным дросселированием:

1 — цилиндр; 2 — шток, перемещающий оконечный регулирующий орган; 3 — тяга от измерительной системы; 4 — заглушка (заслонка); 5 — сопло; 6 — отверстие обратного хода; 7 — дроссель; 8 — отверстие прямого хода.

Реле с двойным дросселированием. В гидравлическом управлении применяется уже известный нам принцип сопла и заслонки (рис. V-173). Выходом реле является механическое движение штока 2, движение тяги 3 приближает (или отдаляет) заслонку 4 к соплу 5, вследствие чего изменяется соотношение давлений справа и слева от поршня рабочего цилиндра. Это заставляет поршень двигаться к новой точке равновесия, причем шток поршня связан с управляющим клапаном.

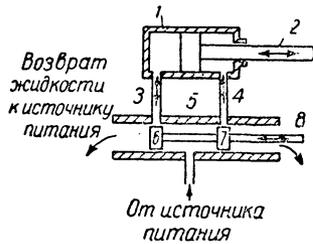


Рис. V-174. Четырехходовый гидравлический управляющий клапан (с золотниковым устройством):

1 — цилиндр; 2 — шток, перемещающий оконечный регулирующий орган; 3 и 4 — трубопроводы прямого и обратного хода; 5 — втулка золотника; 6 и 7 — поршни золотника; 8 — шток золотника, связанный с измерительной системой.

перемещается шток поршня 2, связанный с оконечным регулирующим органом.

Струйная трубка. Другим широко используемым типом реле в гидравлических системах является струйная трубка. Такое реле использует потоки жидкости с относительно высоким (до 32 ат) давлением¹ и с высокими скоростями. Если изменяется регулируемая величина, то струйная трубка (рис. V-175) приближается к соплу трубопровода А (или наоборот), в результате чего давления над и под поршнем в цилиндре делаются различными, что вызывает перемещение поршня.

Астатическое регулирование. Ввиду того, что скорость движения поршня в гидравлическом реле зависит от

перемещения штока золотника или струйной трубки, гидравлическую систему особенно хорошо можно приспособить к чисто астатическому типу регулирования, где скорость коррекции пропорциональна сигналу ошибки. В этом случае можно использовать любые агрегаты из числа показанных на рис. V-173—V-175.

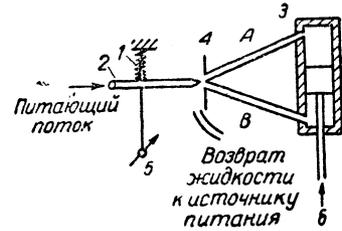


Рис. V-175. Гидравлическое струйное реле:

1 — пружина; 2 — ось вращения трубки; 3 — цилиндр; 4 — сопловая плита; 5 — индикатор измерителя; 6 — шток, связанный с оконечным регулирующим органом.

Пропорциональное регулирование. Пропорциональное регулирование может осуществляться с помощью астатического регулятора, охваченного отрицательной обратной связью; нужна сила, которая противодействовала бы движению штока. Рис. V-176 показывает типичную схему такого вида регулирования. Здесь и управляющие поршни, и втулка золотника могут перемещаться (не закреплены); такая конструкция часто применяется в гидравлических системах регулирования. Изменение регулируемой переменной вызывает перемещение штока золотника вместе с поршнями относительно его втулки, изменение давления в цилиндре и перемещение штока оконечного регулирующего органа; но при этом одновременно перемещается и втулка золотника, восстанавливая прежнее расположение его деталей и прекращая тем самым нарастание выходной величины.

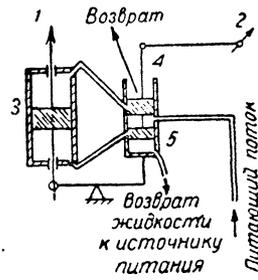


Рис. V-176. Гидравлическое управляющее устройство пропорционального действия, в котором шток регулирующего органа и втулка золотника движутся в противоположных направлениях: 1 — шток, связанный с оконечным регулирующим органом; 2 — индикатор измерителя; 3 — цилиндр; 4 — поршень золотника; 5 — втулка золотника.

Пропорционально-интегральное (изодромное) регулирование. Пропорционально-интегральное регулирование обеспечивается введением в статический регулятор устройств гибкой (исчезающей) обратной связи. Один из способов достижения этой цели показан на рис. V-177.

В гидравлическую схему включается цилиндр изодрома 3; он снабжен регулируемым дросселем 6 в линии, соединяющей камеры цилиндра. Пусть, к примеру, изменение регулируемой переменной заставляет двигаться шток золотника 2 влево. Это поведет к перекачиванию жидкости в левую часть цилиндра изодрома и к передвижению поршня его вправо. Это, в свою очередь, повлечет за собой перекачивание жидкости в рабочий

¹ В СССР принято давление питающей жидкости 12 ат. — Прим. ред.

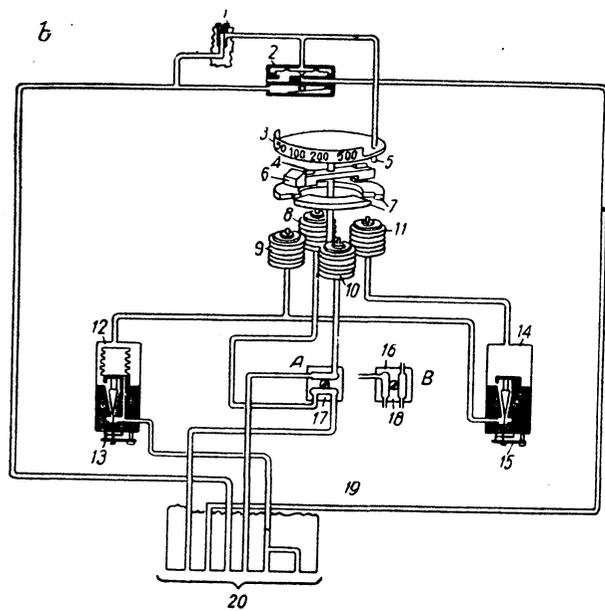
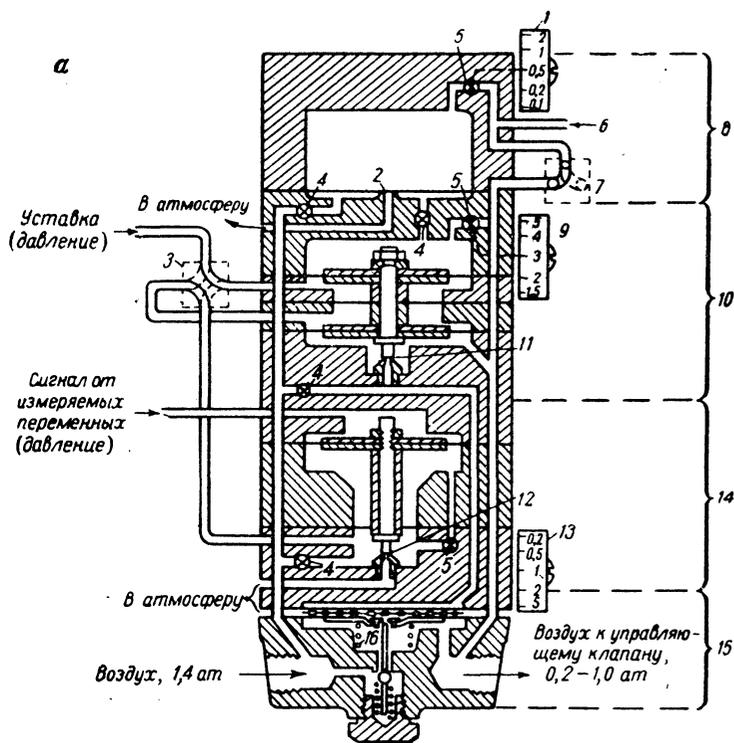


Рис. V-172. Схемы пневматических регуляторов:
 а — изодромный регулятор с предварением блочного типа (Бристоль);

1 — маховичок установки возвратной скорости (времени изодрома); 2 — реле давления интегрирующей камеры; 3 — панель переключения (показана в положении „прямо“); 4 — постоянный дроссель; 5 — регулируемый дроссель (игольчатый клапан); 6 — обратная связь интегрирующей камеры (используется со станциями МА); 7 — выключатель обратной связи интегрирующей камеры (показан в положении „без МА“); 8 — интегрирующий блок; 9 — маховичок установки коэффициента усиления; 10 — усилитель (коэффициент усиления регулируется от 0,5 до 50); 11 — узел „сопло — заслонка“ усилителя пропорциональной составляющей; 12 — узел „сопло — заслонка“ усилителя дифференциальной составляющей; 13 — маховичок установки времени предварения; 14 — дифференцирующий блок; 15 — шариковый усилитель мощности (клапан управления); 16 — пружина обратного давления;

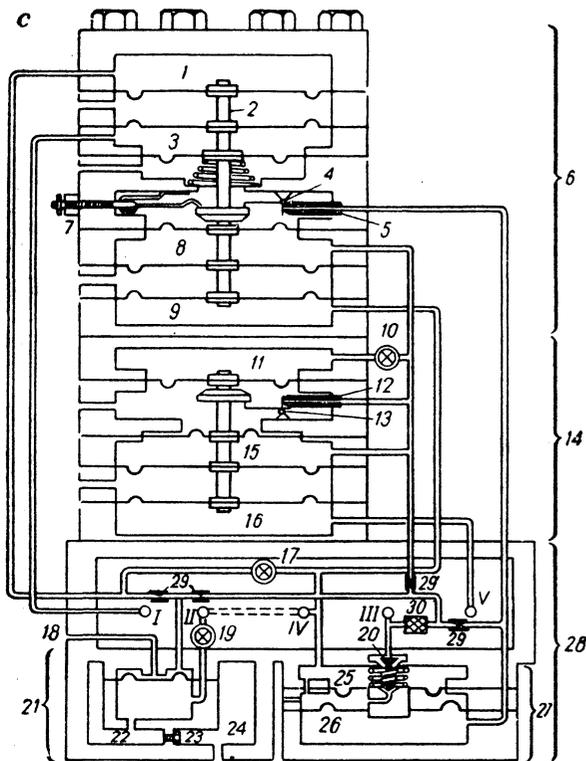
б — изодромный регулятор с предварением приборного типа (Фоксборо);

1 — редуктор; 2 — реле; 3 — шкала степени неравномерности; 4 — опоры; 5 — сопло; 6 — рычаги регулировки степени неравномерности; 7 — уравнивающий астатический диск; 8 — задающий (В) или измеряющий (А) сильфон; 9 — сильфон пропорциональной составляющей; 10 — измеряющий (В) или задающий (А) сильфон; 11 — интегрирующий сильфон; 12 — дифференцирующее устройство; 13 — регулируемый дроссель дифференцирующего устройства; 14 — интегрирующее устройство; 15 — регулируемый дроссель интегрирующего устройства; 16 — переключающая плата для реверсирования действия регулятора (положение В); 17 — увеличение; 18 — уменьшение; 19 — трубопровод выхода; 20 — трубопроводы регулятора (слева направо): измерение; выход; питание; уставка; обратная связь; клапан;

с — универсальный пневматический регулятор блочного типа (Бристоль);

Входы: 1 — задание (уставка): задается вручную с помощью ручки на регистрирующем устройстве или на индикаторе; 11 — интегральная составляющая: выход регулятора подается в отверстие 11 через отверстие IV; 111 — подача воздуха (сухой чистый воздух поступает в регулятор под давлением 1,4 ат); 1V — выход (в форме давления на управляющий клапан или другой оконечный регулирующий орган); V — переменные процессы (поступают из передатчика в виде пропорционального давления).

1 — камера положительной обратной связи; 2 — стержень; 3 — камера задатчика; 4 и 5 — заслонка и сопло регулирующего блока; 6 — регулирующийся блок; 7 — установка нуля; 8 — камера суммирования измерительного сигнала и сигнала дифференцирующего блока; 9 — камера отрицательной обратной связи; 10 — регулируемый дроссель блока предварения; 11 — обратная связь по дифференциальной составляющей; 12 и 13 — сопло и заслонка блока предварения 14; 15 — камера воздействия дифференциальной составляющей; 16 — камера измерительного давления; 17 — регулируемый дроссель отрицательной обратной связи; 18 — выходное отверстие; 19 — регулируемый дроссель изодрома; 20 — плунжер; 21 — интегрирующая камера; 22 — быстро; 23 — перепускное отверстие; 24 — медленно; 25 — выходное давление; 26 — давление в сопле; 27 — управляющее реле; 28 — основание; 29 — постоянные дроссели; 30 — фильтр.



двигатель с переменной скоростью вращения. Выходное напряжение с диагонали моста пропорционально отклонению, поэтому скорость вращения мотора может изменяться пропорционально отклонению регулируемой величины от заданного значения. Полярность сигнала

показаны на рис. V-182. Перемещение контакта *A* пропорционально отклонению температуры от заданного значения. Контакт *B* совершает колебания с заданной частотой под воздействием кулачка. Таким образом, длительность замкнутого состояния контактов *A* и *B*

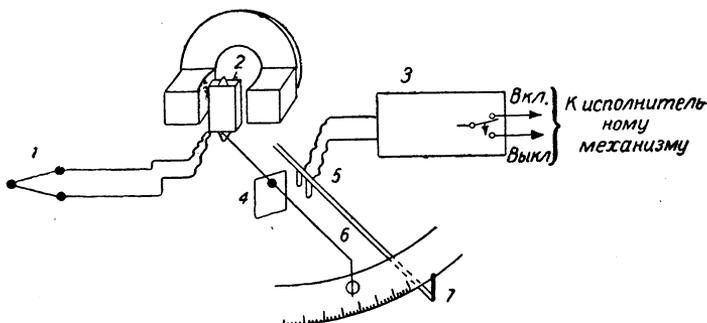


Рис. V-180. Милливольметр в качестве двухпозиционного электрического регулятора релейного действия:

1 — термопара; 2 — рамка милливольметра; 3 — усилитель; 4 — флажок; 5 — катушка генератора колебаний; 6 — стрелка милливольметра; 7 — индикатор задатчика.

ошибки будет изменяться при прохождении регулируемой переменной через заданное значение, при этом двигатель будет реверсироваться.

определяется величиной отклонения (чем ближе подведен контакт *A* к контакту *B*, тем дольше они замкнуты).

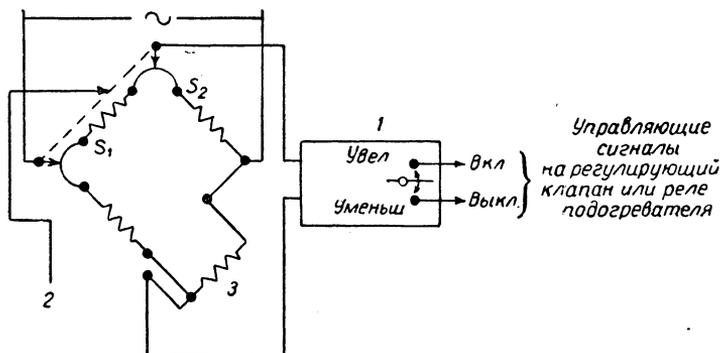


Рис. V-181. Двухпозиционный электрический регулятор релейного действия мостового типа:

1 — усилитель; 2 — управление ползунками реостатов для изменения задания; 3 — термометр сопротивления (измеряющий температуру).

Импульсный электрический регулятор, работающий по методу «среднего положения»¹. Типичным примером регулирования по методу «среднего положения» могут служить процессы регулирования температуры в электронагревательных печах, где для поддержания температуры на желаемом уровне нагревательные элементы то включаются, то выключаются с определенной частотой срабатывания. Если требуется увеличить нагрев, длительность положения «включено» в течение каждого цикла увеличивается. Оборудование и аппаратура, с помощью которых это достигается,

Пропорциональное (статическое) регулирование. В основе пропорциональных регуляторов лежит обычно мост Уитстона (рис. V-183), оконечный регулирующий орган механически связывается с ползунком реостата обратной связи и перемещает его (ползунок) таким образом, чтобы восстановить равновесие моста и свести его выходной сигнал к нулю.

Комбинированные регуляторы. Электрические и электронные регуляторы с комбинированным управлением получили развитие в относительно недавнее время, и поэтому лучшие варианты их исполнения еще недостаточно точно выявлены. Конструкций различных регуляторов по крайней мере столько же, сколько изготавливающих такие регуляторы фирм. Даже электрический

¹ См. примечание на стр. 457.

цилиндр 7 исполнительного механизма и, следовательно, к перемещению оконечного регулирующего органа. Это движение будет происходить до тех пор, пока сила пружины не уравновесит силу давления жидкости. При этом гидравлические давления по разные стороны

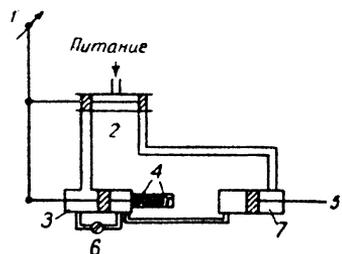


Рис. V-177. Схема изодромного гидравлического регулятора:

1 — индикатор измерителя; 2 — золотниковое устройство; 3 — цилиндр изодрома; 4 — пружины; 5 — шток, связанный с оконечным регулирующим органом; 6 — регулируемый дроссель; 7 — цилиндр исполнительного механизма.

поршня изодрома будут неодинаковы, что повлечет за собой перетекание жидкости через регулируемый дроссель. Таким образом, обратная связь будет медленно исчезать, и когда давления полностью сравняются, астатическое регулирование прекратится.

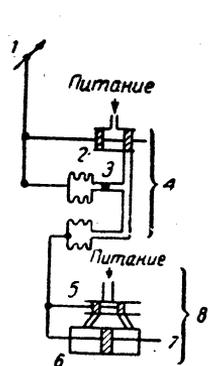


Рис. V-178. Схема статического гидравлического регулятора с предварением:

1 — индикатор измерителя; 2 — золотник; 3 — регулируемый дроссель; 4 — блок предварения; 5 — золотник; 6 — цилиндр исполнительного механизма; 7 — шток, связанный с оконечным регулирующим органом; 8 — блок статического регулирования.

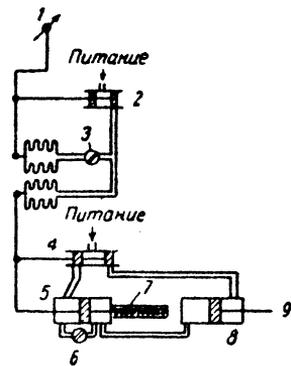


Рис. V-179. Схема изодромного гидравлического регулятора с предварением:

1 — индикатор измерителя; 2 — золотник управления по производной; 3 — регулируемый дроссель для установки времени предварения; 4 — золотник пропорционального управления; 5 — цилиндр изодрома; 6 — регулируемый дроссель для установки времени изодрома; 7 — пружины; 8 — цилиндр исполнительного механизма; 9 — шток, связанный с оконечным регулирующим органом.

Пропорциональное регулирование с воздействием по производной. Воздействие по скорости (по производной) может быть реализовано в гидравлическом регуляторе при комбинировании уже известного нам регули-

рования по производной с пропорциональным регулированием. На рис. V-178 показан регулятор с таким комбинированным управлением. Золотник 2 служит для регулирования по производной и имеет только один рабочий поршень, так как он не управляет рабочим цилиндром. Второй поршень используется для уравновешивания давления питающего потока, чтобы оно не оказывало обратного воздействия на измерительную систему. При изменении регулируемой величины сигнал от золотника 2 передается через нижний сифон на золотник 5, который управляет цилиндром исполнительного механизма 6. Одновременно через регулируемый дроссель 3, установленный на заданное время предварения, жидкость переходит в верхний сифон, вследствие чего изменяется положение штока золотника 2, а это влечет за собой изменение давления в пропорциональной части регулятора. Временная задержка в цепи обратной связи, вызываемая дросселем, и создает первоначальный бросок корректирующего воздействия, как это происходит при регулировании по производной.

Пропорциональное регулирование с воздействием по производной и интегралу. Типичный пример регулятора такого типа показан на рис. V-179.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Электрические регуляторы используются часто для управления оконечным электрическим регулирующим органом, но во многих случаях пневматический исполнительный орган имеет преимущества перед своим электрическим аналогом, и тогда выход электрического регулятора связывают с электропневматическим преобразователем, который выдает пневматический сигнал для управления клапаном.

Все описанные виды регулирования реализуются в электрических и электронных регуляторах.

Двухпозиционное регулирование. Двухпозиционные регуляторы прямого действия типа «включено—выключено» часто употребляются при термостатировании; переключение осуществляется с помощью биметаллических пластинок, переключателей давления и аналогичных элементов. Однако их выходная мощность весьма ограничена, так что более практичны регуляторы релейного действия.

Обычно регулятор релейного действия снабжен усилителем, который в комбинации с реле аналогичен золотниковому устройству в пневматических и гидравлических регуляторах. Регулятор получает от датчика электрический сигнал, соответствующий по величине регулируемой переменной.

Один из наиболее простых регуляторов такого вида — это милливольтметр гальванометрического типа, снабженный приспособлением для обнаружения момента отклонения регулируемой переменной от заданного значения (рис. V-180). Другим вариантом двухпозиционного электрического регулятора является детектор мостового типа (рис. V-181). Заданное значение регулируемой переменной устанавливается перемещением подвижных контактов реостатов S_1 и S_2 . Если регулируемая величина отклоняется от заданного значения, то возникает разбаланс моста, что приводит к появлению напряжения на его диагонали, которое усиливается и управляет оконечным регулирующим органом.

Астатическое регулирование. Астатическое регулирование может быть осуществлено с помощью схемы, изображенной на рис. V-181, если использовать для управления оконечным регулирующим органом реверсивный

могут быть освещены здесь достаточно подробно. Тем не менее имеет смысл вкратце остановиться на нескольких применяемых регуляторах и обрисовать, как разрешаются некоторые проблемы.

Универсальные электрические регуляторы. Рис. V-184 иллюстрирует метод получения всех трех видов управления в электрическом регуляторе с настраиваемыми контурами. При изменении измеряемой величины движение механически связанного с измерительным прибором контакта в управляющем мостике вызывает разбаланс моста, вследствие чего появляется ток в его диагонали, который протекает по сопротивлению R_2

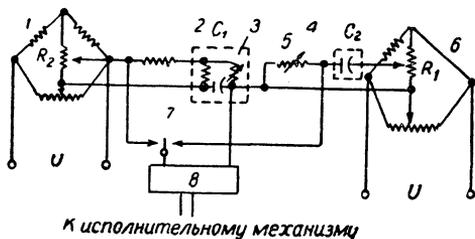


Рис. V-184. Электронный регулятор:

1 — управляющий мост; 2 — блок предварения; 3 — настройка времени предварения; 4 — блок изодрома; 5 — настройка времени изодрома; 6 — мост обратной связи; 7 — вибрационный преобразователь; 8 — усилитель.

(движок этого сопротивления перемещается при изменении «пределов пропорциональности»). Если мост обратной связи был уравновешен, то возникает разность потенциалов между левым и правым контактами вибрационного преобразователя, то есть сигнал на входе усилителя. Усилитель — фазочувствительный, поэтому в зависимости от полярности сигнала исполнительный механизм начинает вращаться в том или ином направлении. Одновременно с исполнительным устройством перемещается движок сопротивления R_1 в диагонали моста обратной связи (механически связанный с регулирующим органом); когда вследствие этого перемещения потенциал правого контакта станет равным потенциалу левого, усилитель перестанет воспринимать сигнал ошибки и движение прекратится.

Интегральная составляющая вырабатывается благодаря включению емкости C_2 (очерчена пунктиром) между движком сопротивления R_1 моста обратной связи и правым контактом синхронного преобразователя. Если регулируемая переменная отклоняется от заданного значения, то на выходе управляющего моста появляется сигнал, отличный от нуля. Для того чтобы его скомпенсировать, напряжение на диагонали моста обратной связи также должно быть отличным от нуля; поэтому в линии, содержащей емкость, будет протекать заряжающий ее ток. Вследствие наличия емкости ток в линии обратной связи будет уменьшаться, и для того, чтобы потенциал обоих контактов синхронного преобразователя оставался одинаковым, несмотря на то, что происходит заряд конденсатора (емкости C_2), движок сопротивления R_1 должен продолжаться перемещаться (а он перемещается вместе с регулирующим органом). Таким образом, дополнительная коррекция будет происходить до тех пор, пока регулируемая величина не достигнет заданного значения и выход управляющего моста не станет равным нулю.

Воздействие по производной, пропорциональное скорости изменения регулируемого параметра, производится с помощью RC-цепочки, показанной на рисунке; при изменении напряжения в диагонали управляющего моста происходит заряд конденсатора (емкости C_1) в узле дифференцирования. Емкость заряжается через регулируемое сопротивление Z , величина которого определяет время предварения. Напряжение, появляющееся на выходе дифференцирующего контура, складывается с напряжением, снятым с диагонали управляющего моста. Поэтому на первой стадии переходного процесса возникает скачок регулирующего воздействия в виде большой дополнительной коррекции. Напряжение на дифференцирующем контуре является функцией скорости изменения напряжения, так что, когда такого изменения нет (т. е. не меняется регулируемая переменная), узел дифференцирования не работает.

Комбинированный регулятор с выходным сигналом в виде тока или напряжения. В настоящее время стали широко применяться регуляторы, в которых в качестве выходной величины используется ток или напряжение. Выходные сигналы напряжения имеют величину от нескольких милливольт до 25 и более в. Сигналы тока обычно малы, имеют порядок 0 ÷ 5 ма, до 50 ма и выше. Схемы таких регуляторов изображаются одинаково, что можно видеть на рис. V-185.

Существуют различные методы введения входного сигнала в регулятор. Если узлы регулятора унифицированы, входные сигналы должны лежать в определенной области значений. Заданное значение регулируемой переменной также может быть задано в форме электрического сигнала.

Более сложные регуляторы могут иметь несколько усилителей, используемых для выявления сдвига по фазе,

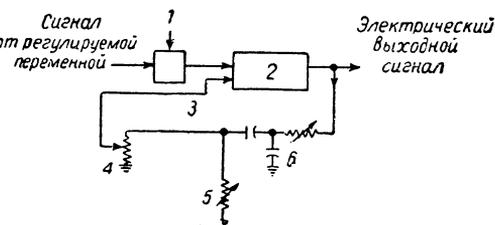


Рис. V-185. Схематическое изображение электронной системы автоматического регулирования:

1 — установка (задание); 2 — усилитель; 3 — петля обратной связи; 4 — настройка пределов пропорциональности; 5 — настройка времени изодрома; 6 — настройка времени предварения.

дифференцирования сигнала и т. д. Выходная величина выдается в форме электрического сигнала, пропорционального регулирующему воздействию. Выходная величина может поступать в электропневматический преобразователь для управления пневматическим управляющим клапаном; в другом случае выходная величина используется для непосредственного управления электрическим исполнительным механизмом. Большая часть исполнительных механизмов имеет устройство для сравнения сигнала, получаемого от регулятора, с эталонной (заданной) величиной. Это приводит, в конечном счете, к схеме, подобной изображенной на рис. V-184.

сигнал еще не стандартизован¹. Вследствие этого отдельные конструкции различных фирм часто не могут быть применены совместно в единой системе.

оконечным исполнительным органом; они могут работать и с электропневматическими преобразователями для пневматического управления окончательным регулирующим

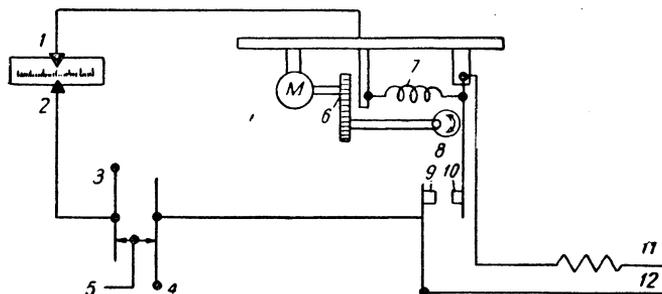


Рис. V-182. Импульсный электрический регулятор „среднего положения“ с постоянной частотой срабатывания:

1 — настройка заданного значения; 2 — измерительная система; 3 и 4 — оси вращения; 5 — настройка пределов пропорциональности; 6 — сменные шестерни для изменения цикла срабатывания; 7 — пружина; 8 — кулачок; 9 — контакт, перемещаемый пропорционально измеренной величине; 10 — контакт, перемещающийся по направлению к контакту 9 и обратно с заданной частотой; 11 — нагрузка; 12 — линия.

Последние работы в этой области заключаются в унификации по функциональным признакам приборов, которые по размерам сопоставимы с пневматическими

щим органом. Одни системы используют усилители на электронных лампах, другие — магнитные усилители, а некоторые — полупроводниковые. Во многих системах

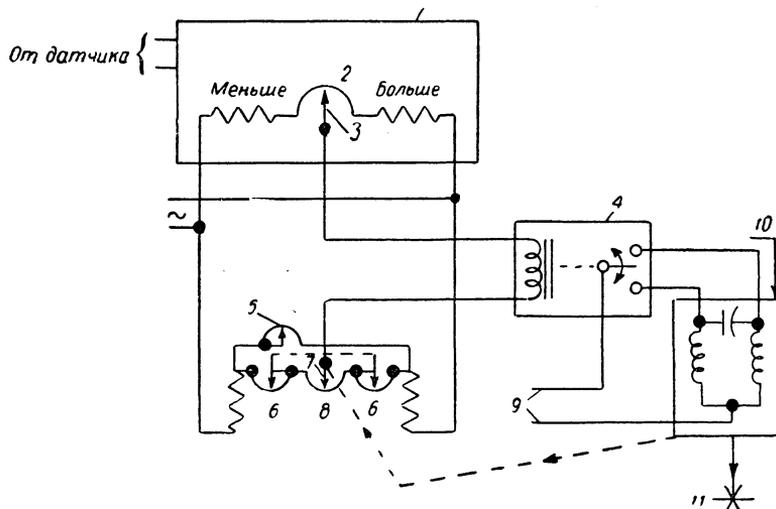


Рис. V-183. Пропорциональный электрический регулятор:

1 — измерительная и регулирующая аппаратура; 2 — реохорд измерительного устройства; 3 — ползунок, устанавливаемый в соответствии с заданным значением регулируемой переменной; 4 — реле-детектор; 5 — настройка пределов пропорциональности; 6 — ручная установка (необязательно); 7 — ползунок, перемещаемый приводом исполнительного механизма; 8 — реостат обратной связи; 9 — линия; 10 — привод исполнительного механизма; 11 — окончательный регулирующий орган (клапан).

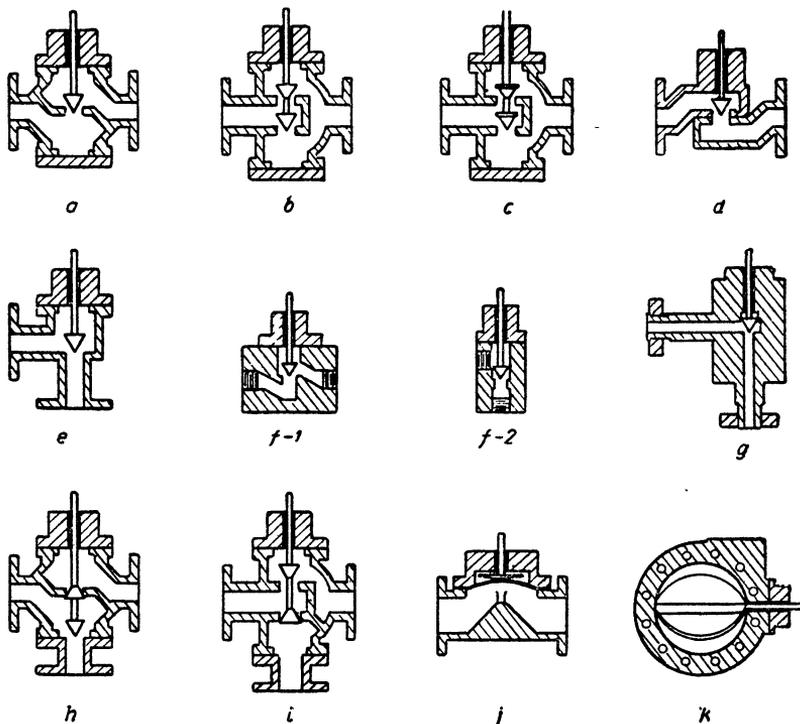
регуляторами. Все электрические системы обеспечивают достаточный по величине сигнал для управления

используется передача сигналов на переменном токе, в других — на постоянном.

При большом разнообразии применяемых регуляторов трудно выделить какой-нибудь один как наиболее типичный. Тонкости их сложных электронных цепей не

¹ В СССР электрические и пневматические сигналы гостированы. — Прим. ред.

Корпуса клапанов



Обозначение	Тип конструкции	Конструктивные ограничения	Преимущества и применение
<i>a</i>	Односедельный клапан; шарообразный корпус, допускающий перевертывание.	При срабатывании клапана приходится преодолевать давление регулируемой среды.	Плотное закрытие. Широко используется главным образом при размерах трубопровода менее 50 мм.
<i>b</i>	Двухседельный клапан; шарообразный корпус, допускающий перевертывание.	Неплотное закрытие. Возможна утечка (максимум 2%).	Давления на плунжер сбалансированы. Расход энергии на привод невелик даже при больших давлениях. Широко используется главным образом при больших размерах трубопроводов.
<i>c</i>	Двухседельный клапан; шарообразный корпус, допускающий перевертывание; уплотнение — прокладки в форме O или в виде литой конструкции.	Перепад давлений не больше 15 ат и температура не выше 90° С.	Плотное закрытие. Используется в системах с природным газом и в газовых и жидкостных процессах.
<i>d</i>	Односедельный клапан; корпус фигурной формы.	Крепежные болты должны выдерживать давление потока. Сварка не применяется.	Легко разбирается. Широко используется в химических процессах.
<i>e</i>	Односедельный клапан; корпус угловой.	Если поток подается под высоким давлением, то при перекрытии клапана может возникать гидравлический удар. В жидкостном потоке на выходе возникают кавитационные явления.	Беспрепятственное прохождение потока и высокая эффективность. Используется при управлении потоком шламов и — иногда — огнеопасных жидкостей.

ОКОНЕЧНЫЕ РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ

В системах автоматического управления процессом регулирующей клапан является окончательным элементом цепи регулирования. Увеличение или уменьшение проходного отверстия клапана вызывает изменение скорости потока регулируемого агента. Типичный регулирующей клапан показан на рис. V-186 в разрезе.

Корпус представляет собой герметичную конструкцию обычно с двумя (верхним и нижним) седлами, через которые проходит регулируемый агент. Привод обеспечивает необходимую мощность для перемещения плунжера; вследствие перемещения плунжера изменяется поток, проходящий через седло. Движение от привода к плунжеру передается через сальник или сальфонное уплотнение.

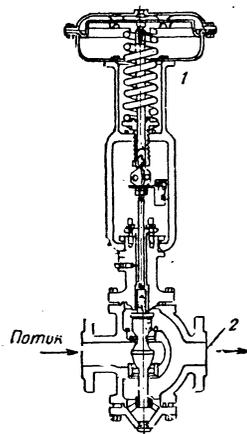


Рис. V-186. Типичный управляющий клапан: 1—воздействующее устройство (привод); 2—корпус клапана.

КОРПУСА КЛАПАНОВ

Корпуса регулирующих клапанов крепятся к трубопроводам линии потока с помощью резьбовых соединений, фланцев или сварки. Резьбовые соединения нарезаются согласно стандартам на коническую резьбу. Размеры и конструкция фланцевых соединений выбираются с учетом соотношения давления и температуры (по нормальям). Сварка производится встык или внахлестку, хотя последний способ не рекомендуется для труб размером свыше 50 мм.

Наиболее употребительными материалами для корпусов клапанов являются чугун и углеродистая сталь. Легированные стали, например хромомолибденовая, применяются в клапанах, используемых при высоких температурах. Различные типы нержавеющей стали, бронза, монель-металл, никель и все литейные сплавы

идут на изготовление клапанов, предназначенных для агрессивных потоков, способных вызывать коррозию металлов; такие клапаны можно применять в условиях очень высоких или очень низких температур. Части, подлежащие тщательной обработке и отделке (седла,

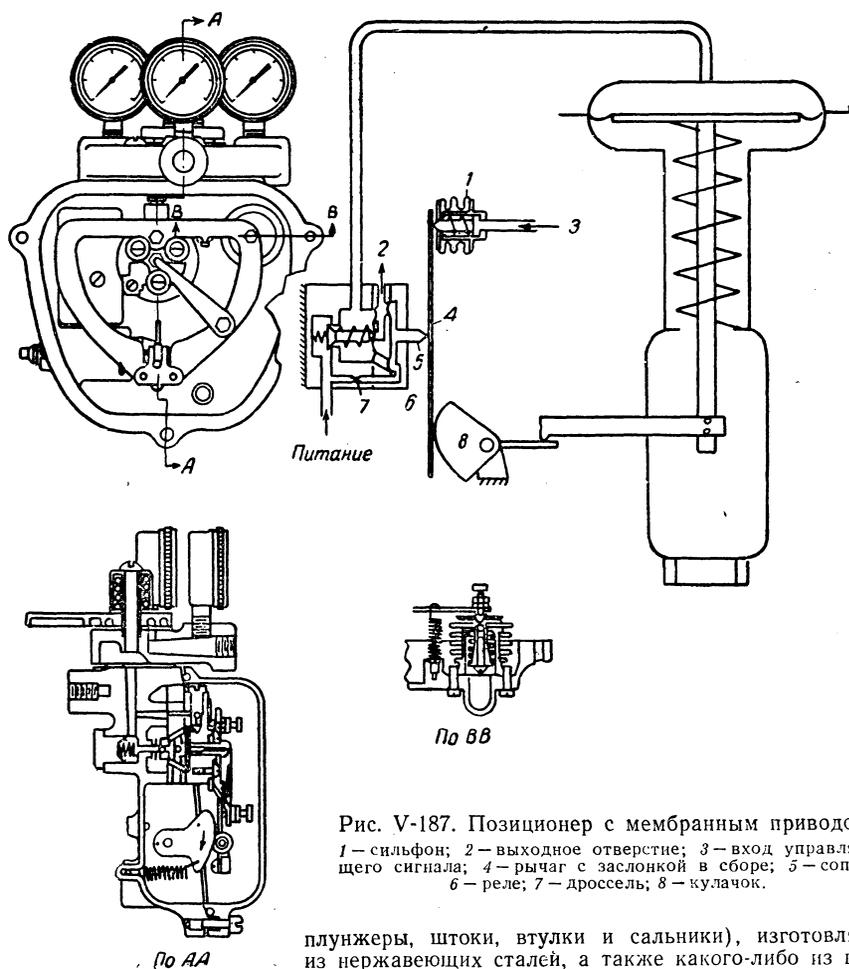


Рис. V-187. Позиционер с мембранным приводом: 1—сильфон; 2—выходное отверстие; 3—вход управляющего сигнала; 4—рычаг с заслонкой в сборе; 5—сопло; 6—реле; 7—дрозсель; 8—кулачок.

плунжеры, штоки, втулки и сальники), изготавливаются из нержавеющей сталей, а также какого-либо из вышеупомянутых сплавов. Посадочные поверхности часто покрываются стеллитом¹ или аналогичным сплавом.

Конструкция и некоторые характеристики наиболее распространенных регулирующих клапанов приведены в табл. V-21.

ПРИВОДЫ КЛАПАНОВ

Приводы клапанов приводятся в действие сжатым воздухом, электрической или гидравлической энергией. Чаще всего в системах автоматического регулирования используются пневматические приводы. Иногда применяются автономные электрогидравлические приводы, снабженные электродвигателем для подачи жидкости, но это не всегда экономически выгодно.

¹ Твердый сплав, содержащий хром, вольфрам и кобальт. — Прим. ред.

Продолжение

Обозначение	Тип конструкции	Конструктивные ограничения	Преимущества и применение
e	Электрогидравлический привод.	Высокая стоимость конструкции и ухода. Тяжелое и громоздкое устройство.	Требует затрат только электрической энергии. Часто используется при дистанционной передаче сигналов
f	Механический рычаг	Требует приложения значительной силы к концу рычага и больших перемещений.	Обычно употребляется в поплавковых системах регулирования уровня в открытых емкостях или при небольших давлениях в закрытых сосудах.

Наиболее широко распространен простейший мембранный привод с противодействующей пружиной, хотя мощность его невелика. Пневматические приводы поршневого типа со встроенными «позиционерами», работающими на принципе балансирования давлений, применяются наиболее часто, особенно в химической промышленности. В этих приборах используется воздух под высоким давлением и создаются относительно большие усилия. Конструкция и характеристики некоторых простых приводов приведены в табл. V-22.

ПОЗИЦИОНЕРЫ

Позиционер — это усилитель мощности с обратной связью по положению регулирующего органа. Он питается сжатым воздухом (вспомогательный источник энергии); обратная связь осуществляется через шток клапана. Обычно позиционер крепится непосредственно к корпусу клапана (к стенке или к крышке). Позиционер обеспечивает перемещение плунжера клапана

пропорционально управляющему сигналу; при этом мощность дополнительного источника энергии используется для преодоления гистерезиса, трения или небаланса в механизмах клапана.

Соотношение между сигналом управления и движением штока обычно линейное, но дополнительные звенья обратной связи (типа кулачка) на некоторых моделях позиционеров позволяют изменить характеристику клапана. Это может оказаться очень полезным при необходимости стабилизации всей системы автоматического регулирования.

Позиционеры клапанов обычно разделяются на позиционеры для односедельных клапанов, где требуются значительные усилия на штоке, позиционеры для крупных клапанов, где привод при срабатывании потребляет большой объем воздуха, позиционеры для систем автоматического регулирования, где требуется (по условиям ведения процесса) высокая точность перемещения клапана, и позиционеры для устройств, где клапаны должны иметь специальные характеристики (рис. V-187).

ОСНАЩЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИБОРАМИ

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВКИ АППАРАТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Аппаратура управления обычно оказывает значительное влияние на работу предприятия:

1. Снижается стоимость оборудования за счет исключения промежуточных складов, излишних емкостей и резервного оборудования, отсутствия очистных сооружений или благодаря выполнению тех операций, которые нельзя было осуществлять ранее.

2. Уменьшается оборотный капитал благодаря повышению оперативности управления производством и снижению затрат на инвентарь.

3. Снижаются затраты на материалы из-за сведения до минимума отходов и увеличения выхода продукта.

4. Качество продукции поддерживается на минимальном приемлемом уровне.

5. Производство перестраивается в соответствии с изменениями в качестве сырья.

6. Снижаются издержки производства за счет увеличения эффективности труда и упрощения операций.

7. Удлиняется межремонтный цикл.

8. Снижается расход потребляемой энергии.

9. Увеличивается количество выпускаемой продукции, приходящейся на единицу вложенных в оборудование средств.

10. Модернизируются устаревшие операции.

Большее половины аппаратуры, используемой на химических заводах, установлено менее 10 лет тому назад.

На автоматизированном заводе приборы управляют ходом процесса и обеспечивают заданное качество продукции. Следующим логическим шагом является поддержание экономического оптимума работы завода, который часто отличается от инженерного оптимума.

УПРАВЛЕНИЕ ПРИБОРНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ

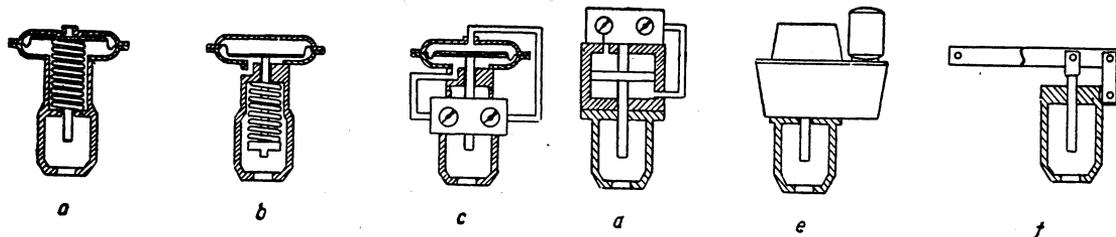
На всех, даже самых небольших химических предприятиях создание систем автоматического регулирования, работа с системами и поддержание их работоспособности возлагаются обычно на специальный отдел. Этот отдел (отдел КИП) ближе к производственным цехам, чем к системе обслуживания. Так происходит потому, что управление процессом является органи-

Продолжение

Обозначение	Тип конструкции	Конструктивные ограничения	Преимущества и применение
<i>f</i>	Односедельный клапан с резьбовыми соединениями; корпус шаровой (<i>f</i> —1) или угловой (<i>f</i> —2).	Максимальные размеры 50 мм. Крепление резьбовое или сваркой.	Отливается из нелегкоплавких сплавов (типа монель-металла). Дешев.
<i>g</i>	Односедельный клапан; корпус угловой с фланцевыми соединениями.	Обычно встречается с отверстиями меньше 25 мм.	Используется для сброса из аммиачного или полиэтиленового реактора, а также для других систем с высоким давлением.
<i>h</i>	Трехходовой корпус; переделан из односедельного шарообразного корпуса.	Давления не сбалансированы.	2 входа и 1 выход. Применяется для смешивания потоков, как в случае регулирования температуры.
<i>i</i>	Трехходовой корпус; переделан из двухседельного шарообразного корпуса.	Давления не сбалансированы.	1 вход и 2 выхода. Используется при разделении потоков, например в теплообменнике при направлении потока в обводный канал.
<i>j</i>	Конструкция с диафрагмой (по патенту Саундерса).	Температурные ограничения — в соответствии с материалом диафрагмы. Статическое давление ограничено мощностью привода.	Может быть футерован пластмассой. Используется для шламов и агрессивных сред.
<i>k</i>	Заслонка; корпус в виде фланца.	Непригоден для больших давлений.	Экономичен при больших размерах. Может иметь резиновый шнур в качестве прокладки.

Приводы клапанов

ТАБЛИЦА V-22



Обозначение	Тип конструкции	Конструктивные ограничения	Преимущества и применение
<i>a</i>	Давление воздуха на мембрану перемещает шток вниз.	Усилие ограничено. Пружина частично поглощает энергию давления.	Простота и надежность. Движение вверх происходит при ослаблении рабочего давления. Широко используется в системах регулирования.
<i>b</i>	Давление воздуха на мембрану перемещает шток вверх.	Усилие ограничено. Пружина частично поглощает энергию давления.	Движение вниз ¹ происходит при ослаблении рабочего давления.
<i>c</i>	Безпружинная конструкция или мембрана с уравновешенным давлением.	Желательно использовать с позиционером.	Обладает большей мощностью, чем пружинные конструкции.
<i>d</i>	Уравновешенный поршень.	Желательно использовать с позиционером.	Использует высокие давления и обладает максимальной мощностью. Широко используется в химической промышленности.

¹ В оригинале—вверх.—Прим. ред.

Штат отдела КИП химического завода

Должность	Качества	Обучение	Опыт	Функции	Взаимоотношения
Механик	Способный к механике, ловкие руки, любознательный и способный к быстрому обучению.	Использованию инструментов, арифметическим действиям, основам механики, физики, электричества, черчению.	Ремонта и проверки, поиска неисправностей и настройки широкого ассортимента приборов для различных процессов	Обеспечение готовности приборов и их удовлетворительной работы.	Работает вместе с заводскими операторами и подчиняется мастеру и технику.
Техник	Проворный, спокойный, способный к логическому мышлению.	Использованию тест-оборудования, математике, электронике, химии, особенностям процессов, измерениям и управлению технологическими процессами.	Работы с оборудованием, определения неисправностей в приборах и оборудовании, ремонта комплексных систем, совместной работы со знающими инженерами.	Уход за специальным оборудованием. Определение его неисправностей, обеспечение оптимальных рабочих характеристик и максимальной продолжительности безотказной работы.	Работает вместе с заводскими операторами, устраняет неисправности приборов.
Инженер-ремонтник	Деловитый, внимательный, быстро схватывающий суть дела, умеющий убеждать.	Основам инженерного дела, принципам измерения, управления и контроля эксплуатации оборудования.	Ответственной работы по организации ремонтных мероприятий, наблюдения за подключением и работой приборов.	Организация наиболее экономичных режимов работы и приспособление оборудования и приборов к изменяющимся условиям.	Координирует программу по поддержанию максимальной экономии при соблюдении рабочих требований к приборам.
Инженер-проектировщик	Педантичный, решительный, с чувством коллективизма, понятливый, способный использовать помощь специалистов.	Основам инженерного дела, технологическим процессам, взаимодействию элементов оборудования и приборов, измерениям, автоматическому регулированию и конструированию.	Работы с процессами, оснащенными приборами, расчета и конструирования установок автоматического регулирования, тесной связи с инженерами-производственниками.	Обеспечение проектируемых заводов и процессов приборами для экономичности эффективной их работы.	Получает информацию от цеховых инженеров; определяет потребность в аппаратуре.
Инженер-эксплуатационник	Эрудированный, аналитик, пытливый, методичный, способный убеждать, вдумчивый, уверенный (смелый).	Инженерной химии, теории автоматического регулирования, методам измерений, расширенному курсу математики, использованию вычислительных машин.	Работы с процессами и их оборудованием, оценки и использования приборов, заводских испытаний, использования аналоговых вычислительных машин, частотных характеристик и корреляционного анализа.	Исследование и оценка пригодности контрольно-измерительных и управляющих приборов к требованиям процесса. Определение методов и систем, наиболее приемлемых для данных задач.	Определяет требования технологического процесса совместно с инженером-химиком. Рассчитывает исходные данные для инженера-проектировщика.
Инженер-исследователь	Терпеливый, пытливый, изобретательный, обладает творческими способностями, имеет склонность к научной работе.	Механике, физической химии, электронике, динамике, расширенному курсу математики.	Разработки электронных цепей, аналитических приборов, автоматических контрольных систем и специальных методов измерения.	Разработка аппаратуры для обслуживания процесса, если имеющиеся в продаже приборы неприменимы.	Программа его действий базируется на рекомендациях инженера-эксплуатационника и анализе требований процесса.
Специалист по системам управления	Аналитический и логический ум, сообразителен, реалистичен, способен ясно формулировать идеи.	Математике, статистике, инженерной химии, использованию вычислительных машин, анализу процессов, углубленному анализу систем автоматического управления.	Использования аналоговых и цифровых вычислительных машин, анализа динамики химических процессов, корреляционной техники, эксплуатации систем.	Анализ условий автоматического управления процессом для оптимизации работы существующих и проектируемых блоков.	Исследует управляемость процесса и определяет вид регулирования совместно с инженером-исследователем.
Специалист по аналитическим приборам	Научный подход к проблемам, изобретателен, терпелив, систематичен, глубокий интерес к физике и химии.	Физике, химии, физической химии, ядерной технике, электронике, математике, расширенному курсу аналитической химии.	Лабораторных анализов, разработки электронных схем, производства, установки и использования специальных аналитических приборов.	Выбор аналитических методов и определение пригодности приборов для анализа хода процессов.	Работает совместно с инженером-проектировщиком или техническим отделом завода для определения потребностей в аналитических приборах.

ческой частью самого производства, и потому, что интерпретация показаний измерительных устройств и настройка заданных значений или других параметров работы системы весьма существенны для достижения целей производства, поддержания непрерывности производственного процесса и требуемых показателей качества продукции.

Один из вариантов включения отдела КИП в общезаводскую структуру управления показан на рис. V-188. Характер выполняемой отделом работы зависит от особенностей технологического процесса, сложности приборов, стоимости продуктов и других факторов. В ситуации, показанной на рис. V-188, функции отдела КИП, исключая наблюдение, можно классифицировать



Рис. V-188. Место отдела КИП и регулирования в структуре крупного промышленного предприятия.

Отдел КИП должен выполнять инженерные работы, в том числе совершенствовать контрольно-измерительную и регулируемую аппаратуру, анализировать систему автоматического управления, разрабатывать проекты систем и поддерживать их работоспособность.

Для специалистов, работающих на предприятиях химической промышленности, считается необходимым знание следующих дисциплин: 1) физической химии, гидродинамики, процессов тепло- и массопередачи и различных процессов химической технологии; 2) аналитических методов, необходимых для определения статических и динамических зависимостей между переменными в комплексных химических реакциях и 3) прикладной математики и статистики для оценки зависимостей между переменными. Фундаментальные знания физики и механики приборов, естественно, также необходимы.

в соответствии с кратким описанием, данным в табл. V-23. Некоторые главные аспекты работы отдела контрольно-измерительных и регулирующих приборов кратко описываются ниже.

Подразделение для совершенствования приборов необходимо на химическом предприятии; его задача — снабжение специальным оборудованием, требующимся для исследовательской работы и управления процессами, если такое оборудование не выпускается промышленностью. Создаются следующие виды специального оборудования: 1) сконструированные по особым требованиям контрольные приборы; 2) уникальные датчики; 3) принципиально новые виды приборов, конструкция которых обещает более высокое качество работы; 4) специальные комбинации и сочетания из имеющихся в продаже приборов с целью приспособить их к частным случаям применения; 5) приборы собственных

ложений, направленных на удешевление и упрощение системы управления. Предлагается применять стандартные изделия и установки. Стандартные обозначения и терминология упрощают изготовление чертежей. Однотипные технические задачи решаются одинаковыми техническими средствами; все требования, насколько это возможно, упрощаются, чтобы обеспечить возможность использования нескольких однотипных приборов вместо сложных устройств.

Требования к проекту уточняются по мере его разработки. Основные характеристики известны с самого начала, а решения общего характера отыскиваются на последующих этапах разработки, причем выбор проектируемой контрольно-измерительной аппаратуры многократно варьируется. Рассмотрение вопроса о возможности создания системы регулирования при планируемом оборудовании на ранних стадиях разработки проекта облегчает эти трудности. Для исследования возможных вариантов с установлением количественного критерия «регулируемости» применяются аналоговые и цифровые вычислительные устройства, представляющие собой эффективное средство для нахождения оптимального решения. Дополнительным способом проверки является построение уменьшенной модели. Такими способами увеличиваются эффективность и полезность проекта. Выгода от применения модели заключается еще и в том, что с ее помощью отыскиваются пути преодоления помех и создается зримый образ будущей системы.

Прийти к соглашению касательно основного направления проектирования в самом начале может помочь весьма недорогой метод представления идеи с помощью блок-схем и таблиц. На промежуточной стадии представляется выгодным с помощью различных элементов и трубопроводов строить упрощенные макеты. Вопросы последовательности операций, использования гидравлических и механических устройств, степени участия оператора, пригодности для ремонта, безопасности и возможности расширения функций на этом этапе должны быть решены заново. Окончательная модель представляет собой точную копию проектируемой системы: размещены трубы и электрические кабели, выбрано место для измерительных и управляющих приборов; принято решение о размещении и размерах подсобной аппаратуры и, наконец, составлен план наиболее эффективной последовательности этапов конструирования. Специальные аппараты фотографируют модель, что служит полем спорам для изготовления чертежей, составления списка материалов и уточнения деталей установки.

Группа инженеров-проектировщиков должна работать оперативно и быстро, чтобы свести к минимуму стоимость разработки. Лучше всего это достигается исключением всех специализированных разработок и научных изысканий из круга обязанностей проектной организации, но не до такой степени, чтобы отстранить тех специалистов, в которых испытывается нужда. Обычно специалисты и специальное оборудование используются в программах научных исследований и для консультаций, которые часто финансируются из фондов корпорации, что понижает стоимость проектирования.

Так как в течение года появляется до тысячи новых приборов, ни одно проектное подразделение не может эффективно работать, не имея сведений о новых разработках. Оборудование, с которым работает заводская испытательная группа, может быть использовано для сравнительной оценки приборов с точки зрения целей проектирования, а также и для оценки их динамических характеристик при анализе замкнутых систем.

ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ АППАРАТУРЫ

Существуют две существенно различающиеся концепции ухода за аппаратурой на химическом заводе. В соответствии с принятой формой обслуживания аппаратуры одна концепция сводится к выполнению всех работ по строгому графику, и эффективность этого подхода к делу оценивается по снижению стоимости обслуживания и уменьшению частоты отказов аппаратуры. Другая концепция обращает особое внимание на продолжительность бесперебойной работы аппаратуры, даже при больших затратах на уход за ней, и эффективность этой формы оценивается по производительности завода.

Где это возможно, применяется разумный компромисс между двумя крайними тенденциями. Руководство должно бдительно следить за источниками различных неполадок; оно должно иметь возможность осуществлять необходимые меры для ограничения их влияния. Первая концепция (назовем ее концепцией эффективности ухода за аппаратурой) поддерживается теми людьми, которые считают, что большая часть неполадок может быть исключена, если заранее принять необходимые меры воздействия при любой возможной ситуации. Другая концепция (назовем ее рабочей) поддерживается теми, кто заинтересован в том, чтобы за счет повышения стоимости ремонта предотвратить потери продукции. Эти работники должны постоянно наблюдать за поведением аппаратуры и обнаруживать начальные признаки нарушения ее функций; их цель — предотвращение необходимости ремонта. Естественно, постоянный надзор дорого обходится, так как требует затрат труда на обслуживание, но это уравновешивается предотвращением крупного ремонта или удлинения перерывов в работе завода.

Личный состав групп по ремонту и обслуживанию аппаратуры. Некоторые организации объединяют функции оперативного наблюдения и технического контроля в одну, устанавливая этим чисто техническую ответственность за работу аппаратуры. Настройка регуляторов, установление пределов измерений, поиск неисправностей и местный ремонт являются сферой деятельности специального подразделения, которое ответственно перед лицами, руководящими ведением процесса, но управляется центральной организацией, обслуживающей аппаратуру. По общему признанию, эта двойная ответственность может порождать взаимонепонимание, но зато приводит вместо раскола к тесной кооперации между службой ухода за аппаратурой и службой управления процессом.

Уход за аппаратурой является одной из тех задач, которые невозможно выполнять в совершенстве. Новая техника, новые приборы, построенные на новых принципах, постоянно затрудняют работу группы технического обслуживания.

Обучение уходу за аппаратурой. Обучение уходу за аппаратурой начинается за 6 месяцев до начала работы новой установки. Типовая программа обучения приводится в табл. V-24. Обучение проводят опытные инженеры-прибористы, прошедшие к тому же дополнительный курс основ преподавания. Программа призвана освежить необходимые знания в области математики, физики, химии и электроники; она включает в себя принципы работы установки и практическую работу с ней, обслуживание установки и методы обращения с каждым из приборов для самых разнообразных ситуаций, возникающих в производстве. Программа предусматривает также рассмотрение и оценку возможных источников ошибок и методы устранения наиболее

разработок и 6) некоторые исследовательские¹ разработки, которые не имеют видимой связи с текущей работой, но могут оказаться полезными в дальнейшем.

Как правило, для успешной разработки приборов необходимо следующее оборудование: 1) ряд первичных и вторичных приборов (эталонных и образцовых), а также лабораторные градуировочные установки и контрольные приборы для воспроизведения веса, температуры, напряжения, сопротивления, давления, емкости и газовых постоянных; 2) инфракрасный спектрофотометр; 3) масс-спектрометр; 4) эмиссионный спектрометр; 5) хроматограф; 6) источники излучения и детекторы; 7) прецизионные электронизмерительные приборы; 8) оборудование для измерения pH, а также характеристик окислительно-восстановительных процессов; 9) приборы для химического анализа и 10) электрическое и электронное тест-оборудование.

Получение данных в созданной для этого лаборатории о работе опытных и промышленных установок является важной частью исследований и часто позволяет установить причину наблюдаемых в работе предприятия ненормальностей. Многие организации имеют переносную испытательную аппаратуру, с помощью которой могут быть получены экспериментальные данные о работе целого ряда действующих установок. Если установка состоит из отдельных портативных блоков, то их можно доставить на испытательный участок и там проверить. Практикуется также метод включения на некоторое время в новое оборудование специальных приборов. Эти приборы используются для записи результатов экспериментов в начале работы установки при подаче на нее специальных возмущений, а также для регистрации поведения установки в наиболее сложных условиях. После того как оно послужило свою службу, тест-оборудование демонтируется и сохраняется для повторного использования в последующих конструкциях. Второй способ (проверка установок по блокам) наиболее употребителен благодаря максимальной гибкости и возможности частых проверок.

При использовании портативного тест-оборудования желательно иметь вычислительный центр для обработки данных. Тест-оборудование необходимо также при проверке рабочих характеристик контрольных приборов и частотных характеристик систем. Аналоговое вычислительное устройство нецелесообразно для исследования проблем автоматического управления процессами и выявления исходных данных для расчетов заводского оборудования.

Обычно для этих целей употребляется следующее оборудование (далеко не полный список): 1) инфракрасный анализатор с набором излучателей и приемников; 2) ультрафиолетовый анализатор с набором излучателей и приемников; 3) рефрактометр; 4) газовый хроматограф; 5) pH-метр; 6) термокондуктометрический газоанализатор; 7) термоманнитный газоанализатор (на кислород); 8) газоанализатор Орса; 9) эксплозиметр; 10) мост для измерения электрической проводимости с магазином сопротивлений; 11) комплект быстродействующих датчиков давления, температуры и расхода; 12) источники радиации и устройства для ее обнаружения; 13) самопишущий вискозиметр; 14) разнообразные преобразователи и конверторы; 15) быстродействующие записывающие устройства; 16) источники питания; 17) многоканальные регистраторы электрического напряжения и пневматического давления; 18) двухкоординатный самописец; 19) генераторы си-

гналов; 20) отсчетные устройства; 21) осциллографы; 22) радиационные пирометры; 23) магазины нагрузок; 24) плотномеры; 25) датчики времени и программные регуляторы.

Вычислительный центр, предназначенный для работы с испытательным оборудованием, используется и для других работ и обычно включает в себя следующий комплект оборудования¹:

1. Аналоговое вычислительное устройство со следующими компонентами:

- от 100 до 200 операционных усилителей;
- от 50 до 100 умножителей;
- от 25 до 50 операционных реле;
- от 25 до 50 функциональных генераторов;
- от 25 до 50 операционных переключателей;
- от 2 до 3 отдельных панелей управления;
- от 3 до 4 координатных регистраторов;
- от 12 до 18 каналов записи.

2. Цифровое вычислительное устройство с максимальными объемом памяти и емкостью.

Вычислительный центр служит для решения разнообразных задач — от расчетов диаметров отверстий сопла до моделирования системы управления процессом, включая расчеты кинетики химических реакций, энергетического и материального баланса, характеристик регуляторов. Помимо решения математических уравнений инженеры-химики используют вычислительную машину в основном для исследования механизма физических или химических процессов, дабы уяснить себе их течение и, следовательно, быть более уверенными в своих расчетах и в правильности выбранной методики. Такая исследовательская работа помогает развитию и накоплению знаний, которые необходимы для расчета систем регулирования процессов.

Кроме разработки математических моделей, вычислительный центр используется для обучения и тренировки операторов. Можно подготовить динамические модели управления и воспроизвести все варианты ситуаций, чтобы обучить оператора правильно и быстро выбирать способ воздействия для преодоления возникших отклонений. Число экспериментов может быть достаточно большим, чтобы аварийные ситуации оказались отработанными с максимальной степенью безопасности. Различные варианты управления могут быть продемонстрированы и оценены. Это важно при конструировании нового оборудования, когда должно быть достигнуто единодушное мнение о методах воздействия и исключена длительная дискуссия о сравнительной ценности всех возможных решений. Это легко достигается путем «проигрывания» вариантов с помощью вычислительной машины.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Проектирование приборной части новых химических процессов (контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры) требует затрат на инженерные разработки и комплектующие изделия, значительно превышающих стоимость самих приборов. Возникающие при проектировании проблемы вызывают появление пред-

¹ Никакой вычислительный центр не в состоянии достаточно полно удовлетворить постоянно возникающие при проведении исследований новые потребности, поэтому такие вычислительные комплексы требуют систематического пополнения оборудования.

Продолжение

Предмет	Количество часов		Предмет	Количество часов	
	клас- сные занятия	практи- ческие занятия		клас- сные занятия	практи- ческие занятия
Обслуживание позиционера клапана	6	4	Поиск неисправностей в усилителях	6	3
Обслуживание различных устройств управления	8	2	Поиск неисправностей в источниках питания	2	2
Практика управления процессами	6	4	Действие обратной связи	2	2
Составление диаграмм замкнутых систем регулирования	6	2	Катодные повторители	2	2
Настройка регулятора	16	10	Применение тетродов и пентодов	2	2
Поиск неисправностей в системе регулирования	16	10	Поиск неисправностей в генераторах	6	3
Регуляторы с временным циклом (импульсные)	4	2	Использование лампового тестера	2	4
Блокирующие системы	4	2	Принципы термоэлектричества	2	2
Аварийные и сигнальные системы	4	2	Использование портативных потенциометров	6	4
Специализированный контроль замкнутых систем	8	0	Работа электронных потенциометров	8	4
Центр управления организацией контроля и обслуживания	16	0	Поиск неисправностей в электронных потенциометрах	8	8
<i>Электричество и электроника</i>			Поиск неисправностей в мостах сопротивлений	8	4
Постоянный ток	8	0	Поиск неисправностей в емкостных мостах	8	4
Последовательные цепи постоянного тока	2	2	Поиск неисправностей во взаимосвязанных системах	4	2
Параллельные цепи постоянного тока	2	2	Практика установки электрических приборов	8	0
Применение закона Ома	2	2	Теория электронных систем управления	4	0
Измерение мощности постоянного тока	2	2	Работа электронного регулятора	16	4
Переменный ток	4	2	Настройка регулятора	4	2
Соотношение между силой тока и напряжением	4	2	Поиск неисправностей в регуляторе	12	6
Индуктивность, емкость, импеданс	2	2	Электрические исполнительные механизмы для управляющих клапанов	4	2
Поиск неисправностей в цепях переменного тока	6	4	Электропневматические преобразователи	2	2
Теория электромагнетизма	8	2	Контроль замкнутых систем	2	2
Трансформаторы	2	2	Поиск неисправностей в замкнутых системах	16	8
Использование ламповых вольтметров	2	2	Центр управления организацией контроля и обслуживания	16	0
Использование осциллографов	8	4	<i>Аналитические приборы</i>		
RC-цепочки	8	2	Принципы рН-измерений	4	4
Емкостные цепи	8	4	Поиск неисправностей в рН-метре	4	4
Характеристики диодов и их использование	8	4	Поиск неисправностей в измерителях электропроводности	2	2
Фильтры	2	2	Поиск неисправностей в фотоэлектрических приборах	2	2
Выпрямители	2	2	Основы химического анализа	16	2
Делители напряжения	2	2	Термокондуктометрические газоанализаторы	8	4
Источники постоянного тока	2	2	Фотоэлектрические анализаторы	8	4
Характеристики триодов и их использование	4	4	Инфракрасные анализаторы	16	8
Усилители с RC-связью	2	2	Приборы для измерения α - и β -радиации	16	8
Практика использования усилителей	2	2			
Действие управляющей сетки	2	2			

характерных из них. В программу включено обучение испытательным проверкам (тестам) и практике распознавания отказов. Учащиеся принимают участие также в процедурах включения установки и проверки оборо-

дования. Это наиболее ценный период из всех стадий обучения.

Неоценимым для обучения прибором как для техников-прибористов, так и для операторов является

Программа обучения механика по системам управления

Предмет	Количество часов		Предмет	Количество часов	
	клас- сные занятия	практи- ческие занятия		клас- сные занятия	практи- ческие занятия
<i>Математика</i>					
Десятичные и простые дроби	2	0	Использование расходомеров постоянно- янного перепада давлений	2	2
Отношения, пропорции, проценты	2	0	Обслуживание стеклянных ротамет- ров	6	4
Квадраты чисел и квадратные корни	2	0	Обслуживание металлических рота- метров	6	4
Расчет площадей и объемов	2	0	Обслуживание преобразователей расхода	18	6
Графики и тарировочные кривые	2	0	Обслуживание измерителей с пере- менным проходным сечением	6	4
Размерности и перевод единиц	2	0			
<i>Давление</i>			<i>Уровни</i>		
Основные понятия	2	0	Основы измерения уровней	2	0
Использование манометров	4	2	Обслуживание гидростатических уровнемеров	2	2
Использование приборов с упругой деформацией чувствительного эле- мента	2	4	Практика использования уровнеме- ров барботажного типа	6	2
Использование установок для про- верки приборов давления	4	2	Практика использования уровнеме- ров с шаровым поплавком	4	4
Обслуживание и ремонт манометров	6	4	Практика использования уровнеме- ров с поплавком переменного по- гружения	8	6
Обслуживание и ремонт приборов, записывающих давление	4	4	Практика использования поплавко- вых уровнемеров с механическим приводом	6	4
Обслуживание и ремонт преобразо- вателей давления	20	16			
<i>Температура</i>			<i>Вес</i>		
Основные понятия	2	0	Основы взвешивания	2	0
Использование стеклянных и про- мышленных термометров	4	2	Практика взвешивания с набором грузов	8	6
Использование биметаллических термометров	4	2	Практика использования весовых питателей	8	6
Применение манометрических тер- мометров	2	0			
Установка жидкостных манометри- ческих термометров	2	2	<i>Автоматическое управление</i>		
Установка газонаполненных термо- метров	2	2	Практика использования приборов, питаемых воздухом	4	0
Использование оборудования для проверки термометров	4	2	Основы пневматического управления	2	0
Обслуживание преобразователей температуры	4	4	Работа пневматического регулятора	2	2
Обслуживание приборов, записы- вающих температуру	6	4	Обслуживание регуляторов давле- ния	2	2
			Обслуживание регуляторов темпе- ратуры	2	2
<i>Потоки</i>			Работа регулятора релейного типа	2	4
Основы измерения потоков	2	0	Механизмы регулятора	4	4
Использование сужающих устройств	4	2	Цепи регулятора	4	3
Использование дифференциальных манометров	6	2	Проверка и настройка регулятора	4	4
Использование устройств для про- верки расходомеров	6	4	Обслуживание регулятора с кине- матической компенсацией	6	4
Обслуживание расходомеров (общие сведения)	2	4	Обслуживание регулятора с силовой компенсацией	6	4
Обслуживание ртутных манометров	6	4	Обслуживание специализированных регуляторов	6	4
Обслуживание манометров «кольце- вые весы»	6	4	Принципы работы управляющего клапана	2	0
Обслуживание колокольных мано- метров	6	4	Обслуживание мембранных приво- дов	8	4
Обслуживание сильфонных мано- метров	6	4	Обслуживание поршневых приводов	8	4

УПРАВЛЕНИЕ РЕКТИФИКАЦИОННЫМИ КОЛОННАМИ

Трудности управления ректификацией зависят от относительной летучести компонентов, которые подлежат разделению. Например, воду легко отделить от этиленгликоля ввиду высокой летучести воды по сравнению с гликолем. Но такие компоненты смеси, как изомеры ксилола, имеющие близкие точки кипения, гораздо труднее разделить с помощью ректификации.

Вне зависимости от того, трудным или легким является разделение жидких смесей, ректификационное оборудование обычно конструируется для каждого частного случая с учетом новейших достижений. Обеспечение чистоты продуктов разгонки во многом зависит от системы автоматического управления ректификацией. Регулированию подлежат состав, температура, давление и уровень. Эти характеристики обеспечивают высокую чистоту продукта. Бывают системы, регулирующие производительность и экономику процесса, но, как правило, главное — состав продукта.

Более сложно регулировать состав выходного продукта при возмущениях в виде изменения скорости подачи или состава питания (сырья) или в виде изменения энтальпии последнего. Такие возмущения являются внешними по отношению к ректификационной колонне. Диаграмма Мак-Кэба была предложена в качестве пособия для расчета колонн (стр. 488). Она наглядно показывает воздействия возмущений; некоторые из них рассматриваются здесь.

Обычно ректификационные колонны выдают два потока: один — верхний продукт (дистиллят), другой — нижний продукт (кубовый остаток). В этом смысле их работу можно рассматривать как простую ректификацию бинарной смеси. Понятие разделения «ключевых» компонентов представляет собой удобную форму сведения сложной проблемы разделения к простой — бинарной ректификации.

СТЕПЕНИ СВОБОДЫ В АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ

Важно определить степени свободы в выборе переменных, которыми нужно управлять. Выбор этих переменных — естественное следствие условий теплового и материального баланса в ректификационной колонне и основывается на следующем.

На рис. V-189 изображена типичная ректификационная колонна. Полный материальный баланс колонны можно записать двумя следующими уравнениями:

$$F = W + D \quad (V-30)$$

$$F x_{F_F} = W x_{W_F} + D x_{D_D} \quad (V-31)$$

где F — количество исходной смеси, *кмоль/сек*; W — количество нижнего продукта, *кмоль/сек*; D — количество верхнего продукта (дистиллята), *кмоль/сек*; x_{F_F} — молярная концентрация летучего компонента в исходной смеси; x_{D_D} — то же в верхнем продукте (дистилляте); x_{W_F} — то же в нижнем продукте.

При этом допускается, что молярные теплоемкости и скрытые теплоты парообразования всех компонентов равны между собой. Допускается также, что потерями тепла колонной можно пренебречь и что теплота смешивания компонентов пренебрежимо мала. Следовательно, поднимающийся вверх поток пара и опускающийся вниз поток жидкости в укрепляющей и исчерпывающей секциях инвариантны в каждой секции. Отсюда

следует, что тепловой баланс в колонне не зависит от состава сырьевого потока.

При этих допущениях тепловой и материальный балансы могут быть рассчитаны по следующим уравнениям:

$$L_n = (1 + b) R \quad (V-32)$$

$$V_n = D + (1 + b) R \quad (V-33)$$

$$L_m = L_n + qF \quad (V-34)$$

$$V_m = L_m - W \quad (V-35)$$

$$x_{W_F} = f \frac{L_m}{V_m} \quad (V-36)$$

$$x_{D_D} = g \frac{L_n}{V_n} \quad (V-37)$$

где V_n — скорость паров в укрепляющей секции, *кмоль/сек*; V_m — скорость паров в исчерпывающей секции, *кмоль/сек*; L_n — скорость жидкости в укрепляющей секции, *кмоль/сек*; L_m — скорость жидкости в исчерпывающей секции, *кмоль/сек*; D — скорость дистиллята, *кмоль/сек*; R — орошение флегмой, *кмоль/сек*; b — числовой коэффициент, зависящий от температуры флегмы ($b > 0$, если температура флегмы ниже температуры верха колонны); q — числовой коэффициент, зависящий от энтальпии жидкости, подаваемой на разгонку ($q > 1$, если температура подаваемой смеси ниже, чем на тарелке питания; $q = 1$, если состав и температура подаваемой смеси и жидкости на тарелке питания идентичны; $1 > q > 0$, если поступающая в колонну смесь находится в частично испаренном состоянии; $q = 0$, если исходная смесь подается в виде пара, $q < 0$, если пар перегрет); f и g — коэффициенты, учитывающие функциональные соотношения, зависящие от конструктивных особенностей колонны (от числа тарелок в колонне, размещения контрольных тарелок, положения тарелки питания, а также от температуры или других заданных условий для контрольных тарелок).

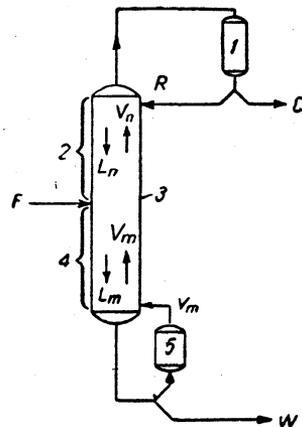


Рис. V-189. Типичная ректификационная колонна:

1 — конденсатор; 2 — укрепляющая секция; 3 — ректификационная тарелка; 4 — исчерпывающая секция; 5 — куб.

С точки зрения регулирования названные выше особенности являются постоянными. К примеру, автоматическое регулирование не должно изменять подачу смеси в колонну при отклонении от оптимального режима работы. Расположение контрольных тарелок также обычно не меняется. Даже температура этих тарелок обычно считается постоянной, хотя можно считать ее переменной и вводить обратную связь для ее регулирования. Считая факторы, от которых зависят f и g , постоянными, мы тем самым считаем постоянными и сами величины f и g . Следовательно, они должны быть

вычислительная машина, способная моделировать процесс управления. С ее помощью инструктор может смоделировать любую ситуацию в процессе управления. Оператор при этом обучается распознаванию ситуаций, а также отысканию и выполнению соответствующих корректирующих действий. Техник же просто приобретает опыт и вдобавок убеждение, что таких случаев, когда вся аппаратура работает нормально, не бывает.

Для программы обучения требуются кинофильмы, диафильмы, действующие модели, наборы инструментов и другие различные устройства. Пособия в форме комплексов лекций, озвученных фильмов и различных демонстрационных материалов могут составляться специализированными организациями, фирмами-изготовителями, различными научными институтами, профессиональными училищами и т. д. Содержание курса должно быть приспособлено к конкретным требованиям каждого химического завода. Только после составления полной и конкретной программы будет выгодно и полезно затратить время на проведение одного или нескольких курсов изучения оборудования, применяемого заводом.

Ремонтное и вспомогательное оборудование. Оснащение и мощность мастерской по ремонту приборов зависят от объема и характера работы, которую ей приходится выполнять. Большая часть организаций предпочитает иметь самостоятельные мастерские для ремонта приборов. Рассмотрим требования к мастерской рядового крупного завода. Она должна быть расположена поблизости от подразделения, ремонтирующего оборудование, и от центрального склада материалов. Тяжелые детали должны разгружаться у входа в мастерскую и с помощью крана транспортироваться к месту обработки; предварительно детали должны быть очищены. Для крепления различных управляющих клапанов, измерителей и других тяжелых устройств должны применяться специальные ински и патроны. Для очистки следует использовать пар и ультразвук. Градуировочные стенды для расходомеров должны быть обеспечены питанием (газом и жидкостью).

Все рабочие стенды необходимо конструировать с учетом конкретных нужд. Они должны быть снабжены точными регуляторами подачи воздуха и образцовыми манометрами для широкого диапазона давлений. Здесь же находятся соединительная арматура и специальные приспособления для подсоединения наиболее распространенных приборов. Электропитание и измерительные приборы устанавливаются на рабочих местах, а основное электрооборудование для ремонтных работ размещается в отдельной комнате.

Поверочные установки для расходомеров, применяемых на химических заводах, обычно рассчитываются на меньшие расходы, чем при переработке нефти. Для обеспечения всех нужд производства надо иметь запас различных ротаметров, сухих газовых счетчиков, измерителей влажности, приборов для взвешивания, пару градуировочных емкостей и газометры. Стенды для проверки измерителей давления снабжаются точными образцовыми манометрами, грузопоршневыми или чашечными манометрами и могут служить для контроля измерителей как статического давления, так и разности давлений. Для градуировки термометров используют обычно небольшую муфельную печь, масляную ванну или ванну с расплавами солей, а также поверочную установку, в состав которой входят образцовые термометры, термпары, прецизионные мосты сопротивлений и потенциометры.

Производить ремонт электрического и электронного оборудования в отдельном помещении рекомендуется в интересах чистоты и защиты от шумов и вибраций, а также для предупреждения несчастных случаев; поражения током высокого напряжения могут наблюдаться в сыром или неправильно оборудованном помещении. Во избежание взрывов в загазованных помещениях для работы с электрическим оборудованием применяются специальные инструменты и приспособления. Часто требуются также защитные кофухи и вентиляционные устройства, так как многие электронные приборы, используемые для анализа хода процесса, должны поверяться по стандартным смесям, в составе которых могут быть ядовитые, огнеопасные или взрывчатые вещества. Переносное радиолобирование и радиотелеметрические системы также находятся в ведении приборной мастерской. Для них, а также для других многочисленных систем (противопожарных, аварийных, защитных, телевизионных, метеорологических, вычислительных и других) требуется стандартное тест-оборудование.

Ремонтная документация. Несмотря на трудности отчисления ремонтных затрат от затрат на профилактические мероприятия, все-таки целесообразно регулярно вести ремонтную документацию. Эти записи полезно хотя бы регулярно просматривать.

Назначение документации:

- 1) служить главным источником первичных данных и характеристик;
- 2) представлять собой перечень характеристик оборудования по стойкости к коррозии и износоустойчивости при различных условиях ведения процесса и организации ремонта;
- 3) содержать данные для сравнения различных модификаций приборов, а также для сравнения различных видов обслуживания приборов;
- 4) являться основой для планирования проверок автоматических систем и профилактических ремонтных работ;
- 5) служить материалом для оценки различных конструкций и обоснованием требований о переделке или изменении конструкций;
- 6) являться основой для оценки устойчивости работы оборудования и для предсказания отказов.

Даже для предприятия средних размеров целесообразно занести данные о приборах (или узлах) в форме кода на перфокарты или другие устройства, позволяющие вести механическую обработку данных. Код может заключать в себе данные критических режимов настройки, смены деталей или ремонтных операций и данные о работе; эти данные могут исследоваться с помощью вычислительной машины. При этом могут выявиться некоторые общие положения и тенденции. Информация о затратах будет напоминать лицам, ответственным за работу системы, что затраты по ремонту, как правило, больше затрат на анализ процесса и правильную настройку системы.

Стандартизация приборов, узлов, деталей, сигналов. Проектирование всех систем для химической промышленности значительно упрощается с помощью стандартизации. Заводы-изготовители химических приборов должны совместно с химическими заводами вводить в практику стандартизацию. Стандартизовать следует как целые приборы, так и отдельные узлы, детали и даже сигналы. При этом можно использовать вычислительные машины для накопления, обработки и выдачи справочных данных по стандартам.

женной указателем изменения состава в колонне относительно фиксированного состава жидкости в баллоне, можно получить чувствительный прибор, показания которого не зависят от небольших изменений абсолютного рабочего давления.

РЕГУЛИРОВАНИЕ СОСТАВА

Рассматриваемые далее системы регулирования основываются на измерении температуры для определения состава материала, однако могут быть с успехом созданы системы, использующие другой принцип измерения состава. Регулирование состава продукта обычно осуществляется путем изменения скоростей парообразования и (или) орошения, вследствие чего относительные скорости потоков жидкости и пара, проходящих через колонну, также изменяются.

Типовые системы автоматического регулирования составов. На рис. V-191 и V-192 показаны регуляторы, которые воздействуют на состав продукта. Другие аспекты управления ректификационной колонной будут рассмотрены позже. На рис. V-191 состав дистиллята, определенный посредством температурного датчика, размещенного в колонне, регулируется с помощью изменения орошения флегмой. Подобно этому, состав кубового остатка регулируется с помощью изменения скорости парообразования (рис. V-192, а) или подачи смеси (рис. V-192, б).

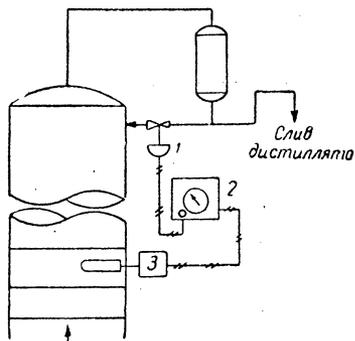


Рис. V-191. Автоматическое регулирование состава дистиллята:

1 — управление флегмой; 2 — регулятор; 3 — датчик температуры.

Целесообразно обеспечить автоматическое регулирование всего процесса ректификации. При разделении бинарной смеси это нетрудно осуществить, но такие случаи бывают сравнительно редко. Если исходная смесь, подаваемая в колонну, содержит примеси, летучесть которых находится в интервале между летучестью разделяемых компонентов, то автоматическое регулирование испарения и орошения затруднено. Регулирование орошения способствует возврату примеси в колонну, в то время как регулирование испарения способствует выводу примеси из колонны. В результате примеси скапливаются в середине колонны и мешают разделению.

Можно применить регулирование, при котором непрерывно или периодически определяется температура в средней части колонны и производится очистка от скопившихся там примесей (так называемые «пастериза-

ционные колонны»). Если скапливающихся примесей немного, неэкономично отказываться от такой очистки без повторной ректификации. Другим решением является отвод продуктов с промежуточной летучестью (часто вместе с остатком и дистиллятом) и, если это оправдано, установление добавочной колонны для их разделения. Окончательный выбор, конечно, решает сравнение экономичности этих двух методов.

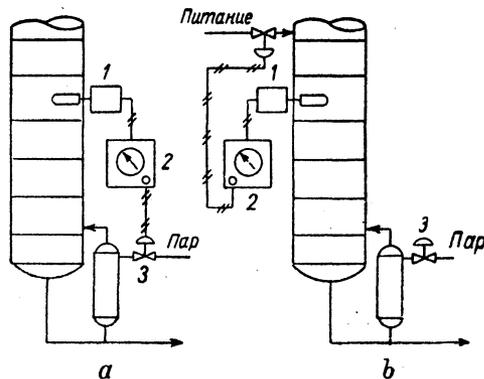


Рис. V-192. Автоматическое регулирование состава нижнего продукта:

1 — датчик температуры; 2 — регулятор; 3 — управление потоком пара.

Данное описание относится к разделению двух компонентов при наличии примесей с промежуточной летучестью, но его можно применить и к выделению одного компонента из многокомпонентных смесей.

Размещение температурных датчиков состава. Для регуляторов состава дистиллята и кубового остатка общим является тот факт, что измерение температуры производится не непосредственно в выходном продукте, а в колонне, несколькими тарелками ниже или выше. Обычно поток продукта при бинарном разделении относительно чист и изменение концентрации продукта не сильно изменяет точку его кипения. Размещение температурных датчиков несколькими тарелками ниже позволяет получать большее изменение температуры при том же изменении состава продукта.

Определение состава продукта в этой точке колонны позволяет поддерживать состав выходного продукта колонны достаточно точно даже при довольно больших изменениях других факторов, например, потоков жидкости и пара.

Размещение датчиков лучше всего производить на основе графика изменения температуры в колонне, которым должен располагать каждый разработчик системы управления колонной. На рис. V-193 показан типичный температурный график для ректификационной колонны. Как указывалось выше, температурный датчик надо поместить там, где наклон кривой еще достаточно крут, но недалеко от концевых тарелок колонны. Измеритель температуры ректификационной секции располагается над тарелкой питания, а измеритель температуры отпарной секции — под ней.

Оборудование для регулирования отвода продукта. Ректификационная колонна имеет небольшую емкость, поэтому необходимо выводить из нее кубовый остаток и дистиллят по мере их накопления. Регулирование отвода продуктов должно быть по возможности просто. Если колонна работает при атмосферном давлении, все,

исключены из списка переменных при дальнейшем анализе. Если исключить f и g из числа переменных в уравнениях (V-36) и (V-37), то останется 13 переменных. Их можно классифицировать следующим образом: независимые переменные (обычно не регулируемые): x_F , q и b ; переменные, величина которых обычно регулируется: F и x_D или, в другом случае, F и x_W ; зависимые переменные: W , D , V_n , V_m , L_n , L_m , R и x_W или, в другом случае, x_D . Таким образом, 5 из 13 переменных определены, остается еще 8 неизвестных в 8 независимых уравнениях. Для этой системы уравнений существует единственное решение, посредством которого можно определить все характеристики колонны.

Но предварительно необходимо определить величину 5 из 13 переменных, чтобы свести систему к 8 уравнениям с 8 неизвестными. Обычно некоторые из них известны еще до начала процесса, например, состав исходной смеси, ее энтальпия и скорость подачи. Составы верхнего и нижнего продуктов обычно также заданы. Но лишние данные в системе недопустимы. Сумма независимых и регулируемых переменных должна быть равна 5, а зависимых переменных должно быть 8. Несколько комбинаций различных сочетаний переменных представлено в табл. V-25.

Ректификационный процесс обязательно связан с регулированием состава дистиллята или кубового остатка или обоих вместе. Поскольку состав смеси определяет точку кипения (при постоянном давлении), то, естественно, что по температуре кипения можно определять состав. Существуют, конечно, и другие методы. Например, характеристики состава продукта могут измеряться непрерывно с помощью парофазной хроматографии, ультрафиолетовой или инфракрасной фотометрии.

Эту проблему решает система измерения температуры с датчиком дифференциального давления пара, известная как dV_P -передатчик (рис. V-190). К одному из двух сильфонов присоединен баллон термометра, наполненный жидкостью с составом, который желательно

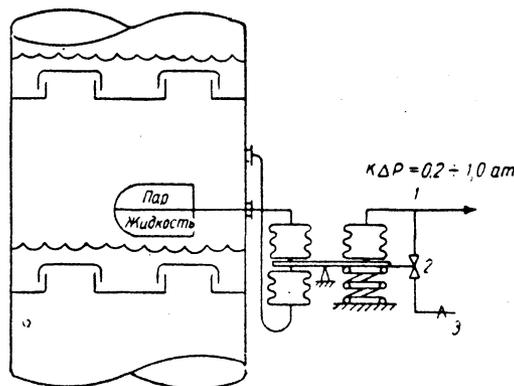


Рис. V-190. Схема дифференциального преобразователя давления пара:

1 — сигнал; 2 — управляющий клапан; 3 — устройство для подачи воздуха.

иметь в этой точке колонны. Сильфоны соединены встречно, и разность их выходных сигналов перемещает качающийся рычаг, связанный с управляющим клапа-

ТАБЛИЦА V-25

Возможные способы автоматического регулирования колонны по переменным процесса

Дистиллят и скорость питания	Дистиллят и кубовый остаток	Дистиллят и выкипание	Дистиллят, кубовый остаток и выкипание	Кубовый остаток и выкипание	Кубовый остаток, выкипание и флегма	Скорость питания, дистиллят и выкипание	Дистиллят, кубовый остаток и выкипание	Дистиллят, кубовый остаток, тепловая функция питания
------------------------------	-----------------------------	-----------------------	--	-----------------------------	-------------------------------------	---	--	--

Независимые переменные

x_F, q, b | x_F, q, b | x_F, q, b | x_F, b | x_F, q, b | x_F, b | x_F, b | F, x_F, b | x_F, b

Специфические переменные

F, x_D | x_D, x_W | x_D, V_m | x_D, x_W, V_m | x_W, V_m | x_W, V_m, L_n | x_D, F, V_m | x_D, x_W, V_m | x_D, x_W, q

Зависимые переменные

W, D, R | W, D, R, V_m | W, D, R, L_m | W, D, R, L_m | W, D, R, L_m | W, D, L_m, V_n | W, D, R, L_m | W, D, R, L_m | W, D, R, L_m
 V_n, L_n, x_W | L_m, V_n, L_n, F | V_n, L_n, x_W, F | V_n, L_n, F, q | V_n, L_n, x_D, F | x_D, F, q | V_n, L_n, q | V_n, L_n, q | V_m, V_n, L_n, F

Автоматические химические анализаторы также могут найти применение при регулировании качества продуктов ректификации.

Температура кипения смеси может изменяться с изменением давления в колонне. Это может служить источником погрешностей, особенно в колоннах с низким давлением, где небольшие изменения в абсолютном давлении могут быть сравнимы с рабочим давлением.

В баллоне развивается внутреннее давление, определяющееся составом жидкости в баллоне и температурой колонны. При этом жидкость в колонне оказывает на баллон давление, зависящее от ее температуры и состава. Так как баллон и колонна имеют одинаковую температуру, то давления внутри и вне баллона являются функцией составов соответствующих жидкостей. Сравнивая эти два давления в сбалансированной дифференциальной системе, снаб-

На рис. V-194—V-196 показаны различные схемы регулирования отвода продуктов из колонны.

Поток нижнего продукта. Когда содержание целевого компонента в подаваемой смеси или очень мало или очень высоко (т. е. когда x_F достигает 1,0 или 0), то регулирование потока с малым содержанием компонента становится затруднительным из-за низких скоростей потока. В таких случаях используют регулятор

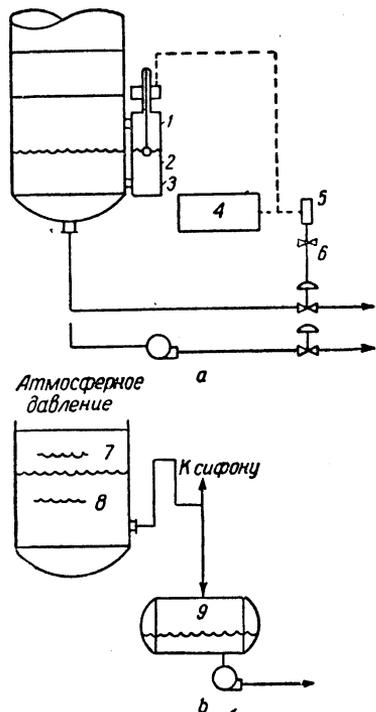


Рис. V-197. Регулирование процесса при очень низкой производительности колонны:

1, 7 — верхний уровень; 2 — поплавковая камера; 3, 8 — нижний уровень; 4 — программный регулятор; 5 — соленоидный клапан; 6 — устройство для питания воздухом; 9 — приемник.

уровня двухпозиционного действия, разрешая продукту скапливаться в приемнике до тех пор, пока не будет достигнут верхний уровень. Затем регулятор открывает клапан и производит выгрузку продукта, пока не будет достигнут нижний уровень. Для работы при повышенном давлении или в условиях вакуума применяются системы, использующие поплавковый переключатель с магнитным датчиком, который при достижении нижнего или верхнего уровней приводит в действие с помощью соленоида разгрузочный пневматический клапан. В случае вакуумных колонн, когда используется откачивающий насос, пуск насоса осуществляет программный регулятор. На рис. V-197 видно, как используется сифон для двухпозиционного регулирования уровня в ректификационной колонне при атмосферном давлении. Последовательность операций такова: 1) включается насос; 2) открывается клапан; 3) закрывается клапан; 4) выключается насос.

Регулирование давления. Ректификационные системы всегда рассчитаны на работу при постоянном давлении — от глубокого вакуума и до сравнительно высокого давления. Если колонна должна работать при атмосферном давлении, то это обычно не представляет особых затруднений для разработчика системы автоматического управления. Однако внесение примесей из атмосферного воздуха недопустимо, и поэтому используется модификация вакуумной системы регулирования с введением подходящего инертного газа для поддержания работы САР.

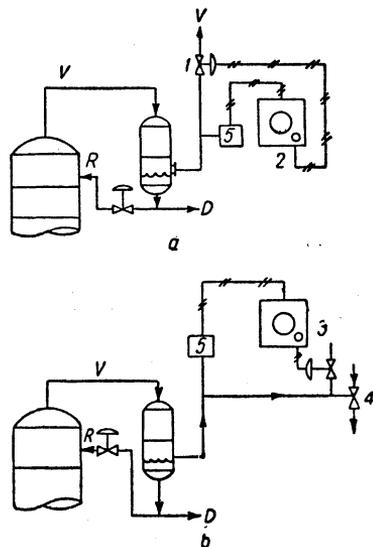


Рис. V-198. Автоматическое регулирование давления в колонне:

1 — вентиль; 2 — регулятор давления; 3 — спускной клапан, регулирующий; 4 — к вакуумному насосу; 5 — датчик давления.

На рис. V-198, а показана типовая система регулирования давлений в ректификационной колонне. Регулирование осуществляется выпускным вентилем конденсатора. На рис. V-198, б показана система регулирования в условиях вакуума, основанная на использовании вакуумредукционного клапана, связанного с вакуумным насосом.

Влияние динамических характеристик колонны. Большая часть упомянутых систем автоматического регулирования рассчитывается самым обычным образом, и описания таких систем часто встречаются в литературе. Тем не менее в случае приложения такой системы к ректификационной колонне ее динамические характеристики могут вызывать трудности, которые рассматриваются ниже.

Температура колонны меняется сравнительно медленно под влиянием возмущений и корректирующих действий. Неправильный выбор и применение системы автоматического регулирования могут привести к возникновению незатухающих колебаний. В результате продукция колонны может пойти в брак. Всегда имеется также опасность, что система регулирования не сможет обеспечить нужное соотношение между жидкостью и паром в колонне, в результате чего ухудшится ее

что требуется — это гидравлический затвор для слива. При повышенном давлении используется спускной клапан, регулирующий уровень. Для работы в вакууме требуются откачивающие насосы в комбинации с клапанами, регулирующими уровень жидкости.

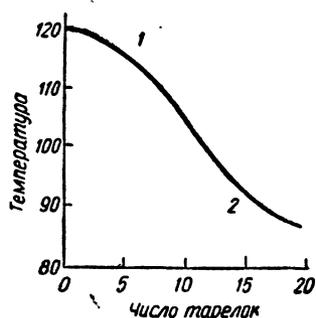


Рис. V-193. Типичный график распределения температуры по тарелкам колонны:

1 — датчик температуры для регулирования дистиллята; 2 — датчик температуры для регулирования нижнего продукта.

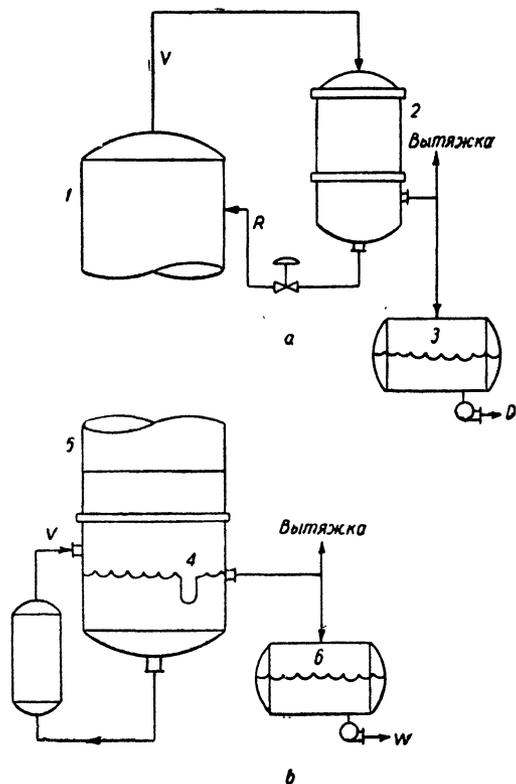


Рис. V-194. Регулирование производительности при атмосферном давлении:

1, 5 — колонны; 2 — конденсатор; 3 — приемник дистиллята; 4 — гидравлический затвор для предотвращения прохода пара во внешнюю линию; 6 — приемник нижнего продукта.

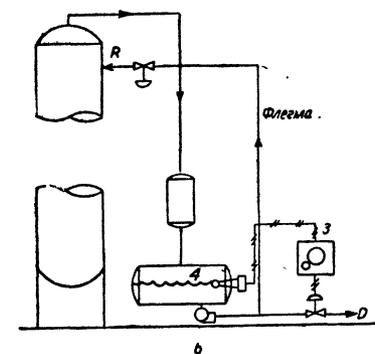
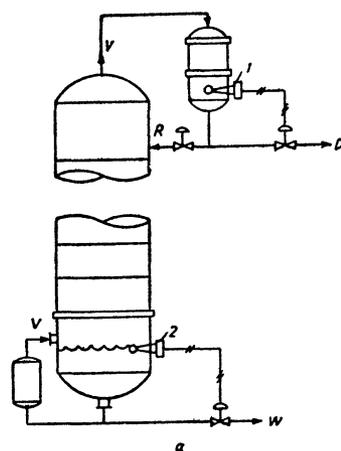


Рис. V-195. Регулирование производительности при повышенном давлении:

1, 2, 3 — регуляторы уровня; 4 — приемник дистиллята.

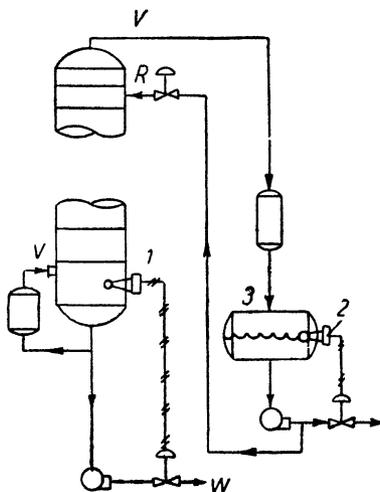


Рис. V-196. Регулирование производительности под вакуумом:

1, 2 — регуляторы уровня; 3 — приемник дистиллята.

линии и 2) графическое решение над контрольной тарелкой соответствует числу тарелок в верхней части колонны.

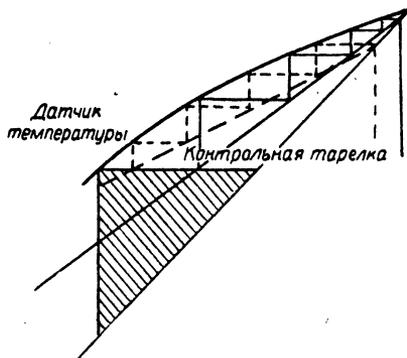


Рис. V-200. Диаграмма Мак-Кэба — Тиле, показывающая действие изменения флегмы при автоматическом регулировании состава дистиллята.

Очевидно, что уменьшение наклона верхней рабочей линии может вызывать только ухудшение чистоты дистиллята. Аналогично можно проанализировать измене-

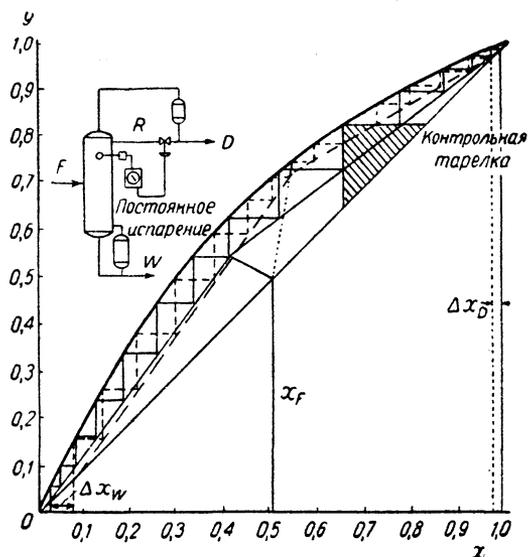


Рис. V-201. Влияние увеличения количества исходной смеси на работу колонны при постоянном испарении и автоматическом регулировании состава дистиллята путем изменения флегмы (разделение бензола и толуола):

— — — пониженная температура сырья; — — — частично испаренная исходная смесь; ··········· переохлажденная исходная смесь.

ние наклона нижней рабочей линии, которая иллюстрирует изменение состава кубового остатка.

Следовательно, чтобы оценить влияние внешних возмущений на ректификацию, остается только определить изменение наклона рабочих линий и построить полную

диаграмму для верхней и нижней частей колонны, и таким путем установить число тарелок и их расположение.

На рис. V-201 — V-203 пояснены несколько случаев внешних возмущений. Несмотря на то, что для приведенных примеров расчеты были произведены на вычислительной машине, графический анализ путем построения диаграммы Мак-Кэба — Тиле столь же точен и может быть применен при отсутствии цифровой вычислительной машины или при потарелочном расчете.

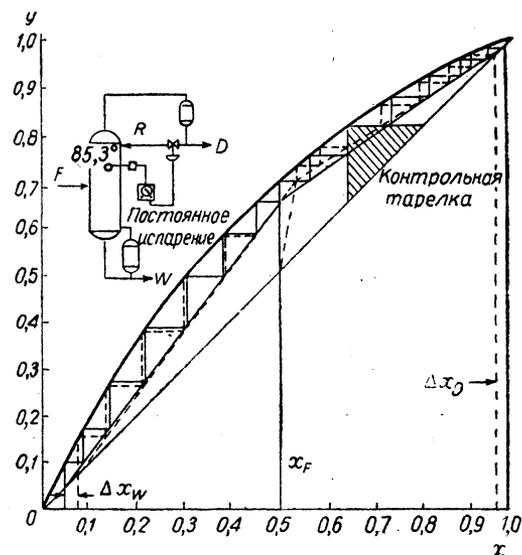


Рис. V-202. Влияние уменьшения температуры исходной смеси на работу колонны при постоянном испарении и автоматическом регулировании состава дистиллята путем изменения флегмы (разделение бензола и толуола).

Влияние увеличения подачи исходной смеси на регулирование состава дистиллята. На рис. V-201 показано влияние увеличения питания на работу колонны с системой автоматического регулирования состава дистиллята при постоянной скорости испарения. Поскольку скорость испарения остается постоянной, а скорость подачи исходной смеси увеличивается, то увеличивается соотношение жидкости и пара в исчерпывающей секции. Следовательно, увеличивается наклон нижней рабочей линии и качество нижнего продукта ухудшается. Увеличение скорости питания существенно увеличивает скорость выхода нижнего продукта и незначительно — скорость выхода дистиллята. Увеличение количества дистиллята влечет за собой увеличение флегмы, следовательно, наклон верхней рабочей линии уменьшается, а качество дистиллята ухудшается.

Интересно заметить, что температура колонны ниже контрольной тарелки понижается, а выше — повышается.

Влияние уменьшения энтальпии питания на автоматическое регулирование состава дистиллята. На рис. V-202 показано влияние уменьшения температуры исходной смеси на разделение системы бензол — толуол при постоянной скорости испарения и автоматическом регулировании состава выходного потока дистиллята. Результат такого воздействия такой же, как

работа. Это может привести к полному нарушению процесса ректификации.

Опыт применения теории автоматического регулирования к ректификационным колоннам пока еще невелик. Один метод удовлетворительного расчета системы регулирования, который дал хорошие практические результаты, предусматривает поддержание всех регулируемых переменных, кроме одной, на заданном уровне. В этом примере колонна должна быть выше (больше число тарелок) и с большим диаметром (так как увеличиваются потоки пара и флегмы). Регуляторы постоянной скорости надо поместить на линии питания и подачи греющего пара. Флегма будет регулироваться по температуре при скорости, обеспечивающей удовлетворительную ректификацию. Тогда нарушать режим работы колонны будут только изменения в составе исходной смеси и ее энтальпии. Этим можно пренебречь, если иметь достаточный запас производительности колонны. Надо, однако, признать, что это не очень экономичный способ.

Влияние внешних возмущений. При любой производительности ректификационной колонны (от очень большой нагрузки, при которой наблюдается захлебывание колонны, и до очень маленькой, при которой происходит слив жидкости) качество ректификации в большой степени зависит от теплового баланса колонны. Место подвода тепла также играет важную роль. Например, если тепло подводится через низ колонны, в то время как испарение производится на большом числе тарелок, то внешнее тепловое возмущение представляется как энтальпия исходной смеси. Следовательно, можно получить лучшие условия ректификации, компенсируя, например, уменьшение подачи тепла для испарения за счет увеличения энтальпии подаваемой жидкости. Внешние возмущения, следовательно, весьма существенны, хотя бы в той степени, в какой они влияют на тепловой баланс системы.

Системы для автоматического регулирования состава рассчитываются таким образом, чтобы уменьшить воздействие внешних возмущений, но так как датчики системы обычно располагаются внутри колонны, то часть тарелок можно снять либо сверху, либо в нижней секции колонны. Хотя при этом несколько понизится чистота продукта, но выигрыш в устранении влияния внешних возмущений будет больше.

Эффект влияния нескольких типичных возмущений был проанализирован. Была выбрана 15-тарелочная колонна для ректификации бензола и толуола. Потарелочный расчет был выполнен на вычислительной цифровой машине. Анализ можно провести на основе диаграмм Мак-Кэба—Тиле, которые дают более ясное представление о влиянии возмущений на работу колонны, чем таблицы расчетных данных.

ДИАГРАММА МАК-КЭБА — ТИЛЕ

Диаграмма оказывает существенную помощь при расчете ректификационных колонн и достаточно полно описана в химической литературе¹. Уместно будет вспомнить те части ее построения, которые касаются анализа систем автоматического управления ректификацией.

На рис. V-199 приведена типовая диаграмма Мак-Кэба—Тиле для разделения бинарной смеси. Контрольная точка взята выше размещения термометра систе-

мы регулирования состава в колонне. В результате регулирования с помощью обратной связи состав на контрольной тарелке колонны остается на заранее заданном уровне. Так же фиксируются числа тарелок ниже и выше контрольной тарелки регулирования и, естественно, ниже и выше тарелки питания.

Как видно на рис. V-199, состав продукта соответствует точке пересечения рабочей линии с диагональю, проведенной под 45°; верхняя рабочая линия соответствует составу дистиллята, нижняя — составу кубового остатка. Влияние внешних нарушений теплового баланса колонны отражается на диаграмме Мак-Кэба—Тиле в виде изменения положения (наклона) рабочих линий.

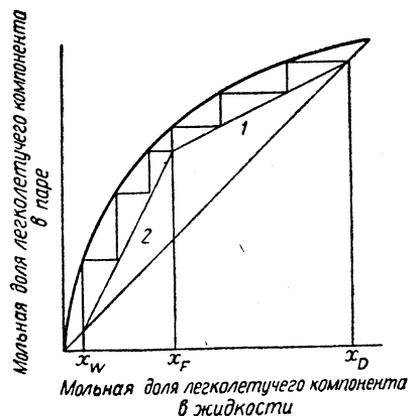


Рис. V-199. Диаграмма Мак-Кэба—Тиле для простого бинарного разделения:

1 — верхняя рабочая линия; 2 — нижняя рабочая линия.

Наклон линий характеризуется соответствующими отношениями L/V .

Построение диаграммы Мак-Кэба—Тиле позволяет наиболее полно объяснить влияние внешних возмущений теплового характера на автоматическое регулирование состава продукта. При графическом решении выявляются еще два других условия: 1) как уже указывалось раньше, состав продукта на контрольной тарелке должен поддерживаться постоянным и 2) число тарелок и расположение тарелки питания и контрольной тарелки должны оставаться неизменными.

Любая реакция ректификационной колонны на внешние возмущения должна изменять расположение рабочей линии колонны на графике — должен меняться ее наклон. Более того, изменения наклонов верхней и нижней рабочих линий имеют противоположные знаки. Из условия, что состав продукта на контрольной тарелке должен оставаться постоянным и что число тарелок между ней и концом колонны также должно оставаться неизменным, вытекает, что построение рабочей линии при наличии возмущения должно производиться перемещением ее относительно линии контрольной тарелки таким образом, чтобы число тарелок между ней и концом колонны оставалось неизменным. На рис. V-200 показано построение такой верхней части диаграммы Мак-Кэба—Тиле в результате уменьшения флегмы.

При построении этой диаграммы соблюдены оба упомянутые выше правила: 1) уменьшен наклон рабочей

¹ Robinson, Gilliland, Elements of Fractional Distillation, 4 ed., New York, 1950.

ПРИБОРЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Процесс сушки имеет ряд переменных характеристик, которые трудно измерить непосредственно. Поэтому, чтобы получить возможно более однородную продукцию, следует поддерживать постоянными те параметры, которые удастся измерить. Это удастся лишь в тех случаях, когда нагрузка оборудования почти не меняется.

Основные проблемы регулирования в сушиности один и те же для всех типов сушилок: барабанной, ленточной, полочной, шнековой и др. Трудности, возникающие при регулировании распылительных сушилок, будут рассмотрены отдельно.

Ниже рассмотрение будет проводиться применительно к сушилкам барабанного типа, но оно может быть отнесено ко всем типам сушилок, кроме распылительных.

В сушильных установках обычно легко измерить температуру и давление. Любые быстро и легко проводимые измерения могут использоваться для автоматического регулирования процесса сушки, так как динамика сушильных устройств обычно характеризуется умеренно быстрой реакцией на изменения.

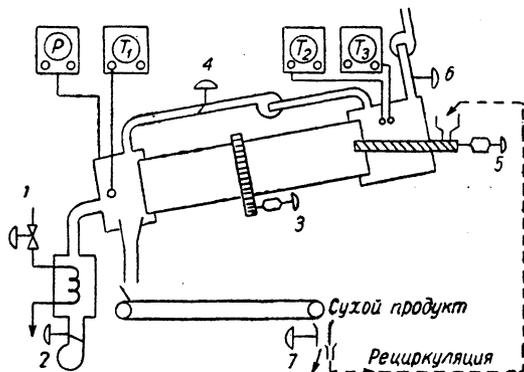


Рис. V-207. Схема автоматического регулирования барабанной сушилки:

T_1 — температура входящего воздуха; T_2 — температура выходящего воздуха; P — давление; T_3 — температура мокрого термометра.

1 — снабжение теплом; 2 — снабжение воздухом; 3 — перемещение материала; 4 — скорость рециркуляции воздуха; 5 — скорость загрузки сырья; 6 — шибер вытяжного воздуховода; 7 — рециркуляция продукта.

На рис. V-207 показана схема барабанной сушилки. Существуют следующие способы регулирования процесса сушки:

1. **Снабжение теплом.** Для этого могут быть использованы пар, топочные газы или электрическая энергия.

2. **Снабжение воздухом.** Можно регулировать с помощью шиберов на воздуховоде нагнетающего вентилятора.

3. **Перемещение материала.** Движение материала во вращающейся печи или сушилке зависит от числа оборотов, диаметра и наклона. Перемещение материала в ленточной сушилке легко регулируется скоростью движения ленты.

4. **Скорость рециркуляции воздуха.** Внутри некоторых ситчатых сушилок воздух вводится с помощью отдельных вентиляторов в одной или нескольких точках. По-

дача воздуха может регулироваться шибером. В других типах сушилок не предусматриваются специальные устройства для рециркуляции воздуха, но она обеспечивается возникновением конвекционных потоков.

5. **Скорость загрузки сырья.** Скорость питания сушилки просушиваемым материалом обычно поддерживается постоянной и выбирается в соответствии с требуемой производительностью. Теоретически ее можно менять в зависимости от результатов сушки.

6. **Снабжение воздухом.** Воздух может нагнетаться в сушилку (с помощью нагнетающего вентилятора) или удаляться из сушилки (с помощью вытяжного вентилятора). Если используются оба типа вентиляторов, то один (но не оба) может регулировать поток воздуха. Другой вентилятор может при этом использоваться для регулирования давления внутри сушилки.

7. **Рециркуляция продукта.** Применяется на практике сравнительно редко. Помогает предотвратить образование отложений во вращающихся печах.

По всей видимости, не было еще построено сушилки, в которой все параметры регулировались бы автоматически. Тем не менее все они в какой-то мере влияют на работу сушилки. Регулирование системы в целом не требует автоматического регулирования каждой из переменных по результатам ее измерения. Например, оператор может открыть управляющий клапан по результатам отдельного измерения. Каждый исполнительный орган может управляться либо автоматически, либо вручную.

ПРИМЕРНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Примерный перечень параметров для автоматического регулирования процесса сушки содержится в табл. V-26. Буква X (хорошо), стоящая в таблице, означает, что измерение, записанное в строке, может быть использовано при регулировании параметра, стоящего в данной графе. Буква У (удовлетворительно) означает, что хотя такое измерение и можно применять в большинстве случаев для регулирования данного параметра, но это регулирование будет не слишком удачным. Отточия в таблице означают, что регулирование данного параметра по данному измерению вообще неприемлемо. Хорошие результаты регулирования получаются при фиксированном значении всех регулируемых элементов, кроме одного. В графе 1, например, «X» стоит против измерений температуры входящего воздуха, температуры выходящего воздуха и влажного термометра в нем, температуры материала, его влажности, изменения качества и скорости испарения. Это означает, что при изменении положения управляющего клапана и, следовательно, при уменьшении или увеличении количества подаваемого тепла все эти характеристики изменяются. Поэтому для управления количеством подводимого тепла в системе можно использовать любое из указанных измерений и тем не менее конечная влажность продукта (F) будет идеальной лишь теоретически.

Обозначение X* относится к наиболее часто встречающейся связи между видом измерения и регулируемым параметром. Таких связей три:

температура входящего потока воздуха T_1 управляет количеством подводимого тепла (графа 1);

и при уменьшении количества исходной смеси. Уменьшается соотношение между суммарной теплотой и теплотой исходной смеси. Наклон нижней рабочей линии увеличивается, а верхней уменьшается, из чего следует,

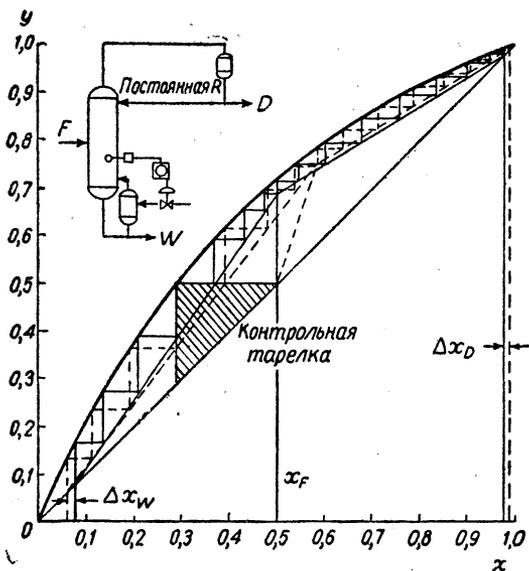


Рис. V-203. Влияние уменьшения температуры исходной смеси на работу колонны при постоянной флегме и автоматическом регулировании состава кубового остатка по скорости испарения (разделение бензола и толуола):

— горячая исходная смесь; - - - переохлажденная исходная смесь.

что качество разделения ухудшается. Температура колонны уменьшается под тарелкой питания и увеличивается над ней.

Влияние изменения энтальпии исходной смеси на автоматическое регулирование состава кубового остатка.

На рис. V-203 видно, как влияет изменение энтальпии питания на разделение смеси бензол—толуол при постоянной флегме и автоматическом контроле продукта. Уменьшение энтальпии питания вызывает увеличение потока жидкости в исчерпывающей секции, и система автоматического регулирования стремится увеличить скорость испарения, чтобы компенсировать это уменьшение. Общее количество тепла, следовательно,

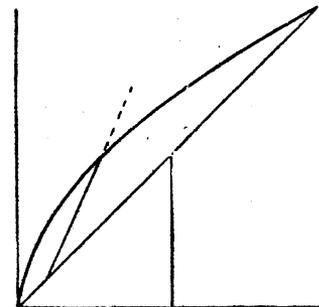


Рис. V-204. Влияние недостаточности испарения.

остается неизменным или, в худшем случае, медленно уменьшается. Ввиду того, что существенная часть входящего в колонну количества тепла перемещается от питающей тарелки к низу колонны, разделение мед-

ленно улучшается. Температура колонны над контрольной тарелкой уменьшается, а ниже ее увеличивается.

Нарушения при ректификации. Любые возмущения, которые увеличивают поток флегмы или испарение, могут вызвать нарушение процесса ректификации, если превышены пределы в отношении потоков пара и жидкости или если не хватает мощности оборудования для парообразования или для образования флегмы,

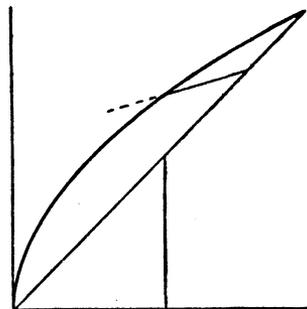


Рис. V-205. Влияние недостаточности орошения флегмой.

Если допустимые нагрузки превзойдены, то происходит захлебывание колонны и ректификация фактически не осуществляется. Недостаточность испарения увеличивает наклон нижней рабочей линии, и она может занять положение, при котором нельзя работать (рис. V-204). Недостаточность флегмы увеличивает наклон верхней рабочей линии, что также приводит к невозможности работы ректификационной секции

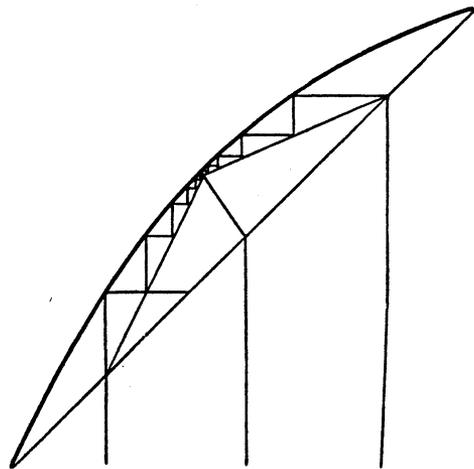


Рис. V-206. Затруднительность автоматического регулирования при недостаточном испарении и орошении (флегмой).

(рис. V-205). На рис. V-206 показано, какое влияние может иметь слишком большая скорость подачи питания, когда превышена допустимая производительность и по испарению и по флегме. Очевидно, что на контрольной тарелке не может больше поддерживаться постоянство состава дистиллята на заданном уровне.

Если давление, которое должно регулироваться, равно атмосферному в одной точке системы, то во всех других точках системы оно будет отличаться от атмосферного. Эффект вытяжки будет различным в зависимости от соотношения плотностей газа внутри сушилки и наружного воздуха. За счет движения воздуха внутри сушилки давление также будет снижаться.

Влажность. У выходящего потока воздуха влажность обычно измеряется с помощью психрометра. Можно применять также различные электрические датчики.

Температура осушаемого материала. Измерение температуры материала обычно используется операторами для управления процессом сушки.

Влагосодержание. Измерение влагосодержания производится непрерывно при сушке листовых материалов. Для гранул и порошков такие измерения проводятся периодически. Обычно измеряется диэлектрическая постоянная, которой соответствует определенное содержание влаги в порошке.

Термическое разложение. Термическое разложение материала является серьезной проблемой для многих операций сушки. Редко удается измерять его непрерывно и с достаточной скоростью, необходимой для удовлетворительного регулирования. Максимальные температуры и минимальные потоки обычно кладутся в основу экономичных режимов.

ПРИМЕРЫ ОБОРУДОВАНИЯ СУШИЛОК

Ситчатая сушилка. На рис. V-208 изображена одна секция сушилки (одна лента). Автоматическое регулирование каждой зоны многосекционных сушилок осуществляется одинаково; но давление P измеряется только в одной секции и используется для регулирования скорости движения ленты. Изменение скорости движения ленты может быть необходимо для поддержания постоянства перепада давления в слое высушиваемого материала, если его состав или скорость перемещения изменяются. Нерегулируемой переменной является скорость загрузки влажного материала.

Барабанная сушилка. В барабанной сушилке, изображенной на рис. V-209, производится измерение влажности материала, которое используется для регулирования подачи пара. Скорость испарения влаги зависит от состояния окружающего воздуха и скорости его конвекции, а также от температуры барабана. Скорость загрузки материала регулируется с целью поддержания постоянного уровня в загрузочном бункере. Поток материала изменяется в зависимости от производительности барабана при различных скоростях его вращения, толщины слоя и температурных условий.

Распылительные сушилки. В табл. V-27 приведены взаимосвязи, которые могут наблюдаться между различными поддающимися регулировке величинами и измерениями, проводимыми в процессе сушки с распылением. На рис. V-210 показана наиболее часто встречающаяся схема автоматического управления для такого процесса сушки. Температура входящего воздуха A используется для регулирования количества тепла, поступающего в систему. Температура выходного потока воздуха B управляет скоростью загрузки. Падение давления в распылительном сопле приводит к изменению среднего размера M и распределения размеров N капель жидкости; одновременно изменится скорость подачи материала. Распределение размеров может быть

очень важным фактором в процессе сушки, так как из маленьких частиц быстрее удаляется влага. Итак, чем

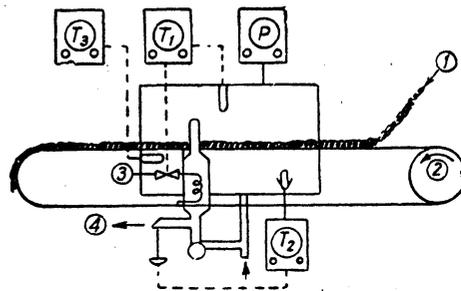


Рис. V-208. Система автоматического регулирования ситчатой сушилки:

Измеряемые величины	Регулируемые параметры			
	1 — скорость загрузки	2 — скорость ленты	3 — снабжение теплом	4 — удаление воздуха
T_1 — температура сухого термометра (горячего воздуха)	X	...
T_2 — температура влажного термометра (влажность воздуха)	X
P — падение давления в слое	X	...	...
$(T_3 - T_1)$ скорость испарения (сушки)
				Сигнал опасности

меньше размер капелек, тем сильнее различаются они по размерам.

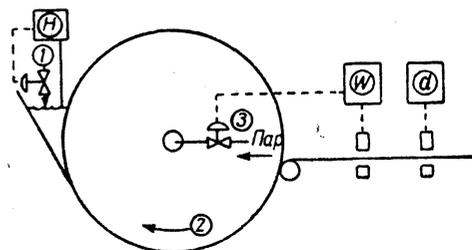


Рис. 209. Система автоматического регулирования барабанной сушилки:

Измеряемые величины	Регулируемые параметры			
	1 — скорость загрузки	2 — скорость вращения	3 — снабжение теплом	4 — скорость сушки
H — уровень	X	...	...	...
W — содержание влаги . . . . .	...	...	X	...
d — толщина . . . . .	...	X	...	...

Если подача воздуха в сушило прерывается и влажный материал собирается на дне сушилки, необходимо быстро приостанавливать подачу осушаемого материала.

ТАБЛИЦА V-26

Классификация параметров автоматического регулирования для сушилок

Измеряемые величины	Постоянные или регулируемые параметры						
	снабжение теплом	снабжение воздухом	скорость движения ленты	скорость рециркуляции воздуха	скорость загрузки сырья	скорость вытяжки	рециркуляция продукта
	1	2	3	4	5	6	7
<i>Общие измерения</i>							
A. Температура входящего воздуха T_1	X*	X	...	...	...	X	...
B. Температура выходящего воздуха T_2	X	X	...	У	X	X	У
C. Давление P	...	X	...	...	...	X*	...
D. Температура выходящего воздуха по влажному термометру T_3	X	X	...	X*	X	X	У
<i>Параметры продукции</i>							
E. Температура	X	X	X	X	У	...	У
F. Влажность	X	X	X	X	У	...	У
G. Изменение качества	X	X	X	X	У	...	У
<i>Рабочие условия</i>							
H. Высота слоя материала	...	...	X	...	X ¹	...	...
I. Время пребывания продукта в сушилке	...	...	X	...	X	...	X
J. Скорость воздушного потока	...	X	...	X	...	X	...
K. Скорость испарения	X	X	...	...	X	X	...
L. Соотношение газа и твердой фазы	...	X	...	У	X	X	...

¹ Оценка «хорошо» относится только к барабанной сушилке.

давление P управляет скоростью вытяжки (графа 6); температура влажного термометра выходного потока воздуха T_3 управляет скоростью рециркуляции воздушного потока (графа 4).

Итак, можно сказать, что регулируются обычно в системе три величины: T_1 , T_3 и P , а остальные могут изменяться в некоторых заданных пределах.

НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ СУШКЕ

Температура сухого термометра (психометра). Термометры, термометры сопротивления или манометрические термометры используются в соответствии с диапазонами изменения температуры. Важно только расположить термометр в достаточно характерной точке и защитить его от механических повреждений и коррозии. Временная задержка в получении сигнала температуры обычно допустима, поэтому можно применять защитные патроны с толстыми стенками. В высокотемпературных потоках газа датчик температуры дол-

жен быть предохранен от соприкосновения с холодными поверхностями. Для получения достоверной температуры газа нужно применять малогабаритные защищенные термометры.

Давление. Давление в сушильных агрегатах может изменяться в сравнительно широких пределах. Если в сушилке образуется пыль, то часто приходится очищать трубопровод, соединяющий точку измерения с измерительным прибором. Такая очистка позволяет уменьшить погрешности измерения. Давление может регулироваться одинаково хорошо с помощью любого из шибберов в воздухопроводах (см. графы 2 и 6 в табл. V-26) нагнетающего или вытяжного вентиляторов. Шиббер вытяжного трубопровода, не используемый для регулировки давления, может быть использован для других целей. Оба шиббера могут, следовательно, использоваться для регулирования потоков воздуха и давления в системе. Точка измерения давления может находиться в любом месте внутри сушилки. Регулируемое давление может быть как положительным, так и отрицательным.

Вторая опасность состоит в том, что пары растворителя или частицы пыли могут образовывать вместе с воздухом, используемым для сушки, легковоспламеняемые смеси. Такая ситуация может привести к серьезным авариям, хотя в системе и нет источника воспламенения. В некоторых случаях для сушки огнеопасных материалов используют инертные газы. Иногда, если это выгодно, регулируют концентрацию растворителя и путем непрерывного анализа проб газа в сушилке управляют скоростью сушки таким образом, чтобы

поддерживать состав смеси ниже предела взрываемости. Автоматический выпуск инертного газа и выключение аппаратуры происходят как только смесь достигнет взрывоопасного состояния. Кроме того, предусматриваются сигнал тревоги и блокировка агрегата. Они действуют в момент возникновения небезопасных условий работы.

Дополнительную информацию об измерениях и управлении процессами сушки твердых частиц см. в специальной литературе¹.

ОСНАЩЕНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Теплообмен является неперенной частью почти всех процессов химической технологии и поэтому имеет важное значение. Нормальная работа теплообменников обеспечивается регулированием. Особое внимание в этом разделе уделяется проблемам улучшения характеристик систем теплообмена и выбору систем автоматического регулирования для новых теплообменных установок.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Обычный метод регулирования теплообменника состоит в измерении температуры выходного потока рабочей среды и изменении скорости подачи нагревающего или охлаждающего агента для поддержания заданной температуры (рис. V-211). Для стабилизации

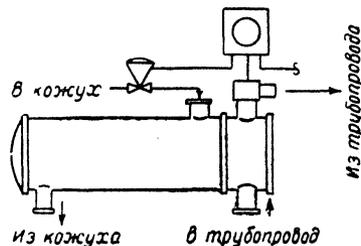


Рис. V-211. Система автоматического регулирования теплообменника.

процесса регулирования регулятор почти всегда должен обладать большими пределами пропорциональности. Эти пределы определяют как коэффициентами усиления звеньев системы регулирования, так и требованиями процесса теплообмена.

Так как теплообменник для стабилизации процесса нуждается в применении регулятора с широкими пределами пропорциональности, то для уменьшения и исключения остаточного отклонения в случае изменения нагрузки обычно употребляют интегрирующие звенья. Их можно не вводить, если действие возмущений (изменения давления пара, скорости потока рабочей среды, входной температуры) не вызывает изменений регулируемых переменных, превышающих допустимые величины. Если скорость подачи вещества, проходящего через теплообменник, часто и быстро изменяется, то в системе регулирования температуры появится ошибка запаздывания. Ее величину можно понизить примерно в 2 раза включением дифференцирующего звена в систему автоматического регулирования с последующей тщательной настройкой.

УСТАНОВКА ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Датчики температуры в теплообменнике следует размещать по возможности ближе к активной поверхности теплообменника; необходимо, чтобы поток рабочей среды в этом месте был достаточно хорошо перемешан. Если точка измерения удалена от активной поверхности теплообменника (например, при установке датчика в выходной трубе), то временная задержка оказывает существенное влияние на характеристики автоматического регулирования, так как возникает сдвиг по фазе и слегка уменьшается сигнал. При длине трубы 1,5 м и линейной скорости 1,5 м/сек задержка передачи будет составлять 1 сек, что существенно ухудшит динамические свойства системы автоматического регулирования теплообменника.

Толщина стенок и теплопроводность защитного чехла датчика существенно влияет на величину запаздывания.

УПРАВЛЯЮЩИЕ КЛАПАНЫ

Клапаны для теплообменников снабжаются позиционерами, так как трение в клапанах существенно ухудшает характеристики системы. При разработке новых установок или при улучшении характеристик существующих установок всегда желательно использовать клапаны с позиционерами, являющимися средством преодоления трения в клапанах.

Желательно поддерживать постоянное соотношение между степенью открытия клапана и изменением измеряемой температуры для различных скоростей проходящих материалов так, чтобы коэффициент усиления системы оставался примерно постоянным. При соблюдении этого условия можно получить хорошие результаты регулирования. Если скорость подачи материала удваивается, то для обеспечения заданного изменения температуры нужно удвоить то приращение потока нагревающего или охлаждающего агента, которое было необходимо при обычной скорости подачи. Соответствующая настройка клапана обеспечивает изменение потока, которое будет пропорционально полному потоку и изменению открытия клапана:

$$dQ/dy = aQ$$

где Q — скорость потока; y — открытие клапана; a — постоянная величина для данного клапана.

¹ Hickman, I. Inst. Fuel, 28, 113 (1955). — Kramers, Alberda, Chem. Eng. Sci., 2, 173 (1953). — Marshall, Chem. Eng. Progr., Monogr. Ser., 50, № 2 (1954). — Saeman, Mitchell, Chem. Eng. Progr., 50, 467 (1954).

ТАБЛИЦА V-27

Классификация параметров автоматического управления для распылительных сушилок¹

Измеряемые величины	Постоянные или регулируемые параметры						
	снабжение теплом	снабжение воздухом	скорость распыления	скорость рециркуляции воздуха	скорость загрузки сырья	шибер для регулирования тяги	рециркуляция продукта
	1	2	3	4	5	6	7
<i>Общие измерения</i>							
A. Температура входящего воздуха T_1	X*	X	...	...	...	X	...
B. Температура выходящего воздуха T_2	X	X	...	У	X*	...	У
<i>Параметры продукции</i>							
E. Температура	X	...	...	У	X	X	У
F. Влажность	X	X	X	X	X	X	У
G. Термическое разложение	X	X	У	У	X	X	X
M. Размеры частиц	...	...	X	...	...	...	...
N. Гранулометрический состав	...	...	X	...	...	...	...
<i>Рабочие условия</i>							
C. Давление P	...	X	...	...	...	X	...
D. Влажность выходящего воздуха	X	X	...	У	...	X	У
I. Время пребывания продукта в сушилке	...	X	...	...	...	X	...
J. Скорость воздушного потока	...	X	...	X	...	X	...
K. Скорость испарения	X	X	...	...	X	X	...
L. Соотношение газа и твердой фазы	...	X	...	У	...	X	...

¹ Обозначения те же, что и в табл. V-26.

В случае резкого повышения температуры выходящего газа или переполнения сборника высушенного продукта система должна выдавать сигналы об аварии.

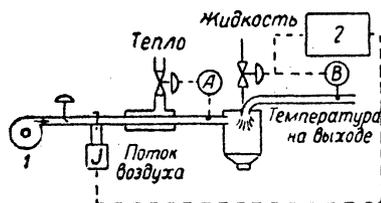


Рис. V-210. Система автоматического регулирования распылительной сушилки:

1 — нагнетательный вентилятор; 2 — прерыватель подачи жидкости.

Время чистого запаздывания у сетчатых сушилок меньше, чем у сушилок других типов, следовательно, реакция быстрее и автоматическое регулирование проще. Зато у измерительных и управляющих приборов реак-

ция должна быть более быстрой. Система обычно герметизирована, давление внутри сушилки не выравнивается и, как правило, не регулируется. Всякий раз как температура в сушилке опустится ниже установленных пределов, подача влажного материала должна выключаться.

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

При использовании сушилок встречаются опасности двух видов. Прежде всего необходимо предохранить сушилку от возникновения пожара в огнеопасных узлах. Оборудование, предназначенное для защиты от пожара, обычно более сложное, чем все остальное оборудование. Отказ защитного оборудования часто настолько опасен, что обычно используют дублированные системы. Одна система служит для обнаружения огня, как это делается обычно, а вторая непрерывно анализирует на предмет взрывоопасности продукты сгорания в сушилке. Любая из двух систем может выключить оборудование.

вают теплоемкость конструкции, применяют нагревающую или охлаждающую жидкость, которая рециркулирует по теплообменнику и вне его нагревается или охлаждается специальной системой (рис. V-215). Вместо нагревания или охлаждения применяется также подмешивание (добавление) жидкости из дополнительного источника.

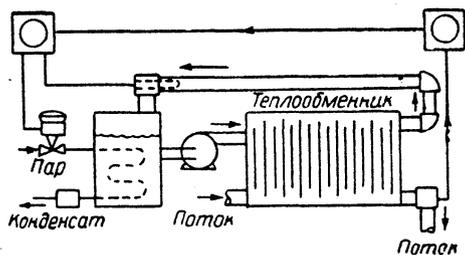


Рис. V-215. Система регулирования теплообменника с рециркуляцией.

Изменение температуры на выходе технологического потока заставляет регулятор температуры изменить уставку (задание) для второго регулятора температуры, контролирующего температуру в рециркуляционной схеме; в результате этого за счет изменения подачи пара меняется скорость теплообмена и температура выходящего технологического потока возвращается к за-

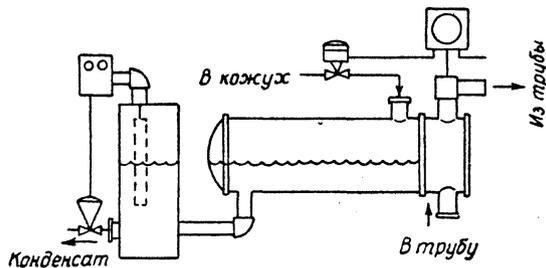


Рис. V-216. Система для повышения рабочего давления в кожухе.

данному значению. Эта каскадная система автоматического регулирования обычно позволяет держать рабочую температуру в более строгих допусках, чем при одноконтурной системе автоматического регулирования.

ВЫВОД КОНДЕНСАТА ИЗ ТЕПЛОБМЕННИКОВ

Следует позаботиться о том, чтобы системы вывода конденсата были тщательно разработаны для каждой конкретной установки. Эти системы должны быть вы-

браны таким образом, чтобы они не вызвали изменения давления в теплообменнике из-за быстрого отвода конденсата. Возмущения такого рода влекут за собой изменение температуры регулируемого потока.

Конденсатоотводчики паровых теплообменников должны быть соединены с приемниками конденсата, находящимися под давлением более низким, чем минимальное рабочее давление в кожухе теплообменника.

В случаях, когда минимальное давление конденсации может быть меньше, чем давление в сборнике конденсата, можно уменьшить поверхность теплообменника, поддерживая уровень конденсата внутри теплообменника, как показано на рис. V-216. Для такой системы требуется отдельный сборник с устройством регулирования уровня.

Дополнительную информацию об оборудовании теплообменников можно найти в литературе¹.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Baker, Ryder, Baker, Temperature Measurement in Engineering, vol. I, New York, 1953. — Carroll, Industrial Instrument Servicing Handbook, New York, 1960. — Leck, Pressure Measurement in Vacuum Systems, New York, 1957. — Caddell, Fluid Flow in Practice, New York, 1956. — Willard, Merritt, Dean, Instrumental Methods of Analysis, Princeton, 1958. — Ceaglske, Automatic Process Control for Chemical Engineers, New York, 1956. — Ahrendt, Savant, Servomechanism Practice, New York, 1960. — McCracken, Digital Computer Programming, New York, 1957. — Johnson, Analog Computer Techniques, New York, 1956. — Smith, Electronic Digital Computers, New York, 1959.

Wrubel, A Primer of Programming for Digital Computers, New York, 1959. — Ceaglske, Dynamics and Control of an Absorption Column, A. I. Ch. E. Symposium, St. Paul, 1959. — Tolin, Fluegel, An Analog Computer for On-line Control of a Chemical Reactor, A. I. Ch. E. Symposium, St. Paul, 1957. — Zuiderweg, Manual of Batch Distillation, New York, 1957.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

П. А. Обновленский, П. А. Коротков, А. Л. Гуревич, Б. В. Ильин, Основы автоматизации и автоматизации химических производств, Изд. «Химия», 1965. — А. А. Кампенеми, Автоматическое двухпозиционное регулирование, Изд. «Наука», 1967. — А. М. Турчин, Электрические измерения неэлектрических величин, Госэнергоиздат, 1959. — Ф. Е. Темников, Автоматические регистрирующие приборы, Машгиз, 1960. — К. А. Мироноз, Л. И. Шипетин, Автоматические регуляторы, Машгиз, 1961. — Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины, Справочное пособие, сост. Б. Д. Кошарский и др., Машиностроение, 1968. — М. В. Кулаков, С. И. Щепкин, Автоматические контрольно-измерительные приборы для химических производств, Машгиз, 1961. — В. М. Ордынцев, Ю. И. Шендлер, Автоматическое регулирование и автоматические регуляторы технологических процессов, Машгиз, 1960. — В. В. Кафаров, Методы кибернетики в химии и химической технологии, Изд. «Химия», 1968. — Frank's, Mathematical Modeling in Chemical Engineering, New York—London—Sydney, 1967. — В. Б. Алексеевский и др., Физико-химические методы анализа, Изд. «Химия», 1964.

¹ Cohen, Johnson, Ind. Eng. Chem., 48, 1031 (1956). — Mozley, Ind. Eng. Chem., 48, 1035 (1956). — Paunier, Takabashi, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, 78, 749 (1956). — Considine (ed.), Process Instruments and Controls Handbook, New York, 1957.

При такой (пропорциональной) настройке клапана обычно обеспечивается постоянное соотношение между открытием клапана и изменением температуры.

После того как будет определена полная характеристика клапана, следует выявить изменения перепада давления на клапанах, используемых при регулировании теплообменных устройств, так как противодавление от теплообменника обычно существенно изменяется при различных нагрузках. Часто используют отношение нижнего предела давления к максимальному рабочему давлению нагревателя в качестве критерия для оценки размеров нагревателя при минимальной поверхности теплообмена. При стабилизации систем на низких рабочих скоростях могут встречаться некоторые трудности. Пропорциональная настройка рассчитывается на максимальный перепад давлений при полной нагрузке. Формулы для расчета открытия клапана в зависимости от нагрузки и давлений можно найти в литературе¹.

Если нагрузка для клапана мала, то коэффициент усиления такого клапана будет существенно меняться. Другой нежелательный эффект проявится в том, что при небольших потоках клапан будет работать с малым зазором, при котором наклон характеристики клапана резко меняется. При малых рабочих нагрузках для получения удовлетворительного регулирования необходимо применять специальные управляющие клапаны.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЫЕ СЛУЧАИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ

Автоматическое управление на выходе конденсата. В некоторых случаях можно снизить затраты на оборудование автоматического управления для теплообменника, если поместить управляющий клапан на линии конденсата, а не на линии подачи пара (рис. V-212).

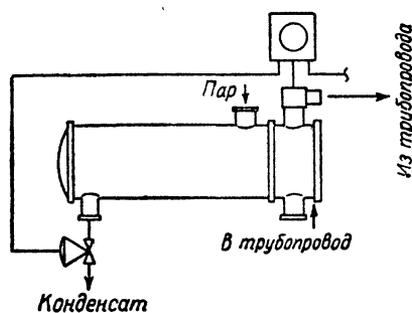


Рис. V-212. Система автоматического регулирования с дросселированием в линии конденсата.

Однако работоспособность такой системы не подтверждена опытом.

Каскадная система регулирования давления. В этой системе (рис. V-213) стандартный регулятор температуры (пропорционально-интегрально-дифференциального действия) вырабатывает задание для регулятора давления в зависимости от температуры. Такая система быстро восстанавливает нагрузку трубчатого теплооб-

менника, изменившуюся в результате возмущения. Подача пара в нагреватель управляется регулятором давления, в котором обычно есть пропорциональное и интегральное звенья. Изменение нагрузки быстро воспринимается как изменение давления внутри теплообменника, которое восстанавливается регулятором давления. Система регулирования температуры воспринимает статическую ошибку (остаточное отклонение), а интегральная часть регулятора давления возвращает регулируемый параметр к заданному значению.

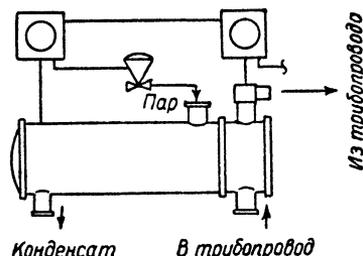


Рис. V-213. Каскадная система автоматического регулирования давления.

Байпасная система регулирования. В отдельных случаях теплообменник реагирует на возмущения слишком медленно для того, чтобы поддерживать заданную температуру в пределах определенных допусков при изменениях нагрузки. В некоторых из этих случаев нежелательное влияние временной характеристики тепло-

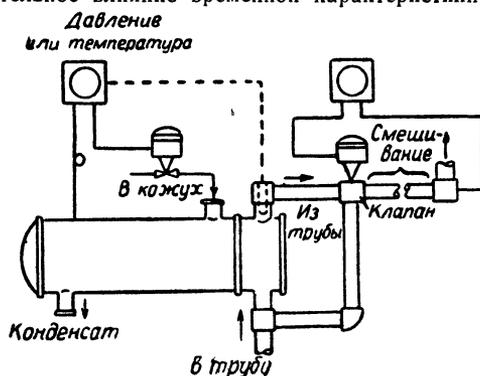


Рис. V-214. Байпасная система регулирования.

обменника может быть исключено путем обхода нагревателя параллельной линией и смешиванием холодной жидкости с горячей жидкостью из нагревателя (рис. V-214).

Здесь следует позаботиться о выборе подходящих клапанов для получения желаемого разделения потока и удовлетворительной характеристики хода клапана. Время реакции термодатчика также играет большую роль, так как его постоянная времени будет одним из главных факторов, влияющих на характеристики системы.

Система регулирования с рециркуляцией водяного потока. В отдельных случаях теплообмена между двумя жидкостями, в особенности в пластинчатых теплообменниках, где тяжелые металлические секции увеличи-

¹ Considine (ed.), Process Instruments and Control Handbook, New York, 1957.

- Выщелачивание 126
 в диффузионных батареях 130, 131
 в открытых сосудах 130
 в экстракторах 130, 131 см. также Экстракторы
 из тонкораздробленных материалов, аппараты 131, 132
 непрерывное, установочки 132
 фильтрационно-проточного типа аппарата 130, 131, см. так-
 же Экстракторы
- Вязкость, измерение 410, 420, 421
- Газ(ы)
 влажности контроль 417
 подвижность ионов, расчет 317
 разделение
 конденсацией см. Конденсаторы
 масс-диффузией 340
 распределители 88—91 см. также Барботеры
 пористые 89—91
 ток
 параллельный 229, 230
 перпендикулярный 230
 фракционирование во взвешенном слое 287
- Газовая хроматография 340, 341
- Газодувка турбинная 335, 336
- Гигрометры 417, 418
- Гидравлический градиент, уравнение 14, 15
- Гидровибратор 354
- Гидросепаратор 353
- Гидроциклон пластмассовый «Дорр Клоун» 349
- Градиент уровня жидкости на тарелке 14, 15
- Грохот(ы)
 вибрационные
 механический «Тай-Рок» 345
 электрический «Гум-Мер» 345
 вращательно-колебательный 346
 вращающиеся (барabanные) 344, 345
 встрягиватели (лабораторные) 348
 качающиеся «Ро-Тап» 348
 колебательные 346
 осцилляционные 346
- Грохочение
 амплитуда и частота вибрация 347, 348
 поверхность материала 347
 способ питания 347
 угол наклона 347
 эффективность 346, 347
- Давление
 измерение 388 сл. см. также Манометры
 преобразование в электрический сигнал 394
- Дегидратор вакуумный 242
- Декантация непрерывная противоточная
 методы расчета 175, 176
 оборудование 175
 определение 173
 применение 173, 174
 проектирование 174
 технологические схемы 174, 175
- Диаграмма Мак-Кэба — Тиле 488, 489
- Диафрагмы 397
- Диски
 распылительные 79
 центробежные 293
- Диспергаторы
 газовые 83
 насадки 92
 трубчатые 92
- Диспергирование
 влияние температуры 143
 газа
 газонасыщение, расчет 95
 поверхность раздела, уравнение 94, 95
 жидкости 72 сл.
 ограничения 143
 применение 142
 техника 142, 143
- Дисперсия
 газовые 92
 гетерогенность 86, 87
 образование 92
 стабильность 87
- Дистилляция смесей
 бензол — дихлорэтан 62
 этанол — вода 62
- Дифманометры
 с силовой компенсацией 399
 с электрическим выходом 399
 сильфонные 399, 400
- Диффузия
 газовая 336, 337
 термическая 337, 338
 через пористую перегородку 337
- Жидкости аэрированные, плотность 87
- Закон
 гомогенной цепи 379
 последующих, или промежуточных, температур 380
 промежуточных металлов 379, 380
- Известняк, обжиг в шахтных печах 270—272
- Измерение
 вязкости 410, 420, 421
 давления 388
 плотности 414—416
 рН 409—411
 температуры см. Температура
 удельного веса 414—416
- Измеритель(и)
 диэлектрической постоянной 419
 скорости потока 402
 сопротивления 419
 утечки 388
- Индикаторы
 многострелочные 425, 426
 с вращающейся шкалой 426
 с движущимся телом 426
- Индикация
 аналоговая 422
 цифровая 422
- Индукция цифровая 422
- Инжекторы 335
- Интегратор многострелочный 425
- Ионообменники
 автоматизация 135
 расчеты 141
 с пульсирующим перемещением смолы для концентрации и
 очистки урана 139—141
 со смешанным слоем, принцип действия 134
- Кальцинатор(ы) 243, 244, 259—262
 методы расчета 261
 применение 260, 261
 с непрямым нагревом 259—262
 характеристика (табл.) 260—262
- Капли
 коалесценция 74
 методы исследования 76
 образование, теория 73, 75
 размер (теоретический) 74
 улавливание
 проволочными сетками 101—104
 эффективность 104, 105
 энергия образования, потери 73, 74
- КИП, штат отдела (табл.) 477
- Клапан(ы)
 корпус (табл.) 472, 473
 привод (табл.) 472, 474, 475
 управляющие теплообменников 495, 496
- Классификатор(ы)
 барabanный вращающийся с использованием плотной среды
 356, 357
 гидроциклоны 349
 конусный 349
 многокамерный «Джет Сайзер» 354
 противоточный 353, 354
 реечный, характеристики (табл.) 352
 сифонный 354
 скребковый 349, 352, 356, 338
 спиральный
 модифицированный 356, 357
 характеристика (табл.) 352
 характеристика (табл.) 350, 351
 «Хардинг Оведрайн» 349, 350
 чашевый 352
- Классификатор-центрифуга 353
- Классификация твердых частиц мокрая 348, 349
 Колонки термодиффузионные 337, 338
- Колонны
 высота сливного патрубка 16
 насадочные 32 сл. см. также Насадки
 абсорбция двуокиси углерода 57—61
 высота, уравнение 64
 дистилляция, уравнение 61—64

УКАЗАТЕЛЬ

- Абсорбер с перемешивающим устройством «Кавитатор»** 97
- Абсорбция**
аммиака в распылительной колонне 67
газов в пленочных колоннах, сопротивление в жидкой фазе 70, 71
двуокиси серы
потребление энергии 66
раствором карбоната натрия, уравнение 68
двуокиси углерода 57—61
на системе CO_2 — воздух — вода 57, 59
растворами карбоната натрия 58
растворами этаноламина, уравнение 59, 60
раствором едкой щелочи 57, 58
скорость массопередачи 58, 59
кислорода из воздуха раствором сульфата натрия 93
сопровождаемая химической реакцией 52
эффективные коэффициенты массопередачи 52, 53
фтористого водорода, потребление энергии 66
хлора раствором хлорида железа 53
хлористого водорода водой, уравнение 72
четырехфтористого кремния 96, уравнение 61
- Автоклав гидрогенизационный** 96
- Автоматическое регулирование** см. **Регулирование автоматическое**
- Агломерация** 361
- Амперометрия** 409
- Анализатор Орса** 408
- Анализ**
рентгенографический 408
электровесовой 409
- Аппарат(ы)**
массообменные (табл.) 7
Пачука (пневматическое перемешивание) 119
- Ареометр ручной** 414
- Аэратор(ы)**
биоокисления «Пермаэратор» 97
турбинные 94
- Аэробная ферментация** 93, 94
- Аэрозоли** 74
фильтрование в псевдоожиженном слое 308
- Барботеры**
газовые 83
простые 88, 89
- Барометр чашечный** 389
- Бегуны смесительные** 148—150
- Вакуумметр**
ионизационный
радиоактивный «Альфатрон» 393
с нитью накала 393
с холодным катодом 393, 394
Кнудсена 391, 392
на основе
ротационного вискозиметра 392, 393
теплопроводности 392
Филлипса 393
- Вакуум-нутчи** 197
- Вакуум-сушилка(и)**
вращающиеся
методы расчета 264
характеристики 264, 265
ленточные 242, 243
данные по сушке продуктов (табл.) 242
- Вакуум-сушильные шкафы** 234, 235
расчет 235
характеристика (табл.) 235
- Вакуум-фильтр(ы)** 196—205
барабанные
безъячейковые 202
Оливера 198, 199
ячейковые 197, 198
вращающиеся 197, 198
- Вакуум-фильтр(ы)**
горизонтальные 197, 198, 203
дисковые 197, 198, 202, 203
Дорр — Оливера 202, 203
«Доррко» 201
карусельный (с опрокидывающимися нутчами) 204
ленточные 204, 205
листовые 197
всасывающий «Ваку-Флоц» 197
Мора 197
непрерывного действия 197, 198
Оливера 197, 198, 203
опрокидывающийся Гампера 197
периодического действия 197
с верхней подачей суспензии 201
с внутренней поверхностью фильтрования 201
со слоем вспомогательного вещества 201
со сходящим фильтровальным материалом 200
со съемом осадка 199, 200
гребельчатый 203, 204
Валки смесительные 151, 152
- Весы** 412, 413
для измерения удельного веса газа 415
кольцевые 388, 389
- Взвеси, характеристика (табл.)** 299
- Взвешенный слой**
аппаратура 277 см. также **Реакторы вибросушилка конвейерная (ленточная)** 288, 289
каталитический процесс 277, 284
крекинг нефти, установки 284
некаталитический процесс 277, 284—288
определение 229, 230
перемешивание
газа 286
твердой фазы 286
печь обжиговая для производства извести 286
поток твердой фазы 279, 280
регулирование температуры 286
ступени, организация 284, 285
сушка твердых материалов 286, 287 см. также **Сушилки теплопередача, расчет** 285, 286
термопластичных смол для нанесения покрытий 287, 288
фракционирование газа, установка 287
частицы
движение, расчет 278
измельчение 287
классификация 287
размер 276
рост 287
- Взвешивание**
движущихся материалов 413
с фиксированной нагрузкой (табл.) 412
- Вентилятор преспеллерный** 335, 336
- Вибросушилка со взвешенным слоем конвейерная** 288, 289
- Вискозиметр** 421
- Вода, ионообменная переработка** 135—137
- Высота единицы переноса (ВЕП), влияние критерия Рейнольдса, уравнение** 47, 48
плотности орошения 47—49

- Отстойник
площадь осаждения, определение методом
длинной трубки 162
Кинча 163
Коу и Клевенджера 163
упрощенным 162, 163
размеры 164
скорость осаждения 163
чашевый 352, 353
Охлаждение, методы 153
- Парамагнетизм 409
- Пена
антипенные присадки 108
время существования 85
зависимость высоты
от орошения 20, 21
от скорости пара в отверстии 19
образование
автоматический контроль 108
на тарелках 19—21
теория 83—85
плотность на системе воздух-вода 20, 21
получение 83
разделение 106—109
разрушение, методы 108, 109
стабилизация 85, 87
«твердая» 85
- Пенная флотация 91, 92, 367, 369
- Пеногасители
природные 108
химические, классы 106—108
- Перегородки пористые 89—91
- Перемешивание
контроль времени пребывания в аппарате 122, 123
механическое 92—97 см. также Мешалки
непрерывное проведение химической реакции, контролируемой
концентрацией реагентов 122
пневматическое, аппарат Пачука 118, 119
- Печи
вращающиеся обжиговые 235, 243, 250—256
зоны нагрева 253
методы расчета 252—255
применение 254, 255
сушилка с толкой и камерой для охлаждения воздуха 252
термический к. п. д. 255, 256
топочные камеры 251
установка цепей 253
характеристика (табл.) 254, 256
для получения соляной кислоты 267, 268
для прокаливания 243, 244, 259 см. также Кальцинаторы
многополочные
Веджа 268
Мак-Дугала 268
Никольса 268
применение 268, 269
характеристики (табл.) 268
муфельные 235, 236
обжиговые
вращающиеся см. Печи вращающиеся
с вращающимся подом 235, 236
с круглым подом 267, 268
с подвижным дном 236
скоростные 297, 298
со взвешенным слоем для производства извести 286
шахтные 235—237, 269—272
- Пирометры
градировка, постоянные точки (табл.) 378
конусы пирометрические 388
оптические
пределы измерений 383, 384
применение 383
радиационные
пределы измерений 383
принцип работы 382
применение 382
- Питатели дозирующие 413, 414
- Пленка, разрушение
волновое 73
краевое 73
механизм 73
перфорационное 73
- Плотномеры 415—417
- Плотность, измерения 410, 414
- Плунжер гидравлический 213
- Пневматический транспорт 289—292
- Подъемники пневматические 289—292
- Позиционер с мембранным приводом 472
- Показатель преломления 408
- Поляриметрия (оптическое вращение) 408
- Полярография 409
- Прессы
непрерывного действия
вальцовый 159
дисковый 159
шнековый 158, 159
периодического действия
корзиночный 158
пакетный 157
плиточный 158
чашечный 158
- Приборы
быстродействие 423, 424
параллакс 425
с растянутой шкалой 424
точность шкалы 424
- Промыватель песка 353
- Пружина Бурдона 386, 390, 391
- Психрометрия 417
- Пузырьки
захват газа жидкостью 85
образование
из нескольких отверстий 84—85
из одиночного отверстия, уравнение 83, 84
теория 83
скорость подъема 86, 87
- Пылеулавливание, способы 298
- Пылеуловитель(и)
«Айрмат» 326, 327
«Дуклон» 304
«Дустекс» 304, 307
«Сирокко» 304, 307
эффективность улавливания 298, 300
pH-метры 410, 411
- Радиоактивность искусственная 408
- Распылители
вращающиеся, потребляемая энергия 79, 80
циклонные 65, 68
- Рассеяние света 408
- Растворители 126
- Расходомер(ы) 396—402
анероидный 400
грузо-поршневые 401, 402
объемные 402
принцип работы 396, 397
трубопровод 398, 399
экранный 400
- Реактор(ы)
взвешенного слоя
высота 277—280
«Доррко» 285
питатели 280
пылеочистительные устройства для отходящих газов 282, 283
разгрузка твердой фазы 280—283
расходомеры 280
с циклоном 282, 283
для разделения газовых смесей (табл.) 342
каталитические 284
некаталитические 284—288
с гравитационным слоем 269
- Регулирование автоматическое 373 сл.
астатическое 467
двухпозиционное 456, 457, 462, 463
интегральное 457—459
использование вычислительных машин 438 сл.
определение показателей процесса 442, 443
по интегралу и производной 461, 462
по отклонению и интегралу (изодромное) 460, 461
по производной 457, 459, 460, 468
причинно-следственные зависимости 443, 444
пропорциональное 457, 458, 465—468
ректификационных колонн 483
состава
дистиллята 489, 490
кубового остатка 490
составление схемы, наладка 447, 448
сушки твердых материалов 491—495
теплообменников 495—497
- Регулятор(ы)
гидравлические 465—468
пневматические 462—465
блочные 465, 466
двухпозиционные 462, 463
изодромные 464, 466
статические 464
электрические 468—470
двухпозиционный 468, 469
импульсный 469, 470

- Колонны**
насадочные
захлебывание
скорость 35
сопротивление 33, 35
концентрация уходящего газа, уравнение 64
массопередача в газовой фазе 49—51
оптимальные размеры, уравнение Кольборна 64
подвисяния скорость 40, 41
сопротивление керамической насадки 36—39
пленочные 69—72 см. также Абсорберы
с турбулизаторами, коэффициент массопередачи 70
распределение жидкости 44, 45
распылители см. Форсушки
распылительные 63, 66
полые 66—68
циклонные 68
расчет оптимальных размеров 31, 32
ректификационные
автоматическое регулирование
давления 487
отвода продукта 485, 487
производительности 486, 487
состава 485—488
влияние внешних возмущений 488
динамические характеристики 487, 488
с перекрестным током на тарелках 10
с противоточными тарелками 10, 11
с ситчатыми тарелками, пропускная способность 11
тарельчатые 7 сл. см. также Тарелки
затопление 10, 21
захлебывание 10
концентрация уходящего газа, уравнение 64
унос, расчет 18—20
- Колпачки барботажные 8**
- Конденсатор(ы)**
выделение гелия из природного газа 341
получение фталевого ангидрида 341, 342
получение цинка 342
- Консистомер регулирующий непрерывный 420**
- Конусы пиromетрические 388**
- Коэффициент(ы)**
абсорбции 58, 59
массоотдачи эффективные 52
в газовой фазе 51
массопередачи 58—60
надежности отстойников 164
сопротивления
отверстий 16, 17
температурный 384
- Крекинг каталитический (система «Термофор») 269, 272**
- Критерий мощности мешалок 126—128**
- Магниты**
пластинчатые 363
решетчатые 363
- Манометр(ы)**
абсолютный 388, 389
анеридные 407
дифференциальные 388—390, 399, 400
Кнудсена 392
колокольный поплавковый 388, 389
Пирани 392
пружинный 423
ртутные 406, 407
дифференциальный 388—390
с наклонной трубкой 388, 389
с силовой компенсацией 388, 390
сильфонный 389, 390
U-образный
для открытых сосудов 406
с запаянным концом 388, 389
характеристика (табл.) 388
- Масс-диффузия 340**
- Массопередача**
в газовой фазе уравнения 49—51
в жидкой фазе 47—49
скорость, уравнение 44
- Масс-спектроскопия 409**
- Месители**
с конической мешалкой 147
с многорядной лопастной мешалкой и контролостями 146
с противоположно вращающимися мешалками 146, 147
с рамной мешалкой 146
с рамно-якорной мешалкой 146
с червячной мешалкой в направляющей трубе 147
со сменным баком 143—145
со стационарными сосудами 145, 146
Металло-ионное равновесие 409
- Мешалка(и)**
аксиальнопоточные
наклоннолопастные 116
пропеллерные (винтовые) 116, 117, 121, 122
турбинные 116, 122
валы 118
горизонтальные зоны 125
критерий Рейнольдса центробежный 120
кристаллизация 126
лопастные 92
моделирование 128, 129
мощность
зависимость от критериев Рейнольдса и Фруда 127, 128
критерий 126—128
потребляемая, уравнение 119, 120
осаждение
свободное, уравнение 124, 125
стесненное 126
получение
взвесей (суспензий) 124
дисперсий 124
приводы 118
пропеллерные 92, 97
радиальнопоточные
лопастные 117, 121
рамные 117, 121
турбинные 117, 118, 122
якорные 117, 121
режим течения 120
скорость циркуляции 119
турбинные 92, 117, 118, 192
«Микско» 94
с изогнутыми лопатками 117
с прямыми лопатками 117
со спиральными лопастями 117
«Турбо-газ-абсорбер», производительность 96
уменьшение размеров частиц 126
формы потока 120—122
Мультициклон 304, 307
- Насадки**
поверхность контакта, уравнение 46
типы 32
удерживающая способность 40—42
влияние скорости газа 42
характеристики (табл.) 33, 35
геометрические (табл.) 47
эффективность
влияние рабочего давления 63
на системе воздух — вода 55, 56
- Насосы диафрагменные 169**
- Нутч-фильтры 182, 183**
- Обессоливающая установка 133, 134**
- Обогрев, методы 153**
- Осадители**
гравитационные 99
Коттреля электрические 319—322
- Осаждение**
звуковое 330, 331
электрическое, механизм 315—319
- Осветители**
дисковые 206
определение размеров 172, 173
патронные 207
плиточные слоевые (прессы) 206
продолжительность осаждения (табл.) 173
прямоугольные 170, 171
реакторы 172, 173
сепараторы магнитные 207
скорость слива (табл.) 173
со слоем вспомогательного вещества 206, 207
цилиндрические 170, 171
- Отжимание см. также Прессы**
давление прессования, уравнение Диерра 160
непрерывное 160, 161
условия равновесия 159, 160
- Отсадочные машины**
«Вемко Ремер» 359
«Денвер» 359
Джеффри 359
производительность 359
расход
воды 359
энергии 359
с движущимися ситами 359
с неподвижными ситами (Гарца) 359
- Отстойник**
высота, определение методом Робертса 163, 164
надежности коэффициент 164

- Телеметрия 431—435
импульсные системы 433
пневматическая передача 433, 435
по мостовой схеме 432
потенциометрическая 432
составные части системы 431, 432
токовая 432
частотная 432, 433
электрические системы (табл.) 434
- Температура
измерения 377 сл.
точечные 384
поверхности 385
средней 385
критическая, расчет по уравнениям Нокэя, Гатеса, Тодоса 10, 11
- Тензометры 394, 396
- Теория(и)
двухфазная
Уитмена, уравнения 52, 53
Шервуда и Пигфорда 52, 53
обновления поверхности Данкверста 52, 53
образования
капли 73—75
пены 83—85
пузырьков 83—85
отжимания 159—161
проницания 23, 24
Хигби, уравнения 52, 53
фильтрация 176—179
центрифугального осаждения 216, 217
центробежного фильтрования 221
- Теплообменник(и)
автоматическое регулирование 495—497
байпасная система 496
давления, каскадное 496
с рециркуляцией водяного потока 496, 497
датчики температуры 495
конденсатоотводчики 497
- Термометры
биметаллические, диапазон измерений 387, 388
типы элементов 387
градировка, постоянные точки (табл.) 378
манометрические 386, 387
классификация 386, 387
сопротивления 384—386
для открытого воздуха 385
конструкции 384
стеклянно-жидкостные характеристики (табл.) 387, 388
- Термомпары
выбор 380
защитные чехлы (трубки) 380—382
рабочие температуры (табл.) 382
спай 380, 381
термоэлектрические законы
гомогенной цепи 379
последующих, или промежуточных, температур 380
промежуточных металлов 379, 380
характеристика коррозионная (табл.) 380
- Титраторы автоматические 408
- Ткани фильтровальные (табл.) 309, 312, 313
- Точка(и)
замерзания 410
кипения 410
плавления 410
росы 410, 418
- Труба подъемная, скорость газа 289—291
- Трубки
Вентури 397
Далла 400
Пито 397, 398
соединения байонетного типа 256
- Трубопровод(ы)
выбор труб 114, 115
гидравлический расчет 114
насосы, выбор 115
расходомеры 398, 399
- Турбосушилки полочные
данные о работе (табл.) 267
методы расчета 266
характеристика (табл.) 266, 267
- Уголь, очистка с использованием плотной среды 355, 356
- Уловители 300—302
- Ультрацентрифуги осадительные (лабораторные) 215
- Уравнение Дниера (давления в прессе) 160
- Уровнемер(ы) 403—407
гидростатические 405, 406
поплавокный
магнитный переключатель 404
- Уровнемер(ы)
поплавокный
с гибкой мембраной 405
с магнитной связью 404
с реле, управляющий 403
с цепью или тросом 403, 404
пьезометрический 406
- Фактор
разделения 209, 210
Стокса-Каннингэма 318
- Фильтр(ы)
барабанные 195
Берта 194, 195
воздушные 330
автоматические 325
висциновые 325, 326
сухие 325, 326
характеристика (табл.) 328, 329
выбор
факторы 208
фильтровальной перегородки 179, 180
газовые тканые 310, 311
Герсея 314
гравитационные 182
Дельпарка 183
дисковые 195
для удаления пыли из фосфорного газа 323
«Доррко» 201
из стеклянных нитей 330
ленточный Лурги 204, 205
Линча 308
листовые 189—193
Валле 191
вертикальный 191, 192
Келли 190
«Ниагара» 191
Свитленда 190, 191
характеристика (табл.) 192, 193
мешочные 183
напорные 182
Оливера 197—199
песочные 183
производительность 178
работающие под давлением см. также фильтрпрессы
непрерывного действия 195
периодического действия 184 сл.
реверсивный Гранжера 187, 188
«Ридко» с коротким циклом работы 188, 189
Роднея Ханта 194
рукавные 309—315
перепад давления в ткани, уравнение 309
трехсекционный 312
с валяными материалами 314, 315
с горизонтальными плитами 193
с гранулированным насадочным слоем 308
с тканью 309—314
со слоем вспомогательного вещества 195
Слакера 193
ткани фильтровальные (табл.) 313
трубчатый 193, 194
Фунда 194
«Эймкобелт» 200, 201
- Фильтрация см. также Фильтры
влияние давления 177
влияние температуры 178
выбор условий 180, 181
классификация 176
реверсивное 187, 188
скорость, уравнения 176, 177
теория, уравнения 176, 179
- Фильтрпресс(ы)
гидравлический Карвера 187
камерные 186, 187
плиточно-рамный 184—186
схемы фильтрования и промывки 185
«Эймко-Баруэлл» 187
- Фильтры-сгустители см. Сгустители
- Фильтры-осветлители см. Осветлители
- Флегмовое число 31
- Флокулянты 222
- Флокуляция селективная 361
- Флотатор «Эймко» 91
- Флотационная фабрика, технологическая схема 373
- Флотационные машины
«Агитер» 370—372 (табл.)
«Денвер» 370—372 (табл.)
«Флагерген» 370—372 (табл.)
- Флотация 126
камера
Джуэлла 91

- Регулятор(ы)
электрические
пропорциональный 469, 470
универсальные 471
электронные 468, 471
- Редоксметрия 409
- Реле
с двойным дросселированием 467
струйное 467
- Ротаметры 401, 421
- Самолисцы 427—430
- Сверхцентрифуги трубчатые 211, 212
- Сгустители
выбор типа 169
конструкционные материалы 169
многоярусные 168, 169
непрерывного действия 165, 205
с вращающимися дисками (Петерсона) 205
Шрайвера 205
одноярусные 165—168
периодические
конус Аллена 165
осадительные конуса 165
осадительный резервуар 164
площадь на тонну материалов (табл.) 170
с автоматическим подъемом гребков 168
с верхним креплением движущихся частей 167
с приподнятой фермой 167
с тяговым приводом 165, 167
с центральным приводом 165, 166
шламов «Картер — Эдко» 195, 196
- Сепаратор(ы)
виброэнергетический 346
высокого напряжения «Карпо» 367, 368
горизонтальный паросепаратор 100
ленточные (табл.) 362
магнитные 207
барабанные 362
мокрые 363, 364
с индукционными роликами 364, 365
сухие 364, 365
с чередующимися полюсами магнитов 365
механические центробежные 302
с зернистым слоем 308, 309 см. также Фильтры тарельчатый 212
ударного действия 100—105
«Демистер» 102, 105
линейный Карбейта 101—103
эффективность попадания 300, 301
циклонные 100
электромагнитный «Калутрон» 338, 339
эффективность улавливания 308, 309
- Сепарация см. также Сепараторы
газа из жидкости 106
ионной бомбардировкой 367
магнитная см. Сепараторы магнитные
пеннофлотационная (табл.) 370
систем газ — жидкость, методы 98
с помощью электрической индукции 366
улавливание, эффективность 104, 105, 308, 309
электрическая 366—368
- Сита (табл.) 343, 344
контрольные 348
- Скрубберы
Вентури 65, 66, 68
гидравлическое сопротивление 68, 69
инжекционные 69
- Слой
взвешенный см. Взвешенный слой
движущийся 229
неподвижный 229—231
разбавленный 229, 230
фонтанирующий
аппараты 274, 275
скорость потока, уравнение 274
- Смесители
инжекторные 118, 335
с отбойными перегородками 335
струйные 335
червячнолопастные 151, 152
червячные 151, 152
- Смешивание паст см. Месители
- Сопло 397
- Спектроскопия
микроволновая 408
эмиссионная 408
- Спектрофотометрия
инфракрасная 408
рамановская 408
- Спектрофотометрия
ультрафиолетовая 408
- Столы концентрационные 359—361
- Суспензии
дилатантные 113
классификация (табл.) 161
псевдопластичные 113
реопектичные 114
тиксотропные 113
- Сушилка(и)
атмосферная 155
барабанная 247
вакуумные 155, 264 см. также Вакуум-сушилка
вращающиеся
методы расчета 258
с прямым нагревом, методы расчета 243—250
трубчатые с непрямым нагревом (табл.) 259
характеристика 258
горизонтальные с сетчатой конвейерной лентой 237, 238
жалюзийные «Мульти-Лувр» 273, 274
камерные циркуляционные, характеристика (табл.) 233, 234
ленточные 238, 239
пневматическая
двухступенчатая 290
одноступенчатая 290
характеристика высушиваемых продуктов 290, 291
полочные 231—233
методы расчета 231, 232
с вагонетками 231
стационарные 231
характеристика 232, 233
распылительные 292—298 см. также Форсунки, Диски
автоматическое регулирование 493, 494
горизонтальные 294
данные по сушке материалов (табл.) 295
для суспензий 295
стандартная прямоточная 296
расчет размеров 296, 297
характеристика 297, 298
«Рото-Лувр» 244, 261, 262
с вращающимися полками 265, 267 см. также Турбосушилки
с перемешиванием
расход мощности, уравнение 156, 157
расход энергии 156
ситчатая, автоматическое регулирование 493
со взвешенным слоем 286, 287
со сквозной циркуляцией, характеристика (табл.) 241
трубчатые паровые 243
туннельные 237, 238
- Сушка
горячим газом, скорость, расчет, уравнения 239
материалов со сквозной циркуляцией воздуха (табл.) 240
способы формирования (табл.) 238, 239
распылительная
атомизация жидкости 292
смещение капелек с газом 292
с перемешиванием 155 см. также Сушилки
- Счетчик(и) жидкости 402
- Тарелка(и)
активная площадь 12
Вентури 9
высота гидрозатвора 13
градиент уровня жидкости, расчет 14—16
Киттеля 9
клапанная
«Кох Флекситрей» 9, 10
Наттера 8—10
копачковые 8
опорные 38
пена, образование 19—21 см. также Пена
потери напора на выходе из переливного патрубка, уравнение 13
противоточная 8
«Турбогид» 9, 12
ситчатые 8, 11
провал жидкости 10
просачивание, перелив 21
сопротивление, уравнение 12, 13, 16, 17
с перекрестным током, переливные перегородки, уравнение
Френсиса 13
типы 7—9
«Унифлюкс» 9
унос, определение 18, 20
число единиц переноса 21, 22
эффективность
влияние
концентрации 30, 31
перемешивания жидкости 24—26
корреляция режимов, уравнения 22—25
к. п. д. по Мэрффи 21—25
разных типов (табл.) 26—31

ИСПРАВЛЕНИЯ К ПЕРВОМУ ТОМУ

	Напечатано	Должно быть
<p>Стр. 72, табл. I-121, название</p> <p>Стр. 145, левая колонка</p> <p>Стр. 273, подпись к рис. IV-14</p> <p>Стр. 288</p>	<p>при °С</p> <p>Л и т е р а т у р а к т а б л. VI-2 в т а б л. IV-9</p>	<p>при 0° С</p> <p>Л и т е р а т у р а к т а б л. II-6 в т а б л. IV-7</p>
	<p>Правую колонку сверху следует читать так:</p> <p>«положены результаты опытов с медными трубками внешним диаметром 22 мм и длиной 2,4 м, затем были включены данные нескольких работ с 12-миллиметровыми трубками длиной 2,4 м и 25-миллиметровыми трубками длиной 3,6 м».</p>	

- Флотация
камера
Клеменса 91
пенная 91, 92, 367, 369
Флуоресценция 408
Фонтанирование (табл.) 275
Форсунки
веерные 77, 78
газораспылительные, потребляемая энергия 80
двухпоточные 293
классификация 82, 83
мощность 78, 79
пневматические 80
применение 82, 83
производительность 78, 79
пульсационные 77, 78
работающие под давлением 293, 294
размер капель, уравнение 81, 82
с полым конусом распыла 76, 77
со сплошным конусом распыла 77
ударного действия 78
Фотокolorиметрия 408
Фотометрия пламени 408
Фракционирование 410
- Холодильники 273
Хроматография 409
газовая 340, 341
- Центрифуга (и)
выбор типа 223—226
выгрузка, приспособления 222
газовая для разделения изотопов 339
осадительные 211—217
многокамерные 212
ножевой съём осадка 215
пробирочные (лабораторные) 215
с выгружающими соплами 213
с выгружающим шнеком 213, 215
с саморазгружающимся ротором 213
тарельчатые 212, 213
технические характеристики (табл.) 215, 217
трубчатые сверхцентрифуги 211, 212
ультрацентрифуги (лабораторные) 215
питатели 222
приводы 222
разделение газов 339, 340
скорость осаждения, теория, уравнения 216, 217
фактор разделения 209, 210
фильтрующие 217—221
вертикальные со шнековой выгрузкой 219
вибрационные 219—221
- Центрифуга (и)
фильтрующие
горизонтальные со шнековой выгрузкой 219
конечное содержание жидкости, определение 221
непрерывного действия 219—221
подвесные 218
с жесткими опорами 217
с пульсирующей выгрузкой 219, 220
скорость фильтрации, уравнение 221
характеристика (табл.) 223—225
число оборотов критическое 210, 211
Центрифуга-классификатор 353
Центробежный критерий Рейнольдса 120
Циклон 99, 100, 301, 308 см. также Сепараторы
Ван-Тонгерена 100, 304, 307
керамические «Термикс» 100
мультициклон 100
перепад давления, расчет, уравнение 303, 305
потеря на трение, расчет 303, 304
прямоточный 307
расчет 306, 307
«Сирокко» 100
форма потока газа 302, 303
эффективность улавливания 305—308
- Шкала температурная международная, основные соотношения (табл.) 379
- Экстракторы
горизонтально-дисковые 130
ковшевые 130
червячные (винтовые) 130, 131
Электрофильтры 315—325
величина тока, расчет, уравнение 317
двухступенчатые 322—325
заряд частиц, расчет, уравнение 317—318
напряженность поля, уравнение 316, 317
одноступенчатые 318—322 см. также Осадители
потенциал и ионизация, определение 316
электрический ветер 317
эффективность улавливания пыли, расчет, уравнения 318, 319
Эрлифт 88
Эффективность улавливания
капель 104, 105
пыли 298, 300, 301, 305—308
- Ядерный
квадрупольный момент 408
магнитный резонанс 409

Джон Г. Перри

СПРАВОЧНИК ИНЖЕНЕРА-ХИМИКА
ТОМ II

Издательство „Химия“, Ленинградское отделение, Невский пр., 28

с. 504

Редакторы: В. А. Коц, Ю. К. Кузнецов, Н. Р. Либерман, С. Л. Томарченко

Технический редактор З. Е. Маркова

Переплет художника И. П. Кремлева

Корректоры В. Б. Генгут, Л. А. Любович

Сдано в набор 30/IX 1968 г. Подписано к печати 20/X 1969 г. Бумага типогр. № 2. Формат 84×108¹/₁₆. Уч.-изд. л. 70,87. Печ. л. 31,5. Усл. печ. л. 52,9. Тираж 40 000 экз. Цена 5 р. 19 к. Заказ 1454