

641.9  
**М** ОУЗОВ. Л.Я.СКРЯБИНА

о 1296141

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ



**МЕТОДЫ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПЫЛЕЙ**

*СН*



**Коузов П. А., Скрябина Л. Я.** Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей.— Л.: Химия, 1983. 143 с, ил.

Впервые обобщены сведения о методах определения всего комплекса свойств пыли, необходимого для правильного проектирования и эксплуатации пылеуловителей и обеспыливающих установок.

Описанные методы проведения анализов и обработки их результатов позволяют получать сопоставимые данные по дисперсному составу, насыпной плотности, удельному электрическому сопротивлению, смачиваемости, слипаемости, абразивности, взрываемости, пирофорности и т. п. Эти сведения необходимы при проектировании, испытании и выборе пылеочистных установок. В приложении собран справочный материал, необходимый при выполнении анализов.

Книга предназначена для работников заводских лабораторий, а также научно-исследовательских и наладочных организаций, связанных с работами по защите от пыли атмосферы и воздуха производственных помещений. Она может служить также пособием для преподавателей, студентов вузов и учащихся техникумов при изучении вопросов очистки воздуха и газов от пыли.

143 с, 54 рис., 27 табл., библиография 78 названий.

Рецензент — докт. техн. наук проф. В. В. Недин.

Охрана окружающей среды, и в том числе воздушной среды, признана в настоящее время одной из главных государственных задач. Необходимость усиления охраны атмосферного воздуха отмечена в «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года», утвержденных XXVI съездом КПСС.

• Число технологических процессов, связанных с приготовлением, применением и переработкой пылящих сыпучих материалов, непрерывно возрастает. Пыль стала одной из наиболее распространенных вредных примесей как в атмосферном воздухе, так и в воздушной среде производственных помещений.

Сведения о физико-химических свойствах пыли необходимы для обоснования инженерных решений, направленных на предупреждение запыленности наружной атмосферы и воздуха внутри промышленных зданий, а также при разработке пылеуловителей, применяемых в технологических процессах для разделения частиц пыли и газообразной среды. Между тем проектные и конструкторские организации не располагают этими сведениями, а их получение затруднено вследствие отсутствия книг, где были бы изложены методы определения комплекса основных физико-химических свойств пыли.

Настоящая книга имеет целью в известной мере восполнить этот пробел. В ней излагаются только те методы, которые сейчас рекомендуется использовать в работе лабораторий. Особое внимание уделено принципу действия и конструкции приборов, проведению анализа и обработке результатов. Приведены примеры определения различных свойств пыли и приложены необходимые таблицы и номограммы.

Книга представляет собой первую попытку создания краткого методического руководства по определению физико-химических свойств пыли и по-видимому потребует в дальнейшем дополнения и исправления возможных недостатков. Поэтому авторы с благодарностью примут пожелания и замечания, которые просим направлять в Ленинградское отделение издательства «Химия» по адресу: 191186, Ленинград, Невский пр., 28.

Главы 1, 2, 3 написаны П. А. Коузовым и Л. Я. Скрябиной совместно, введение и глава 4 — П. А. Коузовым, главы 5, 6, 7, 8 — Л. Я. Скрябиной и глава 9 — О. Д. Нейковым.

Развитие многих областей современной технологии сопровождается значительным увеличением приготовления и применения тонкоизмельченных порошкообразных материалов. Почти все твердое и жидкое топливо сжигается в виде пыли и тумана. Превращение материалов в порошкообразное состояние представляет собой основную технологическую операцию в различных отраслях промышленности. К ним следует отнести производство строительных материалов, обогатительные и агломерационные фабрики и заводы огнеупорных изделий черной и цветной металлургии, комбинаты по производству искусственных удобрений и ядохимикатов для сельского хозяйства, производство керамических изделий, пищевую индустрию и т. д.

Образующиеся в этих производствах запыленные газы и воздух необходимо перед выбросом в атмосферу очищать от пыли. Кроме того, разделение частиц пыли и газообразной среды является неотъемлемой составной частью технологии многих производств.

При проектировании, наладке, испытании и эксплуатации пылеулавливающих установок необходимо учитывать ряд параметров, характеризующих физико-химические свойства пыли. К ним относятся концентрация, плотность, дисперсный состав, смачиваемость, слипаемость, удельное электрическое сопротивление, взрываемость, абразивность, химический состав и др.

Так, сведения о дисперсном составе и плотности пыли необходимы для расчета степени очистки газа в пылеуловителе; от смачиваемости пыли зависит эффективность работы мокрых пылеуловителей. Знание абразивных свойств пыли требуется для обоснованного выбора толщины стенок пылеуловителей и мер по предупреждению их износа. Определение нижнего концентрационного предела взрываемости пыли необходимо для обеспечения условий взрывобезопасности.

На основании совокупности этих свойств выбирают тип пылеуловителей и схему пылеулавливающих установок, режим их эксплуатации, а также решают вопросы удаления пыли и ее утилизации. В связи с тем, что решением этих вопросов занимается широкий и все возрастающий круг лиц, возникла необходимость в разработке достоверных методов определения физико-химических свойств пыли.

Актуальность совершенствования и унификации комплекса этих методов непрерывно возрастает в свете постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О дополнительных мерах по усилению охраны природы и улучшению использования при-

родных ресурсов»\*, а также в связи с введением ГОСТ 17.2.3.02—78 «Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями» и закона СССР «Об охране атмосферного воздуха»\*\*.

За последние десять лет был опубликован ряд монографий по отдельным физико-химическим свойствам пыли и порошкообразных материалов [24, 30, 53, 57], а также многочисленные статьи, посвященные новым методам и приборам для определения этих свойств [11, 20, 32, 45, 56, 59, 66, 72, 73]. В течение последних трех лет проведены экспериментальные исследования для сравнительной оценки различных приборов [31, 35] и начаты работы по изучению комплекса физико-химических свойств пыли [60, 62] по унифицированной карте [61]. Атласы, содержащие сведения о комплексе физико-химических свойств пыли, составляются в СССР [63] и за рубежом [77]. В приложении 6 приведены образцы паспортов пылей, составленных в соответствии с унифицированной картой их физико-химических свойств. В настоящее время разработан руководящий технический материал по методам исследования физико-химических свойств промышленной пыли в лабораторных условиях [52].

При изложении метода определения того или иного свойства пыли были учтены запросы не только научно-исследовательских организаций, но и заводских лабораторий, а также требования, возникающие при обучении лиц, впервые осваивающих методы анализа свойств пыли. Перечень лабораторного оборудования, предназначенного для анализа свойств пыли, дан в приложении 5. Справочный материал, приведенный в приложениях 1—7, заимствован из различных изданий, которые можно получить только в ведущих библиотеках Советского Союза.

В целом, методы определения физико-химических свойств пылей изложены подробнее, чем в [52]. Это объясняется включением дополнительных общих и теоретических данных, а также сведений о применении полученных результатов в практике пылеулавливания,

\* Собрание постановлений правительства СССР, 1979, с. 27.

\*\* «Известия», 1980, 26 июня, № 149.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ОТБОР ПРОБ ПЫЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА

### 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Твердые частицы в дисперсных системах могут образоваться в результате процессов измельчения, конденсации и различных химических реакций. Под воздействием газовых или воздушных потоков они переходят во взвешенное состояние и при определенных условиях образуют то, что принято называть пылью.

Пыль представляет собой дисперсную систему с газообразной дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой, которая состоит из частиц, по размерам находящихся в диапазоне от близких к молекулам до видимых невооруженным глазом (примерно от 0,001 до 100 мкм) и обладающих свойством находиться во взвешенном состоянии более или менее продолжительное время [55].

Аэрозоль также представляет собой дисперсную систему с газообразной дисперсионной средой, но ее дисперсная фаза может состоять из твердых и жидких частиц, которые могут находиться во взвешенном состоянии неопределенно долгое время. Скорость оседания частиц аэрозоля весьма незначительна. Наиболее тонкие аэрозольные частицы по размерам приближаются к крупным молекулам, а наиболее крупные достигают 0,2—1,0 мкм. Понятие грубый аэрозоль с твердой дисперсной фазой часто отождествляют с пылью.

Уловленные или осажденные частицы пыли обычно отождествляют с понятием порошок, т. е. материал, который обладает свойствами, присущими сыпучим материалам. В дальнейшем изложении уловленные частицы для упрощения также называются пылью, однако необходимо всегда иметь в виду принципиальную разницу между этими понятиями.

Концентрация пыли или аэрозоля по массе частиц  $g$  или по числу частиц  $z_n$  представляет собой массу частиц или их число  $n$ , содержащихся в единице объема газа или воздуха.

Пыль, аэрозоль и порошкообразный материал обычно полидисперсны, т. е. содержат частицы различного размера. Лишь некоторые порошки по составу приближаются к монодисперсным, например ликоподий — споры плауна. Монодисперсные порошки в небольших количествах готовятся для калибровки некоторых пылеизмерительных приборов. Проблема создания монодисперсных тонко измельченных материалов в больших количествах до настоящего времени не решена.

Под размером  $b$  частиц пыли подразумевают диаметр, длину стороны частицы или ячейки сита, наибольший размер проекции частицы и т. п. Точно характеризует размер частицы только диаметр при шарообразной ее форме,

Эквивалентным диаметром частицы неправильной геометрической формы  $b_s$  называется диаметр шара, объем которого равен объему частицы, или диаметр круга, площадь которого одинакова с площадью проекции частицы.

Седиментационной скоростью частицы  $v_s$  называется скорость оседания, которую принимает частица в спокойной среде под влиянием силы тяжести. Она зависит от размера частицы, ее формы и плотности, а также от плотности и вязкости среды.

Седиментационным диаметром частицы  $\delta_s$  называется диаметр шара, скорость оседания и плотность которого соответственно равны скорости оседания и плотности частицы неправильной формы. Седиментационный диаметр частиц (в мкм) вычисляют, исходя из данных седиментометрического анализа по следующей формуле:

$$\delta_s = \sqrt{18 \cdot 10^7 \eta H / (\rho_t - \rho_j) g t} \quad (1)$$

Здесь  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости, Па·с;  $\rho_t$  — плотность материала частиц, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_j$  — плотность жидкости, г/см<sup>3</sup>;  $H$  — высота оседания частиц, см;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $t$  — время оседания, с.

### 1.2. ОТБОР ПРОБ ПЫЛИ ИЗ ГАЗОВОГО ПОТОКА

#### Общие положения

Свойства частиц пыли, взвешенной в воздушном или газовом потоке, могут существенно отличаться от свойств уловленной пыли. Это наиболее ясно проявляется при определении дисперсного состава пыли [58] в связи с тем, что определенная доля частиц пыли в газах промышленных установок или в вентиляционном воздухе представляет собой агрегаты, состоящие из нескольких «слипшихся» пылинок. Агрегаты ведут себя в газообразной среде как частицы более крупные, чем те, из которых они состоят. Чем больше таких агрегатов в пыли и чем они крупнее, тем легче их выделить из воздуха или газа и тем более высокой может быть степень очистки пылеулавливающих устройств.

Большинство современных методов дисперсионного анализа пыли включает две операции: предварительное выделение из газообразной среды навески пыли и последующее ее диспергирование в жидкой или газообразной среде. К ним относятся ситовой анализ, седиментометрия и ряд других методов. При вторичном диспергировании практически нет гарантий получить первоначальное состояние частиц: число и крупность агрегатов обычно меняются. Поэтому при испытании степени улавливания пылеочистных устройств и определении гранулометрического состава реальной пыли в газовом или воздушном потоке

желательно применять методы, исключаяющие вторичное диспергирование. К приборам, основанным на таких методах, относятся различного типа импакторы, сепараторы-циклончики и ротационный анализатор дисперсности РАД.

В тех случаях, когда в пыли нет агрегатов, методы дисперсионного анализа порошкообразных материалов полностью применимы и для пылей. Примером может служить экспериментальная пыль, используемая для искусственного запыления воздуха при стендовых испытаниях. Для ее полного дезагрегирования принимаются специальные меры.

В настоящее время из физико-химических свойств пыли, которые могут быть определены непосредственно в газовых потоках (газоходах), можно назвать только ее дисперсный состав и удельное электрическое сопротивление [30, 44]. Остальные свойства пыли несмотря на то, что они зависят от реальных условий и параметров газообразной среды (температуры, влажности, химического состава), приходится определять в лабораторных условиях на основе анализа проб, отобранных из газоходов или вентиляционных воздухопроводов, т. е. путем анализа уловленной пыли.

Следует иметь в виду, что отбор представительной пробы перед каким-либо пылеуловителем представляет собой сложную операцию, требующую определения поля концентрации пыли в сечении газохода. Это объясняется тем, что пыль перед пылеулавливающим устройством содержит в большом количестве грубые фракции, которые могут неравномерно распределяться по сечению газохода.

В некоторых случаях дисперсный состав пыли в газе, поступающем в пылеуловитель, можно характеризовать по совокупности данных ее анализа в газоходе после пылеуловителя и пробы уловленной пыли, отобранной из бункера. Пыль после пылеуловителя (циклона, фильтра) обычно тонкодисперсная, и ее можно отбирать в одной точке газохода, так как она распределяется по его сечению достаточно равномерно. Однако отбор представительной пробы пыли из бункера пылеуловителя — также достаточно сложная операция.

При отборе пробы пыли из газохода должны соблюдаться все требования, которые предъявляются при определении ее концентрации в газовом потоке, а именно [76]:

- а) носик пылезаборной трубки должен быть направлен навстречу газовому потоку соосно с основным его направлением; отклонение не должно превышать 5°;
- б) скорость газа во входном отверстии наконечника пылезаборной трубки должна быть равна скорости газового потока в измеряемой точке; допускается превышение первой над второй не более 10%;

в) отбираемая проба должна быть достаточно представительной, т. е. отвечать среднему распределению частиц по размерам в рабочем сечении газохода; при расчете по отобранной

пробе концентрации пыли она должна быть равна среднему значению в газоходе.

Кроме того, должно быть обеспечено выполнение двух дополнительных условий:

масса отобранной пробы пыли должна быть достаточной для определения исследуемого свойства, а при определении всего комплекса свойств должна составлять около 800 г;

применяемое в пылезаборной установке фильтрующее устройство должно обеспечивать извлечение всей массы уловленной пыли с точностью до 3%.

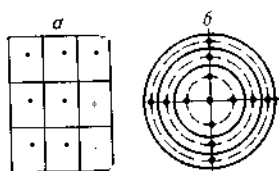
### **Выбор участка газохода и разбивка его сечения**

Представительную пробу невозможно получить без правильного выбора сечения газохода для отбора проб. Следует выбирать прямолинейные участки с установившимся газовым потоком, достаточно удаленные от фасонных частей: поворотных колен, тройников, задвижек. Длина участка должна составлять восемь — десять диаметров газохода, причем измерительное сечение выбирается в третьей четверти длины выбранного участка по ходу газа. При отсутствии достаточно длинных прямолинейных участков место отбора проб должно находиться ближе к концу участка. Нельзя производить отбор проб непосредственно после дымососов, циклонов, если они не имеют выпрямляющих поток устройств.

Желательно выбирать вертикальные участки газоходов. На горизонтальных участках большой протяженности концентрация пыли в нижней части сечения газохода выше, чем в верхней, а пыль более грубодисперсна. Участки круглого сечения предпочтительнее квадратных, а квадратные — прямоугольных. Скорость газа в измерительном сечении трубопровода должна быть не менее 4 м/с.

Даже при соблюдении всех перечисленных требований в измерительных сечениях сохранится некоторая неравномерность скорости газового потока (а отсюда и неравномерность распределения пыли, и ее неоднородность по свойствам, тем большая, чем сложнее конфигурация газохода). Поэтому пробы следует отбирать в различных местах сечения, условно разделяя его на ряд равновеликих площадей.

Если газоход имеет прямоугольное сечение, его разбивают на площади, подобные сечению газохода, плоскостями, параллельными его стенкам, и измерения производят в центре каждого полученного прямоугольника (рис. 1,а). Сторона такого прямоугольника не должна превышать 150—200 мм. Минимальное число измерительных точек — три в каждом направлении. На двух взаимно перпендикулярных сторонах газохода по осям, на которых расположены центры прямоугольников, прорезают отверстия диаметром 50 мм и приваривают в этих местах короткие (25—30 мм) штуцеры из отрезков труб с внутренним



**РИС. 1. Разбивка прямоугольного и круглого сечения газохода на участки равновеликой площади.**  
Показаны точки замера.

диаметром 50 мм, которые закрывают металлической крышкой с резьбой. Для поддержания трубки во время замеров рекомендуется приваривать к газоходу перпендикулярно его оси стальной пруток рядом со штуцером.

Газоходы круглого сечения разбивают на ряд концентрических колец с равновеликими площадями и измерение производят по двум взаимно перпендикулярным диаметрам (рис. 1,б), для чего к стенке газохода приваривают два штуцера. Расстояние между штуцерами — четверть окружности газохода. Можно считать, что достаточны надежные результаты могут быть получены, если газоходы круглого сечения будут разбиты на следующее число колец:

Диаметр газохода, мм	200	200—400	400—600	600—800	800—1000	1000
Число колец	3	4	5	6	8	10

Если не удалось выдержать требования, предъявляемые к выбору сечений для замеров, то число колец должно быть увеличено. Середина ширины каждого кольца определяется по формуле

$$l_i = R \sqrt{(2i-1)/2n}$$

где  $k$  — расстояние от центра газохода до точки замера;  $R$  — радиус газохода;  $n$  — число колец, на которые разделена площадь газохода;  $i$  — порядковый номер кольца (считая от центра).

В практических целях удобно пользоваться величиной расстояния от внутренней стенки газохода в месте ввода заборной трубки до точки замера. Для круглого газохода эта величина может быть определена по формуле

$$in = K_n D \quad (2)$$

где  $D$  — диаметр газохода;  $K_n$  — коэффициент (выбирается по табл. 1).

**Таблица 1. Коэффициент  $K_n$  для вычисления расстояния от внутренней стенки газохода до точки отбора пробы по формуле (2)**

K <sub>n</sub>	Число равновеликих колец									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K <sub>1</sub>	0,146	0,067	0,044	0,032	0,026	0,021	<b>0,018</b>	0,016	0,014	<b>0,012</b>
K <sub>2</sub>	<b>0,500</b>	0,250	0,146	0,105	0,082	0,067	0,072	0,049	0,043	0,026
K <sub>3</sub>	0,854	0,500	0,296	0,194	0,146	0,118	0,098	0,096	0,075	0,067
K <sub>4</sub>	—	0,750	<b>0,500</b>	0,324	0,226	0,177	0,146	0,124	0,109	0,093
K <sub>5</sub>	—	—	0,704	<b>0,500</b>	0,342	0,25	0,212	0,169	0,146	0,129
K <sub>6</sub>	—	—	0,854	0,676	<b>0,500</b>	0,356	0,267	0,22	0,188	0,165
K <sub>7</sub>	—	—	0,956	0,806	0,658	<b>0,500</b>	0,366	0,283	0,238	0,204

K <sub>n</sub>	Число равновеликих колец									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K <sub>0</sub>	—	—	—	0,895	0,774	0,644	<b>0,500</b>	0,375	0,297	0,25
K <sub>1</sub>	—	—	—	0,968	0,854	0,750	0,634	<b>0,500</b>	0,382	0,306
K <sub>2</sub>	—	—	—	—	0,918	0,823	0,733	0,625	<b>0,500</b>	0,388
K <sub>3</sub>	—	—	—	—	0,974	0,882	0,788	0,717	0,618	<b>0,500</b>
K <sub>4</sub>	—	—	—	—	—	0,933	0,854	0,780	0,703	0,612
K <sub>5</sub>	—	—	—	—	—	0,979	0,902	0,831	0,762	0,694
K <sub>6</sub>	—	—	—	—	—	—	0,928	0,876	0,812	0,750
K <sub>7</sub>	—	—	—	—	—	—	0,982	0,924	0,854	0,796
K <sub>8</sub>	—	—	—	—	—	—	—	0,951	0,891	0,835
K <sub>9</sub>	—	—	—	—	—	—	—	0,984	0,925	0,871
K <sub>10</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	0,957	0,907
K <sub>11</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	0,986	0,933
K <sub>12</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,964
K <sub>13</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,988

Примечание. Значение  $K_n=0,5$  соответствует центру газохода.

### Конструкция устройств для отбора проб

Процесс отбора пробы пыли из пылегазового потока включает следующие основные операции:

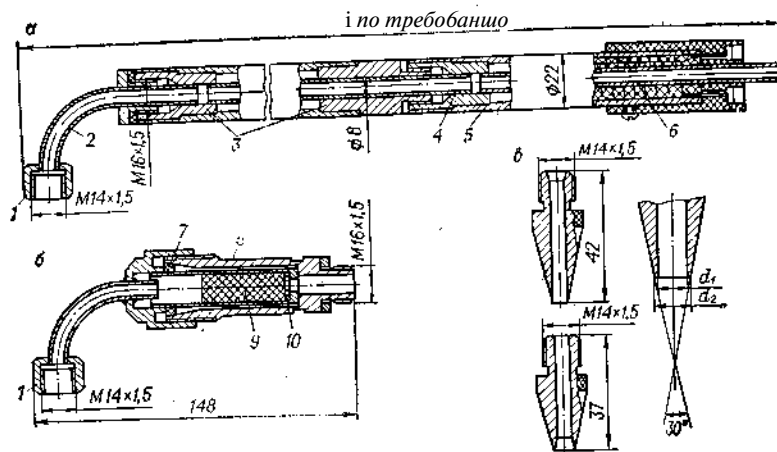
отбор из потока некоторого объема запыленного газа; пыль, содержащаяся в этом объеме и в основном потоке, должна быть идентична по свойствам;

осаждение пыли, содержащейся в отобранном объеме газа, с помощью пылеотделительного устройства;

извлечение пыли, уловленной пылеотделительным устройством.

Пробу запыленного газа отбирают из газохода с помощью заборной трубки, снабженной набором сменных наконечников различного диаметра (см. рис. 2, в). Наконечники необходимы для обеспечения изокINETИЧНОСТИ отбора — равенства скорости газа в данной точке газохода и в устье заборного наконечника  $v_0$ . Несоблюдение этого требования приводит при превышении скорости  $v_0$  в сечении входного отверстия наконечника над скоростью основного газового потока  $v$  к потере крупных частиц пыли, которые, стремясь по инерции сохранить прежнее направление движения, пройдут мимо входного отверстия заборной трубки. Наоборот, при  $v_0 < v$  в отобранной пробе газа процент крупных частиц может оказаться больше, чем в основном газовом потоке.

Осаждение пробы пыли из отбираемого объема газа осуществляется в пылеотделительном устройстве, которое может располагаться вне газохода (внешняя фильтрация) или вводиться внутрь газохода (внутренняя фильтрация). Метод внешней фильтрации обеспечивает отбор большой пробы (100—200 г)



**РИС. 2.** Заборная трубка для внешней и внутренней фильтрации: а—трубка со сменным коленом для внешней фильтрации; б—фильтрующий элемент для внутренней фильтрации; в — сменный наконечник; /—гнездо для наконечника; 2—колено; 3—свинчиваемые звенья; 4—трубка; 5—кожух; 6—нагреватель; 7—уплотнение; 8—корпус фильтрующего элемента; 9—фильтрующая набивка; 10—гильза.

при однократном заборе, быструю смену фильтрующих элементов и отбор пробы запыленного газа с высокой температурой. Метод внутренней фильтрации применяется для отбора проб влажных газов, в случае возможной конденсации влаги или смол, осаждающихся на внутренних стенках заборной трубки.

Заборные трубки. Существует ряд конструкций заборных трубок, разработанных в различных организациях [16, 17, 38]. Удобна, например, трубка, используемая Семибратовским филиалом НИИОГАЗ. Она пригодна как для внешней, так и для внутренней фильтрации (рис. 2, а). Трубку нужной длины собирают из звеньев. Длина звена 500—700 мм, соединение резьбовое с уплотнением. Внутренний диаметр 8 мм. При отборе проб методом внешней фильтрации в трубку ввинчивают плавное загнутое на 90° колено с гнездом для сменного наконечника. При отборе проб методом внутренней фильтрации ввинчивается фильтрующий элемент (рис. 2, б), также снабженный коленом с гнездом для сменного наконечника. Диаметр элемента равен 37 мм. Поэтому его можно вводить в газопровод через типовой штуцер с внутренним диаметром 50 мм. Для выступающего из газопровода участка трубки предусмотрен электрообогрев с целью предотвращения конденсации паров.

При значительных колебаниях скорости газового потока по сечению газопровода применяются трубки с уравновешенными статическими напорами — трубки нулевого типа [38]. В таких трубках для соблюдения изокINETИЧНОСТИ отбора достаточно поддерживать нулевую разность статических напоров, измеряемых внутри канала трубки или у входного отверстия и в газовом

потоке, омывающем трубку. При использовании трубки нулевого типа следует иметь в виду, что отклонение их оси от встречного направления основного газового потока искажает не только массу отбираемой пробы, но и величину расхода газа. Искажение тем значительнее, чем больше диаметр наконечника.

Для отбора проб пыли из газов, имеющих температуру более 500 °С, рекомендуется применять водоохлаждаемую пылезаборную трубку с внешней фильтрацией [12].

Фильтрующие устройства. В корпус фильтрующего элемента для отбора проб методом внутренней фильтрации (рис. 2, б) вставляется гильза охотничьего патрона 12 калибра. (Предварительно из нее удаляют капсуль и в доньшке просверливают 8—12 отверстий диаметром 1,2 мм.) Гильзу на 1/3 высоты заполняют фильтрующим материалом — стекловолокном. Поверх стекловолокна помещают металлическую сетку с размером ячейки 200—300 мкм, а под него — фильтр из ткани Петрянова марки ФПФ-10-3. При температуре газа выше 150 °С вместо ткани Петрянова можно применить базальтовую бумагу, выдерживающую температуру до 500 °С. Фильтр помещается под набивку для доулавливания мелких фракций пыли.

При отборе проб методом внешней фильтрации можно использовать бумажные или тканевые фильтры, применяемые при определении запыленности газов [16, 17].

Однако эти фильтры быстро забиваются пылью, и их сопротивление недопустимо возрастает. Поэтому их нужно часто менять (для отбора пробы до 500 г приходится сменить несколько десятков фильтров), а это ведет к заметной потере мелких фракций, которые трудно удалить из пор фильтра. Можно рекомендовать пылеотделительное устройство, состоящее из последовательно соединенных с заборной трубкой небольшого циклончика и фильтра. В циклончике осаждается большая часть пыли, а фильтр служит лишь для доулавливания мелких фракций. Можно использовать циклончик конструкции ВТИ (рис. 3), присоединив его к заборной трубке на резьбе с помощью накидной гайки или коротким резиновым шлангом. Фильтр с циклончиком соединяется через резиновую пробку с отверстием. Бумажные или тканевые фильтры заключены в специальные патроны (рис. 4).

Во избежание конденсации паров воды патроны имеют электрообогрев, циклончик теплоизолируется.

Бумажные фильтры изготавливают из обычной фильтровальной бумаги и применяют при отборе проб из химически неагрессивных газов при температуре до 105 °С. Клей для бумажных фильтров приготавливают следующим образом: 20 г сахара и 3,6 г алюмокалиевых квасцов растворяют в 100 мл нагретой до 50 °С воды, затем добавляют 105 г декстрина и хорошо перемешивают, нагревают до 75—80 °С и выдерживают 5—10 мин, после чего добавляют 0,5 г фенола.



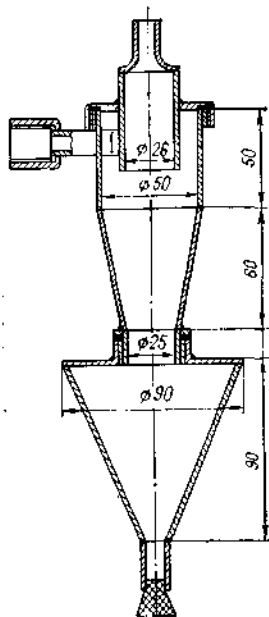
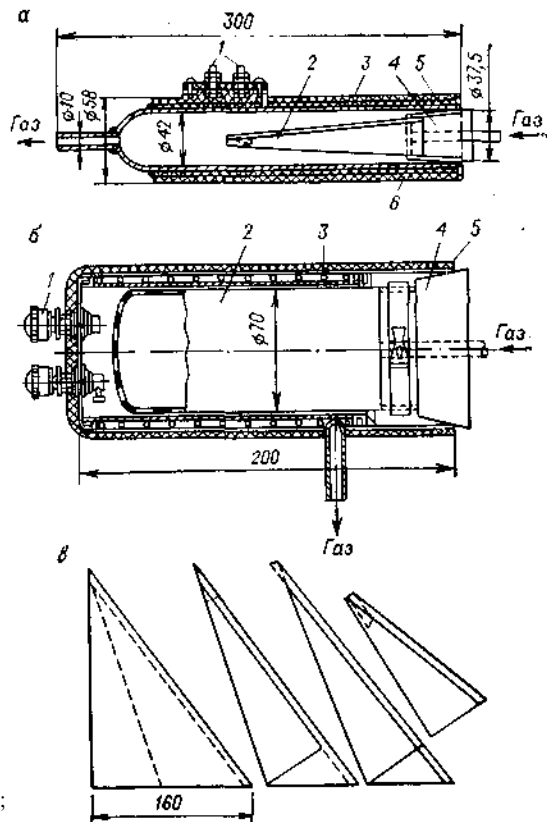


РИС. 3. Циклончик ВТИ.

РИС.4. Патроны для бумажного (а) и тканевого (б) фильтра. Порядок раскроя и склеивания бумажного фильтра (в):  
 1 — клеммы; 2 — фильтры;  
 3 — нагреватель; 4 — пробка;  
 5 — корпус; 6 — теплоизоляция.



При температуре газов выше 105 °С или при фильтрации агрессивных газов вместо бумажного фильтра можно применять фильтр, изготовленный из фильтрующего материала, выбранного по табл. 2. Фильтр в виде мешочка сшивают на машине, **Таблица 2. Волокнистые фильтровальные материалы [19, 48]**

Материал	Термо-стойкость, °С	Химическая стойкость в газовой среде	
		кислой	щелочной
Ткань хлориновая фильтровальная арт. 86006 ГОСТ 20714—75	70	Хор.	Хор.
Вельветон арт. 3601 ГОСТ 21790—76	80	Неуд.	»

Материал	Термо-стойкость, °С	Химическая стойкость в газовой среде	
		кислой	щелочной
Фильтровальный материал ФПФ-10-3	120	Хор.	Хор.
Ткань лавсановая фильтровальная арт. 860316 ТУ 17 РСФСР 86 53-75	130	»	Неуд.
Ткань нитроновая арт. 133 ТУ 17 РСФСР 5509—72	120	Уд.	Хор.
Фильтровальный материал ФПАП-10-3	180	Неуд.	»
Ткань стеклянная фильтровальная ТСФТ-2-СГФ ТУ 6-11-375-76	250	Хор.	»
Фильтровальный материал ФПАР-15-1,5	250-270	»	»
Ткань из кремнеземных нитей КТ-II-C-8/3	600	»	Уд.

тонкой иглой, двойным запошивочным швом. Фильтр из материала ФП можно изготовить термическим склеиванием, прокачивая шов горячим роликом или с помощью паяльника.

Пылеемкость бумажного фильтра около 2 г, а тканевого до 50 г.

### Подготовка к отбору пробы

После выбора газохода, рабочего сечения, разметки сечения газохода и установки штуцеров для ввода пылезборной трубки и термометра выполняются следующие операции, предшествующие непосредственному отбору пробы: определяется химический состав газа, измеряются температура в газоходе, влагосодержание газа, статический напор в сечении газохода, выбранном для работы, скорость газа в тех точках сечения газохода, где будет отбираться пыль.

Перечисленные операции необходимы для расчета плотности газа при нормальных и рабочих условиях, расчета диаметра входного отверстия сменного наконечника пылезборной трубки (с целью соблюдения принципа изокINETичности отбора пробы); выбора метода отбора пробы.

Химический состав газа определяют газоанализаторами ГХ-1, ГХП-3М, ВТИ и др. [17, 34], а влагосодержание — одним из методов, описанных в работах [16, 17].

Скорость газового потока измеряют с помощью пневмометрической трубки, соединенной резиновыми шлангами с микроманометром. Методика измерения скоростей потока подробно

изложена в многочисленных руководствах по контролю пылеулавливающих аппаратов [16, 17, 38], и здесь дана только последовательность выполнения измерения.

Определив число точек замеров по сечению газохода и рассчитав расстояние от стенки газохода до каждой точки, размечают пневмометрическую трубку. Для этого от ее конца, вводимого в газоход, отмечают длину, равную расстоянию от стенки газохода до точки замера с учетом толщины его стенки, высоты штуцера и длины выступающей из штуцера пробки.

Соединяют пневмометрическую трубку резиновыми шлангами с микроманометром и проверяют герметичность соединения [17, 26].

Пневмометрическую трубку с надетой на нее резиновой пробкой (при высокой температуре газов вместо резиновых пробок пользуются уплотнениями из шнурового асбеста), плотно вставляют в штуцер. Во избежание конденсации влаги в трубке перед началом измерений ее прогревают в газоходе в течение 15 мин (при этом входное отверстие трубки должно быть направлено по ходу газа).

Прогретую трубку разворачивают на 180° так, чтобы входное отверстие располагалось строго навстречу газовому потоку, и приступают к замерам, перемещая трубку от ближней стенки газохода к дальней, а затем от дальней стенки к ближней. В каждой измерительной точке записывают показания микроманометра. Кроме того, измеряют температуру газового потока, разрежение в газоходе и барометрическое давление. Результаты измерений заносят в журнал (см. ниже).

Скорость газа в данной точке определяют по номограмме (рис. 5) или рассчитывают по формуле

$$v_i = \sqrt{\frac{2ghaK\varphi_m}{\rho_{сп}}} \cdot \rho_r$$

Здесь  $g$  — ускорение силы тяжести,  $m/c^2$ ;  $h$  — показание микроманометра, мм;  $a$  — коэффициент наклона трубки микроманометра;  $K$  — коэффициент пневмометрической трубки;  $\rho_m$  — плотность жидкости, залитой в микроманометр,  $kg/m^3$ ;  $\rho_{сп}$  — плотность чистого спирта ( $809,5 kg/m^3$ );  $\rho_0$  и  $\rho_r$  — плотность газа при нормальных условиях (760 мм рт. ст. и  $0^\circ C$ ) и при условиях отбора пробы из газохода,  $kg/m^3$ , причем

$$\rho_r = 0,36\rho_0(B \pm P_r)/(273 + M)$$

$B$  — барометрическое давление, мм рт. ст.;  $P_r$  — избыточное давление газа в газоходе, мм рт. ст.;  $U$  — температура газа в газоходе,  $^\circ C$ .

#### Форма журнала для записи результатов измерения скорости газа в точках отбора проб

##### а) Общие сведения

1. Дата проведения измерений.
2. Завод, установка.
3. Место отбора пробы.
4. Температура газа в газоходе  $t$ ,  $^\circ C$ .
5. Барометрическое давление  $B$ , мм рт. ст.

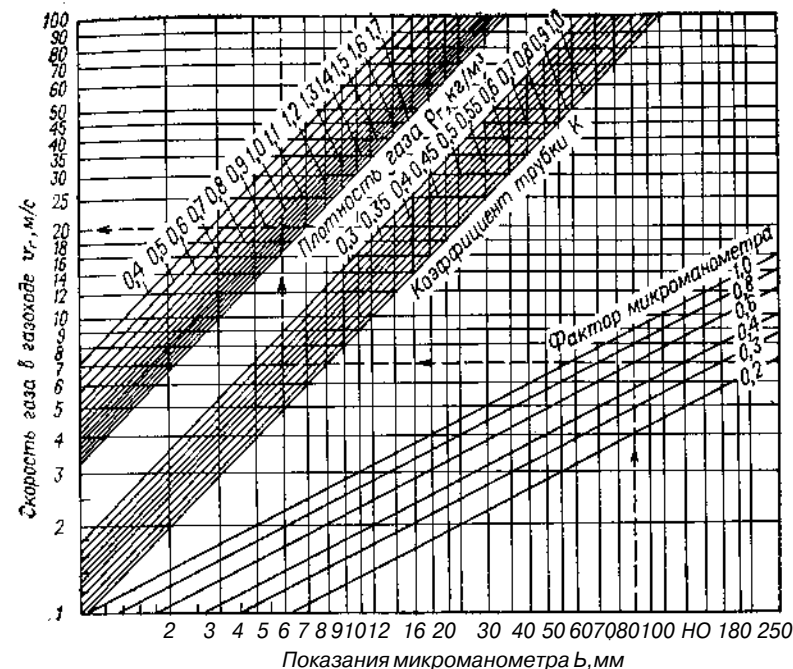


Рис. 5. Номограмма для расчета скорости потока в газоходе при замерах микроманометром с пневмотрубкой. (Фактор микроманометра равен  $\rho_m/\rho_{сп}$ )

6. Плотность газа при условиях отбора пробы  $\rho_r$ ,  $kg/m^3$ .
7. Коэффициент наклона трубки микроманометра  $a$ .
8. Коэффициент пневмометрической трубки  $K$ .

##### б. Результаты измерений

Сечение (номер или диаметр; вертикальное или горизонтальное)	Номера точек по сечению газохода			
	1	2	3	и т. д.
Расстояние до точки измерения, мм				
Коэффициент наклона трубки микроманометра				
Показания на шкале микроманометра, мм				
Скорость газа, м/с				
Избыточное давление (разрежение) в газоходе, Па				

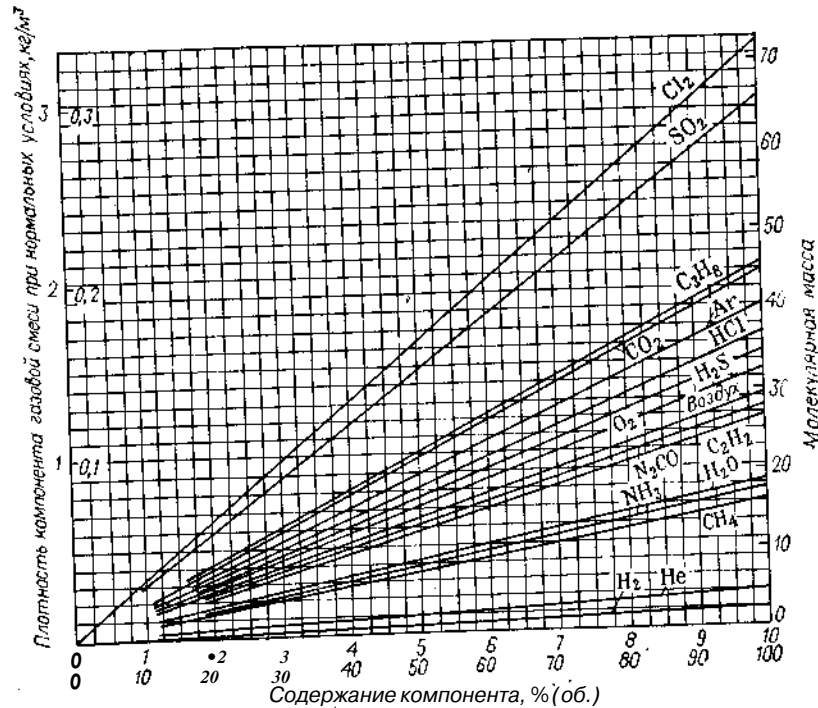


РИС. 6. Номограмма для определения плотности газа в зависимости от содержания компонентов при нормальных условиях.

Плотность газа, состоящего из нескольких компонентов, концентрация которых по объему равна  $a, b, \dots, n$ , можно с достаточной точностью определить с помощью номограммы (рис. 6) или по формуле

$$\rho_r = 0,01 (M_a/22,4 + M_b/22,4 + \dots + M_n/22,4)$$

где  $M_a, M_b, M_n$  — молекулярные массы компонентов.

Определив скорость газа в каждой точке измерительного сечения, рассчитывают усредненную по сечению газохода скорость газа:

$$v_{cp} = (v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_n)/n$$

Здесь  $n$  — число измерительных точек по сечению газохода.

Если скорость газа в каждой измерительной точке отличается от усредненной не более чем на 15% или отбираемая пыль мелкая (например, возгонная) с размером частиц менее 5 мкм, отбор пробы можно производить из одной точки сечения (обычно по оси газохода).

Во время отбора пробы скорость газа в канале пылезборной трубки должна быть равна 20–30 м/с; скорость более 30 м/с значительно увеличивает гидравлическое сопротивление трубки,

при скорости менее 20 м/с пыль может осаждаться в канале трубки.

Расчет диаметра наконечника, обеспечивающего изокINETИЧность отбора, производится по формуле

$$d_{tr} = d \sqrt{v_{tr}/v_n} \quad (3)$$

Здесь  $d_x$  — диаметр входного отверстия наконечника, мм;  $v_{tr}$  — скорость газа в канале трубки;  $v_n$  — скорость во входном отверстии наконечника, равная скорости потока газа в точке замера, м/с;  $d_{tr}$  — диаметр канала трубки, мм.

Если наконечника с данным диаметром входного отверстия нет в комплекте, следует взять ближайший меньший.

Расход газа  $Q_p$  при отборе пробы предварительно рассчитывается (в л/мин) по формуле

$$Q_p = 0,0282 d_n^2 \cdot v_{tr} \cdot \sqrt{\frac{P_r \pm P_t}{\rho_{AB} - \rho_v}} \quad (4)$$

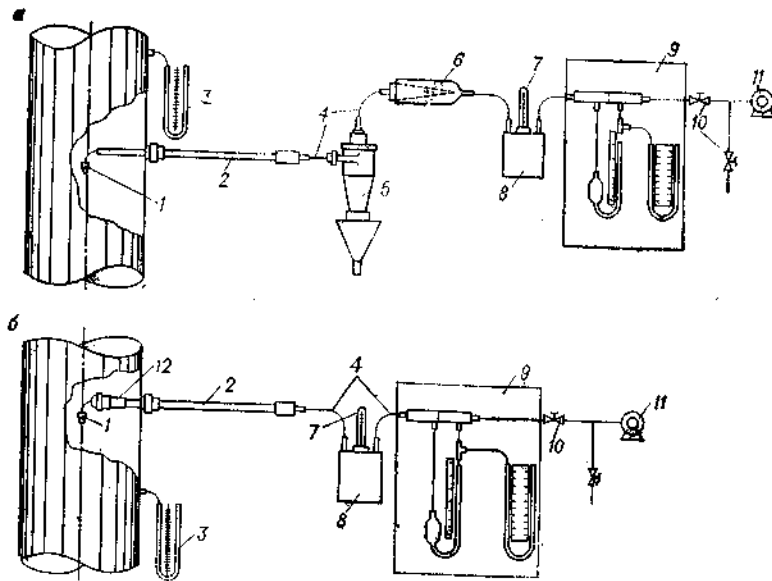
Здесь  $d_n$  — диаметр входного отверстия наконечника, мм;  $v_{tr}$  — скорость газа в точке замера, м/с;  $P_r, P_t$  — разрежение и температура газа у расходомера;  $\rho_{AB}$  — плотность отбираемого газа при нормальных условиях, кг/м³;  $\rho_v$  — плотность газа, принятая при калибровке расходомера, кг/м³.

### Отбор пробы

Подобрав сменный наконечник пылезборной трубки и рассчитав показания шкалы расходомера, собирают установку по схеме, приведенной на рис. 7. Перед отбором пробы установка должна быть проверена на герметичность.

При отборе проб методом внешней фильтрации надо включить электрообогрев трубки и фильтрующего элемента за 10–15 мин до начала отбора. Затем трубку через штуцер вставляют в газоход так, чтобы отверстие наконечника оказалось в нужной точке сечения и было направлено по движению газа. По расходомеру устанавливают рассчитанный для данной точки расход газа. После этого заборная трубка поворачивается отверстием навстречу потоку газа. За правильной установкой наконечника трубки следят по укрепленной на ней пластинке-указателю. В течение всего времени отбора пробы в данной точке поддерживают постоянный расход газа.

Продолжительность отбора пробы зависит от запыленности газа, типа фильтра, расхода газа, мощности тяго-дутьевого оборудования. Признаком необходимости смены фильтра служит увеличение сопротивления установки на 20 кПа (150 мм рт. ст.). Если проба отбирается на фильтр без циклончика, то для смены фильтра нужно осторожно вынуть пробку из фильтрующего элемента, оставив фильтр в патроне (если в газоходе разрежение, то из фильтра, оставленного на пробке, часть пыли может унести обратно в газоход). Затем вынимают фильтр из патрона, складывают так, чтобы пыль не могла высыпаться, и кладут в специально для этого предназначенную коробку. На пробку



Р И С. 7. Компонка аппаратуры для отбора пробы пыли из потока в газоход методом внешней (а) и внутренней (б) фильтрации:

1 — сменный наконечник; 2 — заборная трубка; 3 — U-образный манометр; 4 — резиновые шланги; 5 — циклончик; 6 — патрон с фильтром; 7 — термометр; 8 — сборник конденсата; 9 — расходомер; 10 — зажим; 11 — тяго-дутьевое устройство; 12 — фильтрующий элемент.

надевают чистый фильтр, вставляют его вместе с пробкой в патрон и продолжают отбор. На время смены фильтров тяго-дутьевое устройство не отключают.

При отборе проб с применением пылеотделительного устройства из циклончика и фильтра для смены фильтра трубку вынимают из газохода, не отключая тяго-дутьевого устройства. Если трубку не вынуть из газохода, то пыль из циклончика может быть частично унесена в газоход (если в газоходе разрежение).

При отборе проб методом внутренней фильтрации последовательность операций такая же. Всякий раз для замены фильтра трубку осторожно, чтобы не стряхнуть пыль, вынимают из газохода. Тяго-дутьевое оборудование отключают, когда трубка уже вынута. Гильзы с пылью помещают в вертикальном положении открытым концом вверх в коробку, разделенную на ячейки.

После окончания отбора проб заборную трубку и поверхность пробки фильтрующего элемента следует прочистить. Собранную пыль высыпают в пакет из кальки и помещают в ту же коробку для проб. Надо стремиться к максимальному полному извлечению пыли из пылеотделительных устройств и при этом не допускать пыления. Для предупреждения увлажнения пыли коробку по разьему крышки обматывают липкой лентой и транспортируют в лабораторию.

Если отбор проб совмещается с определением запыленности газового потока, то перед извлечением пыли фильтры взвешивают.

Из фильтров пыль удобнее всего высыпать в высокий стакан или литровую банку. Банку закрывают крышкой, в которой сделана прорезь 60 X Ю мм. В эту прорезь вставляют фильтр открытым концом вниз и, придерживая фильтр за нижнюю часть, постукивают по нему. После осаждения пыли в банке фильтр вынимают, если он бумажный — разрезают по образующей, если тканевый — выворачивают. Кисточкой осторожно сметают оставшуюся на стенках фильтра пыль в банку. В одну банку высыпают все пробы, отобранные в различных точках сечения газохода. Для извлечения мелких фракций из пор фильтра, последний следует прополоскать в жидкости, употребляемой в качестве дисперсионной среды при анализе состава пыли (приложение 3). Полученную суспензию выпаривают в сушильном шкафу, осадок разрыхляют и смешивают с пробой. Туда же высыпают и пыль, извлеченную из заборной трубки.

Циклончик отсоединяют от заборной трубки и фильтра, кладут горизонтально и ослабляют пробку в бункере, но так, чтобы отверстие осталось закрытым пробкой. Затем надевают на конусную часть бункера литровую банку, поворачивают циклончик с банкой вертикально и постукивают по циклончику деревянной палочкой. Пробка падает в банку, и туда же высыпается пыль из бункера. Циклончик тщательно обстукивают и через отверстие в бункере обметают тонкой кисточкой. Пробку из пыли вынимают пинцетом, обметают кисточкой. Пыль, извлеченную из циклончика и фильтра, стоящего после него, смешивают. Туда же высыпают пыль, извлеченную из заборной трубки. Банку с пылью закрывают полиэтиленовой пробкой.

Из гильз пыль высыпают на кальку, при этом придерживают пинцетом набивку, чтобы она не упала в насыпанную пыль. Гильзы, сеточки и фильтры обметают кисточкой. Мелкие фракции из пор фильтров вымывают дисперсионной средой, как описано выше. Со стекловолкна пыль стряхивают в высокий стакан. Туда же помещают пыль, высыпанную на кальку и смывают с фильтра. Пыль, собранную из всех гильз, смешивают и хранят в герметичном сосуде.

### 1.3. ОТБОР ПРОБ ПОРОШКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА ИЛИ УЛОВЛЕННОЙ ПЫЛИ

Уловленную пыль отбирают для исследования в тех случаях, когда по каким-либо причинам нельзя взять пробу из пылегазового потока. Пробу порошкообразного материала или уловленной пыли берут из емкости, с ленты транспортера, из тетки или бункеров пылеуловителей.

В накопительном бункере пыль может откладываться в процессе достаточно продолжительной работы установки. В течение

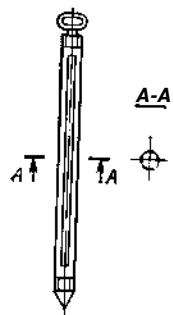


РИС. 8. Пробоотборник для взятия пробы уловленной пыли из емкости.

этого времени технологический режим источника пылеобразования мог быть нестационарным. Нестабильность работы пылеобразующего агрегата, различия в сырье или иные отклонения могут обусловить различие в свойствах образующейся пыли. Вследствие этого осаждаемая в бункере пыль может отличаться по свойствам по высоте бункера и в различных его зонах. Поэтому для улучшения представительности в пробу должны входить порции пыли, взятые на различной высоте и по возможности равномерно по площади поперечного сечения бункера.

Обычно отбираются пробы пыли в точках, равномерно отстоящих друг от друга по высоте бункера, и не менее чем в 3—5 местах в горизонтальном сечении бункера. Если пылеуловитель, например многопольный электрофильтр, имеет несколько бункеров, то пыль отбирают из каждого бункера и затем смешивают в массовом соотношении, пропорциональном степени пылеулавливания каждым полем.

Пыль из бункеров отбирают специальными пробоотборниками (рис. 8). Пробоотборник вводят в бункер через штуцеры, приваренные к его противоположным стенкам равномерно через 50—70 см по высоте.

Допускается отбор пыли в процессе разгрузки бункера. Высыпаемую струю пыли по всему сечению кратковременно пересекают плоской кюветой. Порции пыли отбирают таким путем через несколько временных интервалов, соединяют и тщательно перемешивают.

#### 1.4. ПОДГОТОВКА ПРОБЫ ПЫЛИ К АНАЛИЗУ

Отобранную пробу пыли перед отправкой в лабораторию сокращают до 800—1000 г. Для этого пыль высыпают на гладкий лист бумаги, растирают комки и тщательно перемешивают: собирают в виде конуса, набирают в лопатку, которую ведут снизу конуса вверх по его поверхности. Из лопатки пыль высыпают на вершину конуса так, чтобы она распределилась по всем его сторонам. После 3—4-разового перелопачивания по всей окружности основания конуса, пробу делят пополам в плоскости, перпендикулярной основанию конуса. Каждую половину снова насыпают в виде конуса, перелопачивают, как указано выше, и делят пополам. От каждого конуса отбрасывают по половине, а две оставшиеся смешивают и повторно делят. Эту операцию повторяют до тех пор, пока количество пыли в последних двух половинах разных конусов не составит вместе 5000 г.

Дальнейшее сокращение пробы производится тем же способом, но конус квартуют. Пробу высыпают на гладкий лист через воронку, нижнее отверстие которой должно в первоначальный момент находиться вблизи плоскости листа. При нарастании конуса воронку плавно поднимают, не сдвигая в сторону. Затем лопаточкой придавливают вершину конуса. Полученный усеченный конус делят на четыре части крестообразным делителем из жести. Две противоположные четверти отбрасывают, а две оставшиеся перемешивают и снова подвергают квартованию. Перемешивание и квартование повторяют до тех пор, пока количество материала в пробе не уменьшится до 800—1000 г.

Сокращение пробы с помощью делителя Джонса или делителя ДМП-1 (ГОСТ 21560.0.6—75) занимает меньше времени, чем деление конусным методом, однако оно связано с большим пылением и большей потерей мелких фракций.

Среднюю пробу, если ее масса не превышает 1 кг, или сокращенную до 1 кг помещают в воздухонепроницаемую тару, в которой она хранится и транспортируется в лабораторию. Целесообразно использовать стеклянные сосуды с пробками, которые герметизируются парафином и изоляционной лентой.

Перед проведением анализа пробу перемешивают методом накатки. Ее высыпают на гладкий лист бумаги размером 70 X 70 см, разравнивают и один край листа поднимают вертикально, пока пыль, перекатываясь, не достигнет противоположного края. Затем поднимают этот край и повторяют процесс перекатывания до тех пор, пока валик пробы не займет всю ширину листа. После этого перекатывание производят в перпендикулярном направлении. Процедуру повторяют не менее 5—6 раз. Из различных мест по длине образовавшегося валика берут шпателем пыль в сосуды с плотно притертыми пробками [30].

Для определения химического и минералогического состава отбирают 20—30 г пыли, дисперсного состава 50—100 г, насыпной плотности и угла естественного откоса 200—300 г, смачиваемости, слипаемости по 15—20 г, абразивности 200—300 г.

Одновременно отбирают 200—250 г пробы в сосуд с пробкой, парафинируют и сохраняют на случай арбитражных анализов. На сосуды с пробами наклеивают этикетки с указанием наименования пыли, места и способа отбора пробы, даты, номера пробы.

Для получения сопоставимых результатов анализ должен проводиться из проб пыли, выдержанных в атмосфере воздуха определенной влажности. Перед проведением исследований пробу пыли помещают в бюксы и высушивают в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 3—4 ч. Бюксы с сухой пылью закрывают крышками и хранят в эксикаторе, заполненном прокаленным силикагелем.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЫЛИ

## 2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Различают несколько видов плотности частиц пыли и насыпной плотности.

Истинная плотность частиц пыли представляет собой массу единицы объема частиц, не имеющих пор,

Кажущаяся плотность частиц пыли — масса единицы объема частиц, включая и объем закрытых пор.

Объемная плотность частиц пыли — масса единицы объема частиц, включая объем закрытых и открытых пор.

Насыпная плотность — масса единицы объема уловленной пыли или порошкообразного материала, свободно насыпанного в какую-либо емкость непосредственно после ее заполнения. В ее объем входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между ними.

Насыпная плотность при встряхивании — масса единицы объема пыли или порошкообразного материала при самой плотной упаковке частиц, достигаемой путем встряхивания.

Знать плотность частиц пыли необходимо для определения их седиментационного диаметра, насыпную плотность — для расчета объема бункеров и при выборе пылевыгрузных устройств.

Плотность пыли  $\rho_t$  определяется только после отделения ее частиц от газовой среды. Методики определения плотности уловленной пыли и порошкообразного материала идентичны.

Если пыль получена путем измельчения монолита, то плотность материала частиц совпадает с истинной плотностью. Частицы промышленной пыли, образующейся в результате горения, гранулирования, сушки и других процессов, имеют закрытые поры, из которых удалить газ имеющимися в настоящее время средствами не удается. Плотность таких частиц соответствует кажущейся плотности.

Промышленная пыль может состоять из частиц как одинаковой, так и различной плотности. К первому виду относятся, например, кварцевая, корундовая пыль или химически чистые соли, ко второму — летучая зола, в грубых фракциях которой имеются несгоревшие частицы топлива, а в тонких — повышенное количество солей кальция и щелочных металлов.

Различные по крупности фракции могут содержать частицы различной структуры. Так, силикагель или моющие порошки могут в грубых фракциях содержать неразрушенные полые частицы, а в тонких — разрушенные, имеющие другую структуру и, соответственно, другую кажущуюся плотность. В тех случаях, когда плотность различных по крупности частиц существенно

различна ( $D_{p_t} > 0,5 \text{ г/см}^3$ ), пыль следует разделить на фракции, установить зависимость  $\rho_t = f(\delta_s)$  и при вычислении седиментационного диаметра принимать для отдельных фракций соответствующие значения плотности,

## 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПИКНОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Пикнометрический метод основан на определении объема жидкости, вытесненной порошком, масса которого предварительно измерена. Частное от деления массы материала на вытесненный им объем равно искомой плотности материала [30, 52].

Применяемая жидкость не должна взаимодействовать с пылью. Поэтому целесообразно пользоваться той же жидкостью, которая выбрана в качестве дисперсионной среды при анализе дисперсного состава жидкостным седиментометрическим методом (см. п. 3.5 и приложение 3).

В тех случаях, когда не удается подобрать пикнометрическую жидкость, плотность пыли можно определять методом вытеснения воздуха, называемым также манометрическим методом [30, 74].

Жидкостной пикнометр представляет собой стеклянную колбу с узкой шейкой, на которой нанесена метка — указатель объема пикнометра при  $20^\circ\text{C}$ . Выше метки шейка пикнометра имеет расширение, служащее для предотвращения выброса жидкости при вакуумировании. Для предотвращения испарения жидкости пикнометр снабжен притертой пробкой. Наиболее удобны для определения плотности пыли пикнометры объемом  $50 \text{ см}^3$ .

Температура жидкости во время анализа должна быть стабильной, так как изменения объема жидкости, вызываемые неустойчивостью температуры, служат источником ошибок. Для термостатирования жидкости можно применять термостат типа ТС-16А.

Проведение анализа состоит из ряда последовательно выполняемых операций.

Наполняют термостат дистиллированной водой, включают его и поддерживают в нем температуру  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$  в течение всего опыта.

В цилиндр вместимостью 250 мл заливают 200 мл пикнометрической жидкости и выдерживают его в термостате 20—30 мин.

Измеряют денсиметром (ГОСТ 1300—74) плотность пикнометрической жидкости  $\rho_{ж}$  при  $20^\circ\text{C}$ .

Определяют массу сухого пустого пикнометра  $G_0$  взвешиванием на аналитических весах ВЛР-200М (ГОСТ 19491—74).

При помощи воронки диаметром 7 см (ГОСТ 8613—75) насыпают в пикнометр исследуемую пыль и определяют массу

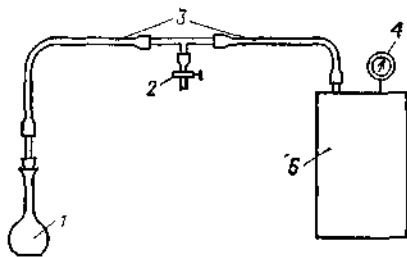


РИС. 9. Схема присоединения пикнометра к вакуумнасосу.

пикнометра с пылью  $G_2$ . Слой пыли должен занимать около  $7\text{з}$  объема пикнометра.

В пикнометр с пылью вливают 20—25 мл пикнометрической жидкости. Вращательным движением взбалтывают

содержимое пикнометра до полного смачивания пыли жидкостью.

Подключают пикнометр / вакуумным шлангом 3 к вакуумному насосу. Схема подключения представлена на рис. 9.

При открытом зажиме 2 включают вакуумный насос 5 (ГОСТ 14707—77). Затем осторожно прикрывают зажим 2 и наблюдают, чтобы уходящие пузырьки воздуха не захватывали жидкость с пылью. Если пузырьки воздуха перестанут выходить, еще подкручивают зажим и продолжают вакуумирование до прекращения кипения жидкости. При этом остаточное давление после вакуумирования, измеряемое вакуумметром 4 (ГОСТ 8625—77), должно быть 2—4 кПа (15—30 мм рт. ст.). Показателем достаточно полного удаления воздуха является сохранение уровня жидкости в пикнометре при вторичном вакуумировании.

По окончании вакуумирования осторожно открывают зажим, отсоединяют пикнометр и помещают его в термостат на 30—40 мин. Затем пипеткой доливают в пикнометр до метки пикнометрическую жидкость, выдержанную в термостате. Пикнометр закрывают пробкой, насухо вытирают и определяют массу пикнометра с пылью и жидкостью  $G_3$ .

Удаляют из пикнометра жидкость и пыль, прополаскивают его пикнометрической жидкостью. В пикнометр заливают пикнометрическую жидкость до метки и определяют массу пикнометра с жидкостью  $G_4$ .

**Вычисление плотности материала частиц пыли** (в  $\text{г}/\text{см}^3$ ) производят по формуле

$$\rho_{\text{т}} = G_{\text{п}} / [(G_3 - G_4) / (G_2 - G_1)] \quad (5)$$

Здесь  $G = G_2 - G_1$  — масса пыли в пикнометре, г;  $G_4 - G_1$  — масса пикнометра с пикнометрической жидкостью, г;  $G_3 - G_1$  — масса пикнометра с жидкостью и пылью, г.

Определение плотности производят параллельно на двух навесках, взятых из исходной пробы. Расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 3%. Если расхождение больше 3%, производят третье определение и за результат принимают среднее арифметическое двух наиболее близких (в пределах допускаемых расхождений) определений.

**Пример.** Определить плотность материала частиц кварцевой пыли  $\rho_{\text{т}}$ . В качестве дисперсионной жидкости выбираем воду, имеющую при  $20^\circ\text{C}$  плотность  $\rho_{\text{ж}} = 0,9982 \text{ г}/\text{см}^3$ .

Взвешиванием на аналитических весах с точностью до 0,1 мг определяем: массу сухого пустого пикнометра  $G_1 = 13,733 \text{ г}$ , сухого пикнометра с пылью  $G_2 = 16,730 \text{ г}$ , пикнометра с пылью и водой, залитой до метки, после вакуумирования  $G_3 = 115,874 \text{ г}$ , пикнометра без пыли г водой, залитой до метки,  $G_4 = 114,0232 \text{ г}$ , пыли в пикнометре  $G = G_2 - G_1 = 16,7301 - 13,7331 = 2,9970 \text{ г}$ .

Плотность кварцевой пыли вычисляем по формуле (5):

$$\rho_{\text{т}} = \frac{2,997 \cdot 0,9982}{114,0232 - (115,8740 - 2,9970)} = 2,61 \text{ г}/\text{см}^3$$

### 2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Метод основан на законе Бойля — Мариотта, согласно которому при одной и той же температуре произведение давления на объем массы газа остается постоянным. Если замкнутый объем пространства  $V_1$ , заполненного газом при атмосферном давлении  $B$ , уменьшить на известный небольшой объем  $V_2$ , то давление газа возрастает на некоторую величину  $\Delta P_1$ . Если во втором опыте поместить в то же пространство некоторое количество исследуемого порошка и из пространства  $V_2 = V_1 - V_0$  (где  $V_0$  — объем, занимаемый порошком) вытеснить такой же объем газа  $V_2$ , как и в первом опыте, то давление в этом пространстве возрастает на несколько большую величину  $\Delta P_2$ . Измеренные давления дают возможность определить объем порошка и, зная его массу, найти плотность его частиц.

Прибор для определения плотности материала частиц пыли манометрическим методом (рис. 10) состоит из измерительной колбы 5, жидкостного манометра 2, 3 и резервуара 7 с мерной трубкой 6, которые могут через краны 8 и 10 соединяться с напорной склянкой /, наполненной манометрической жидкостью. Кран 4 дает возможность уравнивать давление в приборе с атмосферным, а кран 9 — сливать жидкость из прибора. В качестве манометрической жидкости можно рекомендовать метиловый эфир бензойной кислоты, обладающий малой вязкостью и малым давлением паров [30, 74].

По закону Бойля — Мариотта имеем:

$$V_1 B = (V_1 - V) (B + \Delta P_1)$$

Отсюда

$$V_1 = V (B + \Delta P_1) / \Delta P_1 \quad (6)$$

Если в пространство  $V_1$  поместить определенное количество исследуемого порошка  $G_2$ , занимающее объем  $V_0$ , то свободный объем пространства при этом станет равным

$$V_1 = V_1 - V_0 \quad (7)$$

При уменьшении пространства  $V_2$ , как и в первом опыте, на объем  $V$  давление в пространстве  $V_2 = V_1$  будет равно  $B + \Delta P_1$ ,

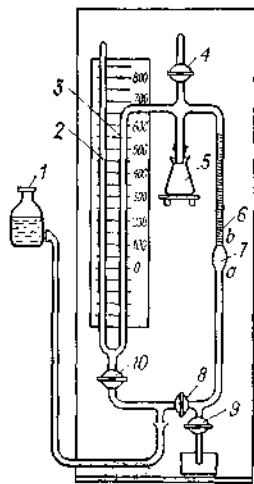


РИС. 10. Схема установки для определения плотности материала частиц пыли манометрическим методом.

причем  $\Delta P_2 > \Delta P_1$  - По аналогии с выражением (6) получим:

$$V_2 = V (B + \Delta P_2) / A^2 \quad (8)$$

Подставляя в равенство (7) величины  $V_1$  и  $V_2$  из (6) и (8), получаем формулу для вычисления объема пыли:

$$V_0 = VB (\Delta P_2 - \Delta P_1) / \Delta P_1 \Delta P_3 \quad (9)$$

Плотность материала частиц будет равна:

$$\rho_T = G / K_0 \quad (10)$$

При подготовке к определению плотности материала частиц пыли манометрическим методом собирают установку по рис. 10. Измеряют денсиметром плотность манометрической жидкости. Заполняют напорную склянку / манометрической жидкостью и проверяют установку на герметичность. Для этого при открытых кранах 10, 8 и 4 поднимают напорную склянку так, чтобы манометрическая жидкость поднялась в манометре до нулевой отметки. Закрывают краны 4 и 10 и, перемещая склянку, поднимают жидкость в трубке 6 до верхней отметки градуировочной шкалы. Закрывают кран 8 и наблюдают, удерживается ли разность давлений в манометре в течение 1 ч с точностью до 1 мм ст. жидкости. Если это условие не выполняется, необходимо устранить негерметичность в месте присоединения колбы 5 и в кранах, покрывая их шлифы тонким слоем вакуумной смазки.

Затем проводят калибровку резервуара 7 трубки 6. Для этого при открытых кранах 8 и 4 с помощью напорной склянки устанавливают уровень жидкости в резервуаре 7 на отметку «б». Закрывают кран 8 и, открывая кран 9, сливают манометрическую жидкость до отметки «а» резервуара 7 в предварительно взвешенный бюкс. Взвешивают бюкс с жидкостью и определяют массу слитой жидкости (в г). Разделив полученную величину на плотность манометрической жидкости  $\rho_{ж}$  (в г/см<sup>3</sup>), находят объем резервуара 7 (в см<sup>3</sup>):

$$V = O_{ж} / \rho_{ж}$$

Калибровку резервуара 7 проводят один раз при замене трубки, а герметичность установки проверяют перед каждым анализом.

В начале проведения анализа открывают краны 10, 8 и 4 и при помощи напорной склянки устанавливают нулевой уровень жидкости в трубках 2, 3 и 6. В трубке 6 он совпадает с отметкой «а». Закрывают краны 4 и 10. Поднимают склянку /, уменьшают объем воздуха в приборе при пустом сосуде 5 на величину

$V$ ; когда уровень жидкости в трубке 6 будет на отметке «б», закрывают кран 8. Затем открывают кран 10 и в правом колене манометра путем приподнимания склянки / снова устанавливают нулевой уровень. После этого отсчитывают по шкале трубки 2 давление  $h \setminus$  (в мм ст. жидкости). Затем на аналитических весах берут навеску исследуемой пыли и помещают ее в сосуд 5. Объем пыли не должен превышать  $1/3$  объема сосуда 5.

При тех же условиях и в той же последовательности повторяют описанные манипуляции и записывают давление  $h_2$ .

В журнал наблюдений кроме даты проведения анализа, вида пыли и места ее отбора записывают следующие данные:

1. Навеска пыли  $G$ , г.
2. Объем резервуара  $V$ , см<sup>3</sup>.
3. Барометрическое давление  $B$ , мм рт. ст.
4. Избыточные давления в приборе, мм рт. ст.:

$$\Delta P_1 = h_1 \rho_{ж} / 13,6; \quad \Delta P_2 = h_2 \rho_{ж} / 13,6$$

5. Объем  $V_0$ , занимаемый пылью, вычисленный по формуле (9).
6. Плотность материала частиц  $\rho_p$ , вычисленную по формуле (10).

Определение плотности производят дважды, с отдельными навесками, отобранными из исходной пробы пыли. Расхождение между результатами определений не должно превышать 3%.

## 2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ

Метод заключается в определении массы измеренного объема пыли.

Для измерения объема пробы пыли используют мерный стеклянный цилиндр (ГОСТ 1770—74) объемом 50—100 см<sup>3</sup> с диаметром 30 мм. Верхняя часть цилиндра выше шкалы обрезана и отшлифована. Цена деления шкалы от 0,5 до 1 см<sup>3</sup> [52].

Пыль засыпают в цилиндр в специальной камере сечением 200X200 мм и высотой 500 мм (рис. 11). Мерный цилиндр 4 вставляется в кольцо 5 диаметром 35 мм. Сверху установлен бункер / для пыли с точкой 3, имеющей задвижку 2. Течка и мерный цилиндр должны быть расположены соосно. Высота расположения задвижки над верхней кромкой цилиндра должна быть не менее 350 мм.

Виброуплотнитель (рис. 12) состоит из упругой пластины 4, закрепленной на стойках 1. На пластине закреплен стакан 3, в который устанавливается цилиндр с пылью 2. Колебания пластины 5, приводимой в движение звездочкой 8, насаженной на вал электродвигателя 7, ударник 6, жестко соединенный с пластиной 5, передает пластине 4. Частота колебаний 4 Гц.

Вначале определяют на весах (ГОСТ 19491—74) с точностью до 0,01 г массу мерного цилиндра  $G \setminus$  (в г) и записывают его объем  $V$  (в см<sup>3</sup>), указанный на шкале. Затем цилиндр



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛИ

## 3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Дисперсным (зерновым, гранулометрическим) составом пыли называется характеристика состава дисперсной фазы по размерам или скоростям оседания частиц. Она показывает, какую долю по массе, объему, поверхности или числу частиц составляют частицы в любом диапазоне их размеров или скоростей оседания. Дисперсный состав может быть выражен в виде таблицы, кривой или формулы распределения или плотности распределения частиц пыли.

Степень дисперсности представляет собой качественный показатель, характеризующий «тонкость» пыли. В качестве условных показателей этого же свойства используются удельная поверхность; средний диаметр частиц, медианный диаметр и другие величины.

Проходом  $D$  (остатком  $R$ ) называется выраженная в процентах доля массы пыли, прошедшая через сито (оставшаяся на сите) с заданными размерами ячеек, от общей массы просеиваемой пробы пыли. Термины «проход» и «остаток» применяют и для подситовой области, подразумевая при этом долю массы частиц мельче или крупнее заданного размера  $\delta$ .

Фракция пыли  $S.D$  или  $AR$  представляет собой выраженную в процентах долю массы, объема, поверхности или числа частиц, размер которых или скорость оседания находится между двумя значениями размеров  $\delta_n$  и  $\delta_{n+1}$  или скоростей оседания

Функциями распределения массы частиц пыли  $D(\delta)$  или  $R(\delta)$  называются зависимости прохода  $D$  или остатка  $R$  от диаметра (размера) частиц, выраженные в процентах или долях единицы. При этом выполняются следующие соотношения:

$$D + R = 100 \%$$

$$D(\delta_{\min}) = 0; \quad D(\delta_{\max}) = 100; \quad R(\delta_{\min}) = 100; \quad R(\delta_{\max}) = 0$$

Здесь  $\delta_{\min}$  и  $\delta_{\max}$  — наименьший и наибольший диаметры частиц, имеющих в дисперсной фазе пыли.

В случае применения микроскопических методов анализа или электронных счетчиков определяются функции распределения числа частиц по их диаметрам  $D_n(\delta)$  или  $R_n(\delta)$ . Для характеристики поверхности частиц пыли иногда приходится рассматривать функции распределения поверхности частиц по их диаметрам —  $D_s(\delta)$  или  $R_s(\delta)$ . В ряде случаев применяются функции распределения массы  $D(v)$ ,  $R(v)$  или числа частиц  $D_n(v)$ ,  $R_n(v)$  по их скоростям оседания (витания).

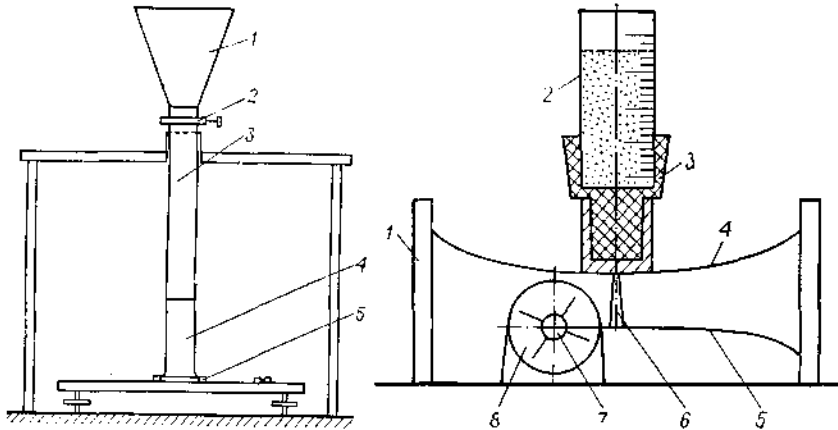


РИС. 11. Камера для засыпки пыли в мерный цилиндр.

РИС. 12. Виброуплотнитель.

устанавливают в камеру, насыпают в бункер 150–200 г высушенной пыли, открывают задвижку течки и заполняют цилиндр пылью. Пыль, находящуюся выше верхней кромки цилиндра, удаляют линейкой и взвешиванием определяют массу цилиндра с пылью  $G_2$ , г.

После этого цилиндр помещают в стакан 3 виброуплотнителя (см. рис. 12), включают электродвигатель и уплотняют слой пыли в сосуде до прекращения изменения объема. Слой пыли можно считать уплотненным, если в течение 2 мин его высота остается постоянной.

По шкале на цилиндре с точностью до  $0,5 \text{ см}^3$  отсчитывают объем максимально уплотненного слоя пыли  $V$ .

Насыпную плотность пыли  $\rho_n$  (в  $\text{г/см}^3$ ) вычисляют по формуле

$$\rho_n = (G_2 - G_1)/V$$

Насыпную плотность пыли при встряхивании  $\rho_{n, \text{встр}}$  вычисляют по формуле

$$\rho_{n, \text{встр}} = (G_2 - G_i)/V_i$$

За результат принимают среднее арифметическое из шести отдельных определений. Если не располагают количеством пыли (~600 г), дающим возможность делать каждое определение из новой пробы, то после каждого определения соединяют пробу с остальной пылью, перемешивают методом накатки и приготовленную пробу используют для вторичного определения.

Расхождение между параллельными определениями не должно превышать 3%.

### 3.2. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА

Результаты экспериментальных определений дисперсного состава в большинстве случаев представляются в виде таблиц. Наиболее часто данные дисперсионного анализа даются в виде фракций, выраженных в процентах от общего числа или массы измельченного материала или пыли — см., например, табл. 3.

Таблица 3. Фракции пыли

Размеры частиц на границах фракций, мкм	Фракции, % от общей массы частиц	Размеры частиц на границах фракций, мкм	Фракции, % от общей массы частиц
1 б	2,08	10-16	18,74
1,6-2,5	3,61	16-25	14,57
2,5-4	8,32	25-40	12,50
4-6,3	17,56	>40	2,02
6,3-10	20,60		

В некоторых методах анализа результаты записывают в виде таблиц с указанием процента массы или числа частиц, имеющих размер либо больше, либо меньше заданного размера — см., например, табл. 4.

Таблица 4. Фракции пыли с частицами мельче или крупнее заданного размера

Размер частиц б, мкм	Общая масса частиц, %		Размер частиц б, мкм	Общая масса частиц, %	
	мельче б	крупнее б		мельче б	крупнее б
	0,00	100,00	10	52,17	47,83
1,6	2,08	97,92	16	70,91	29,09
2,5	5,69	94,31	25	85,48	14,52
4,0	14,01	85,99	40	97,98	2,02
6,3	31,57	68,43	бшах	100,00	0,00

Содержание частиц мельче и крупнее б можно получить из табл. 3, складывая фракции сверху вниз и снизу вверх.

Графически функции распределения изображаются в виде кривых распределения. Для такого изображения по оси абсцисс откладываются в выбранном масштабе (равномерном или неравномерном) значения одномерной случайной величины, в нашем случае — размера б частиц или какой-либо его функции, а по оси ординат — процентное содержание массы всех частиц, диаметр которых меньше или больше б, т. е. значения функций D(б) и Я(б).

Функции  $\xi(\delta)$  и R(б) целесообразно изображать на координатных сетках, имеющих по оси x не равномерную шкалу, а ло-

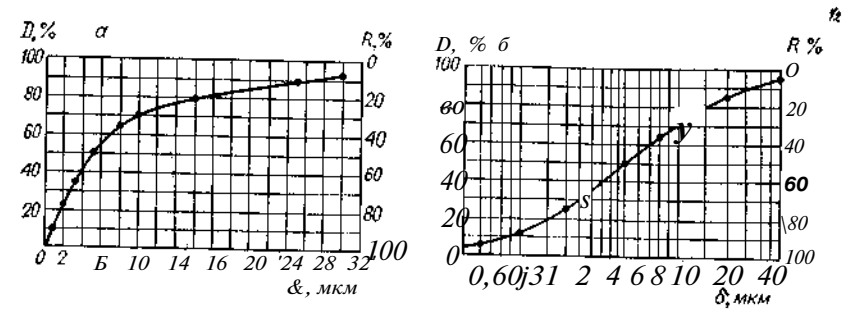


Рис. 13. Графики функции распределения частиц пыли с равномерной (а) и логарифмической (б) шкалой абсцисс.

гарифмическую (рис. 13), поскольку изменения размера частиц б как одну и ту же величину Дб гораздо заметнее влияет на свойства тонких фракций. Так, изменения свойств пыли в диапазоне б = 1-2 мкм несравненно более значительны, чем в диапазоне б = 101-102 мкм. Между тем, на равномерной шкале эти диапазоны характеризуются одинаковым по длине отрезком.

### 3.3. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛИ

Для использования данных о дисперсном составе пыли при расчете пылеуловителей необходимо знать вид аналитической зависимости, выражающей функцию распределения частиц пыли. Для этой цели предложены разнообразные теоретические и эмпирические формулы. Наиболее широко применяются в практике исследования промышленных пылей закон логарифмически нормального распределения, а также формулы Розина — Раммлера — Беннета, Ромашова и Годэна — Андреева (экспоненциальный закон) [30].

Нормированная функция нормального распределения (ЛНР), изменяющаяся от 0 до 100%, имеет вид:

$$D(b) = F(t) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Здесь

$$t = \frac{(\lg a - \lg b_{50}) / \lg f}{\sigma} \quad (11)$$

650 — медианный диаметр, т. е. размер частиц, при котором масса всех частиц в анализируемой пыли мельче или крупнее б50 составляет 50%; lg a — стандартное (среднеквадратичное) отклонение логарифмов диаметров от их стандартное

Дисперсный состав пыли удобно изображать графически на логарифмически вероятностной координатной сетке (см. приложение 1, Л), т. е. в такой прямоугольной системе координат, по оси абсцисс которой откладываются логарифмы диаметров (но проставляются значения диаметров б), а по оси ординат откла-

дываются величины  $t$  [но проставляются значения функции  $F(t) \rightarrow D(\delta)$ ]. Величины  $t$ , отвечающие заданным значениям функции  $F(t)$ , приведены в приложении 2. Значениям  $F(t) < Z < C 50\%$  отвечают отрицательные значения  $t$ , которые откладываются вниз от начальной точки  $F(t) = F'(0) = 50\%$ .

В тех случаях, когда дисперсный состав пыли подчиняется ЛНР, его график изобразится на такой сетке в виде прямой линии. Это объясняется тем, что график будет выражать зависимость  $t$  от  $\lg \delta$ , которая, как следует из выражения (11), является линейной.

Величину  $\lg a$  можно определить из формулы (11), приравняв  $t$  или  $+1$  или  $-1$ . Из приложения 2 находим, что  $D = 84,1$  при  $t = +1$  и  $D = 15,9\%$  при  $t = -1$ . Отсюда

$$\lg a = \lg 6_{84,1} - \lg 6_{15,9} = \lg 6_{3,0} - \lg 6_{15,9}$$

или

$$a = 284,1^{1,50} = S_0/65,9$$

Формула Розина — Раммлера — Беннета (РРБ) имеет следующий вид:

$$D(\delta) = 100 \left[ 1 - e^{-(\delta/\delta_0)^a} \right] \quad \text{и} \quad R(\delta) = 100 e^{-(\delta/\delta_0)^a} \quad (12)$$

где  $S_0$  по своему физическому смыслу представляет собой такой диаметр, при котором масса частиц крупнее  $\delta_0$  составляет 36,8%, а мельче — 63,2%.

Дважды логарифмируя формулу (10), получим:

$$\lg \left( \lg \frac{100}{R} \right) = a \lg \delta + C$$

где  $C = \lg(\lg e) - a \lg \delta_0$ .

Если распределение частиц пыли отвечает формуле РРБ, то оно изобразится на двойной логарифмической координатной сетке с координатами  $\lg(\lg 100/R)$ ,  $\lg \delta$  в виде прямой линии. Сетка РРБ приведена в приложении 1,5.

В ряде случаев распределение частиц пыли соответствует формуле Ромашова. Чтобы избежать трудоемкого аналитического определения по формуле Ромашова, можно рекомендовать графическое построение кривой на специальной координатной сетке (приложение 1,6). Если распределение частиц соответствует формуле Ромашова, то его график на этой сетке будет иметь вид прямой линии.

Формула Годэна — Андреева представляет собой экспоненциальный закон распределения:

$$D(\delta) = AB^m$$

Параметр  $m$  характеризует направление и степень изгиба кривой распределения: при  $m < 1$  кривая  $D(\delta)$  выпуклая, а при  $m > 1$  — вогнутая. На двойной логарифмической сетке распределения частиц, подчиняющиеся этому закону, изображаются прямыми линиями (приложение 1,7),

Чтобы определить, какой из перечисленных аналитических зависимостей отвечает полученное на основе экспериментальных данных распределение частиц, проще всего построить его график на приведенных в приложении 1 координатных сетках. Наиболее хорошо описывает полученное распределение частиц тот закон, на координатной сетке которого график дисперсного состава наиболее близок к прямой линии.

### 3.4. СИТОВОЙ АНАЛИЗ

Ситовой анализ уловленной пыли или порошкообразного материала основан на механическом разделении частиц по крупности путем просева через сита с различными размерами отверстий. Под размером отверстий сита подразумевают длину стороны квадратной ячейки. Нижняя граница размеров ячеек сита в ГОСТ 3584—73, а также в ряде норм на сита других стран принята равной 40 мкм. Отношение размеров ячеек последующего номера сита к предыдущему называется модулем набора сит. Этот модуль согласно ГОСТу на ряды предпочтительных чисел для отечественных сит принят равным ряду  $1,25 \cdot 10^{\pm n}$  («1,12»). Сита в Советском Союзе изготавливаются со следующими размерами ячеек: 0,04—0,045—0,05—0,056—0,063—0,071—0,08—0,09—0,1—0,125—0,16—0,2—0,25—0,315—0,4—0,5—0,63—0,8—1—1,26; —1,6—2—2,5 мм.

В последние годы в ряде стран применяют также печатные контрольные сита для просева тонких фракций пыли. Так, в ГДР выпускается набор печатных сит с размерами ячеек 5—10—15—20—25—30—35—40—45—50—60—63—70—80—90—100 мкм [29].

Метод ситового анализа применяется, как правило, для грубой пыли, в которой масса частиц мельче 100 мкм составляет не более 10%. Если содержание этих частиц превышает 10%, то ситовому анализу подвергается только та часть, которая содержит частицы крупнее 100 мкм, а проход через сито с размерами ячеек < 100 мкм анализируется седиментационными методами.

Поэтому, для выбора метода анализа предварительно просеивают пробу пыли на сите с ячейками размером 100 мкм. Проход  $D$  и остаток  $R$  взвешивают и определяют процент пыли мельче 100 мкм по формуле  $[D/(D+R)] \cdot 100$ .

В практике ситового анализа используются следующие способы просева [30]:

- 1) ручной — применяется для важных производственных анализов, в исследовательских работах и при арбитражных анализах;
- 2) механический — применяется в основном для текущих производственных анализов;
- 3) воздушно-струйный — на печатных ситах с ячейками от 5 мкм и более;
- 4) мокрый — применяется для пылей, склонных к электризации, а также для просева на печатных ситах с ячейками от

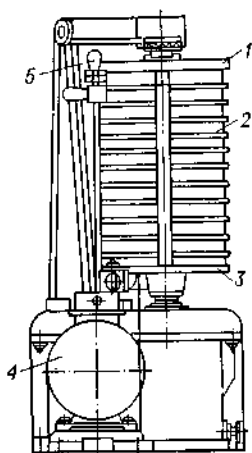


РИС. 14. Схема прибора модели 029 для механического отсева.

5 мкм и более; для сокращения времени промывки используется ультразвук с частотой 40 кГц.

При ручном просеве с использованием набора сит модели 26 по ГОСТ 3584—73 рекомендуется анализируемую пробу помещать на наиболее тонкое сито, а полученный остаток перекладывать на следующее по крупности ячеек сито. Преимущество такой последовательности проведения анализа в том, что грубое зерно способствует просеву на более тонких ситах. Сито с поддоном и крышкой берут одной рукой, наклонив полотно к горизонтальной.

поверхности на 10—20° вверх от этой руки и ударяют другой рукой около 120 раз в минуту. Примерно 4 раза в минуту сито располагают горизонтально и сильно ударяют по обечайке. При трудно просеиваемом материале и при тонких ситах через 3 минуты и далее через каждые 5 минут нижнюю поверхность сита очищают мягкой кисточкой. Опадающие с поверхности сита частицы присоединяют к проходу.

После окончания отсева проход из поддона собирают в стаканчик и взвешивают, а остаток помещают на следующее сито в порядке увеличения размера ячеек и продолжают просев описанным выше способом.

При просеве на нормальных ситах диаметром обечайки 200 мм рекомендуется брать пробу объемом 50—100 см<sup>3</sup> и взвешивать ее с точностью до 0,01 г. При ситах других размеров объем пробы изменяют пропорционально площади сит.

При ручном, а также механическом отсеве тонкой пыли с частицами, склонными к слипанию, вместе с пробой пыли закладывают на каждое сито около 30 г латунных штифтов длиной 10 мм. Штифты, соприкасаясь с поверхностью сита, способствуют разрушению образующихся агломератов частиц. Если пыль имеет склонность к истиранию, то вместо латунных штифтов следует применять резиновые гладкостенные кубики.

При механическом отсеве набор сит собирают в порядке уменьшения размеров ячеек сверху вниз. Нижнее сито ставят на поддон. Набор сит 2 помещают на столик 3 прибора для определения зернового состава (рис. 14). Навеску пыли помещают на верхнее сито, закрывают крышкой 1 и закрепляют винтами 5. Включают электродвигатель 4 и производят просев в течение 15—20 мин.

Сухой механический или ручной просев можно считать законченным, если через сито при повторном отсеве в течение 3 мин проходит не более 1% пыли, находящейся на данном

сите. После окончания отсева каждую фракцию с соответствующего сита и поддона взвешивают на аналитических весах. Результат анализа заносят в табл. 5 [52].

Таблица 5. Результаты ситового анализа

Размер ячеек сита, мкм	Граничные размеры частиц фракций, мкм	Масса фракции &R <sub>i</sub>		R <sub>p</sub> , %
		в граммах	в %	
2500	2500	1,02	2,0	2,0
1600	2500—1600	2,01	4,1	6,1
1000	1600—1000	0,13	0,3	6,4
630	1000—630	6,95	13,7	20,1
400	630—400	8,98	18,2	38,3
315	400—315	5,06	10,2	48,5
200	315—200	4,88	9,8	58,3
160	200—160	2,86	5,8	64,1
100	160—100	3,69	7,4	71,5
63	100—63	9,07	18,3	89,8
Поддон	63—0	5,06	10,2	100,0
Всего:		49,61	100%	

Суммарная масса всех фракций не должна отклоняться от массы исходной навески более чем на 2%.

При обработке полученных результатов суммарную массу всех фракций принимают за 100%. Процентное содержание пыли в каждой фракции определяют из соотношения

$$\left( \frac{\Delta R_i}{\sum \Delta R} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

где  $\Delta R_i$  — масса порошка на сите, г;  $\sum \Delta R$  — суммарная масса всех фракций, г.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений. Расхождение между результатами двух параллельных определений массы соответствующих фракций не должно превышать 1% от массы всей навески. Если расхождение между результатами параллельных определений превышает приведенную величину, определение повторяют.

### 3.5. СЕДИМЕНТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

#### Классификация и основные положения

Методы определения дисперсного состава, основанные на седиментометрическом принципе, весьма разнообразны. Кроме того, каждый из этих методов имеет несколько (иногда более десятка) вариантов аппаратного оформления, подробное описание которых можно найти в соответствующих монографиях [30, 55]. Поэтому в настоящей главе описаны только наиболее

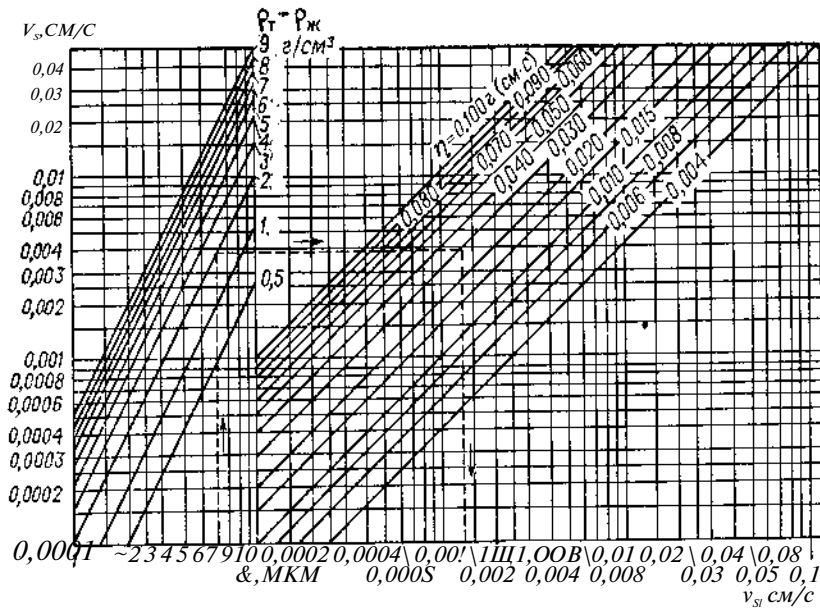


РИС. 15. Номограмма для определения скорости оседания  $v_s$  от 0,0001 до 0,1 см/с частиц диаметром  $b = 1-10$  мкм при разности плотностей частицы и жидкости  $\rho_s - \rho_l = 0,5-9$  г/см<sup>3</sup> и вязкости жидкости  $\eta = 0,004-1,0$  г/(см · с).

применимые в отечественной практике методы и изложены методики выполнения при их помощи дисперсионных анализов.

Отмучивание основано на разделении суспензии на две фракции путем многократного отстаивания и сливания суспензии от первоначального уровня в сосуде до некоторого уровня по прошествии известного промежутка времени от начала седиментации.

При измерении плотности столба суспензии используются изменения плотности суспензии, возникающие вследствие седиментации частиц суспензии в течение известных промежутков времени.

Пофракционное (дробное) оседание основано на диспергировании анализируемой пробы в верхней части столба дисперсионной среды и измерении массы осадка, выпадающего на дне седиментационного цилиндра известной высоты к заданным моментам времени.

Отбор весовых проб заключается в последовательном отборе проб на известной глубине столба суспензии в фиксированные моменты времени и определении массы твердой фазы в отобранной пробе после выпаривания дисперсионной среды.

Накопление осадка на чашечке весов основано на измерении массы дисперсной фазы, выпадающей из столба суспензии известной высоты к заданным моментам времени.

В начальный момент дисперсная фаза равномерно распределена по высоте суспензии.

Электрофотоседиментометрия основана на определении изменения интенсивности пучка света, проходящего на известном уровне от зеркала столба суспензии, по мере осаждения дисперсной фазы, равномерно распределенной в начальный момент проведения опыта.

Седиментометрия в поле центробежных сил использует превышение этих сил в сотни и более раз над гравитационными при их воздействии на частицы суспензии в кювете центрифуги. Поэтому этот метод находит применение для дисперсионного анализа пылей, содержащих значительный процент субмикронных частиц.

В отличие от ситового анализа все перечисленные методы определяют условный размер частиц в виде их седиментационного диаметра  $S_s$ , который может быть вычислен по формуле (1) или найден из номограмм (рис. 15 и 16).

Все перечисленные седиментометрические методы применимы только для анализа дисперсного состава пыли, уловленной пылеочистными аппаратами, или проб пыли, отобранных из газопроводов или воздухопроводов. Наиболее широкое использование

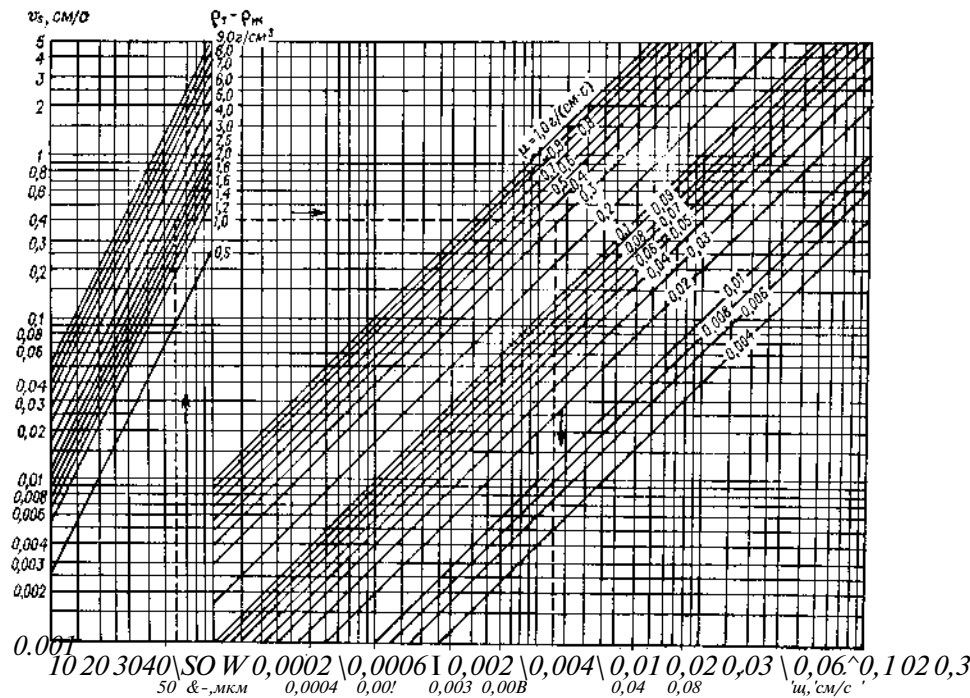


РИС. 16. Номограмма для определения скорости оседания  $v_s$  от 0,0001 до 1,0 см/с частиц диаметром  $b = 10-100$  мкм при разности плотностей частицы и жидкости  $\rho_s - \rho_l = 0,5-9,0$  г/см<sup>3</sup> и вязкости жидкости  $\eta = 0,004-1,0$  г/(см · с).

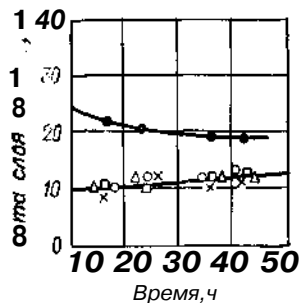


РИС. 17. Изменение высоты слоя осадка кварцевой пыли при различных концентрациях пирогосфата натрия:

• — без стабилизатора; D—0,0005 моль/л; Q —0,001 моль/л; Л —0,002 моль/л; X—0,004 моль/л.

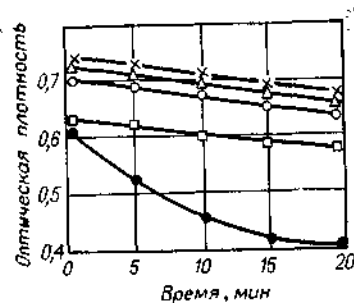


РИС. 18. Изменение оптической плотности суспензии глины при различных концентрациях пирогосфата натрия:

• — без стабилизатора; • — 0,0005 моль/л; O — 0,001 моль/л; D — 0,002 моль/л; X—0,004 моль/л.

в отечественной лабораторной практике получили пипеточный прибор ЛИОТ и жидкостной седиментограф НИИОГАЗ.

Важное значение имеет выбор дисперсионной жидкости. Так же как и при пикнометрических определениях плотности, она должна быть нейтральна по отношению к частицам дисперсной фазы: не вступать с ними в химическую реакцию и не вызывать других изменений: растворения или набухания. Она должна быть не слишком вязкой и хорошо смачивать частицы. Кроме того, необходимо, чтобы разность между плотностью частиц и среды  $\rho_t - \rho_{ж}$  была достаточной для обеспечения скорости оседания, позволяющей проводить дисперсионный анализ.

Весьма важно обеспечить агрегативную устойчивость суспензии, то есть предупредить образование агрегатов частиц в течение всего периода анализа. Для этого к выбранной жидкости добавляют диспергирующие реагенты — стабилизаторы. Список дисперсионных жидкостей и диспергирующих реагентов для различных материалов приведен в приложении 3.

Когда определенных указаний по применению среды и реагентов нет, приходится проводить специальные исследования по их выбору. Наиболее простыми из применяемых для этой цели методов являются измерение высоты (плотности) образующегося осадка и определение оптической плотности суспензии [30].

Метод измерения высоты образующегося осадка основан на том, что в суспензиях, где каждая частица оседает самостоятельно, а не в виде агрегата (флокулы), осадок получается плотнее и меньше по высоте. Например, из рис. 17 видно, что суспензия пыли кварцевого песка в дистиллированной воде без стабилизатора (пирогосфата натрия) образует более высокий слой осадка, чем при добавке этого реагента. Изменение концентрации пирогосфата натрия от 0,0005 до 0,004 моль/л

практически не влияет на уменьшение высоты осадка. Следовательно в данном случае нужно выбрать наименьшую концентрацию. При этих определениях используются стеклянные цилиндры с плоским дном диаметром 2—3 см и высотой 20—25 см.

Метод определения оптической плотности суспензии основан на том, что при образовании флокул оптическая плотность суспензии уменьшается, а при их отсутствии является максимальной.

В пробирках приготавливают суспензии пыли одной и той же концентрации (0,05%). Дисперсионную жидкость применяют без стабилизаторов, с различными стабилизаторами, с одним стабилизатором при различной его концентрации.

Суспензию после диспергирования на ультразвуковой установке УЗДН-1 выливают в кювету фотоэлектроколориметра. Кювету устанавливают в прибор и производят измерения оптической плотности через 2; 5; 10; 15 и 20 мин. Размер кюветы подбирают так, чтобы оптическая плотность в начальный период равнялась 1 или 0,9. По полученным данным строят кривые изменения оптической плотности в зависимости от времени оседания. Большие значения оптической плотности и более медленное ее уменьшение во времени указывают на лучшую дисперсионную жидкость и условия стабилизации. Концентрацию стабилизирующей добавки следует принимать возможно меньшую, т. е. такую, дальнейшее увеличение которой существенно не увеличивает оптической плотности. Так, при определении оптической плотности суспензии глины при помощи фотоэлектроколориметра ФЭК-М (рис. 18) оказалось, что добавка пирогосфата натрия в концентрации 0,0005 моль/л резко увеличивает агрегативную устойчивость во времени. Наиболее целесообразной концентрацией реагента можно считать 0,001 моль/л, так как дальнейшее ее увеличение практически не влияет на изменение оптической плотности суспензии.

Для проверки правильности выбора дисперсионной среды следует провести несколько предварительных определений дисперсного состава исследуемой пыли при различных концентрациях и различной высоте столба суспензии. Хорошая сходимость результатов этих анализов подтвердит пригодность выбранной дисперсионной среды. Если среда непригодна, то при более высокой концентрации и большей высоте оседания степень дисперсности анализируемой пыли будет получаться меньшей.

Для определения дисперсного состава исследуемой пыли необходимо знать плотность и вязкость дисперсионной среды.

Плотность жидкости определяется с помощью денсиметров по ГОСТ 1300—74. Определение вязкости жидкости осуществляется с помощью вискозиметра типа ВПЖ-9 по ГОСТ 10028—67 согласно инструкции, прилагаемой к вискозиметру.

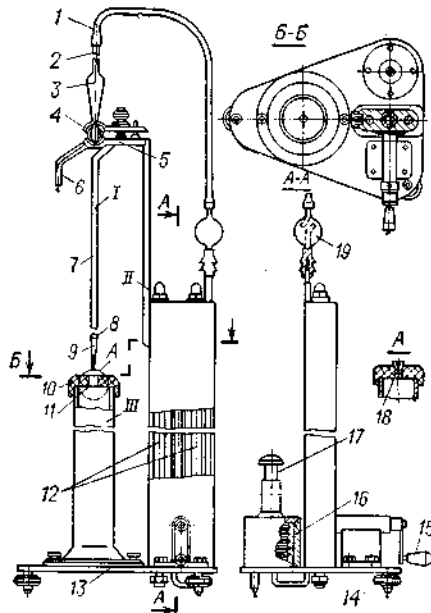
## Анализ пыли подъемной пипеткой ПП-1 ЛИОТ

Принцип дисперсионного анализа суспензий при помощи пипеточного прибора основан на методе отбора весовых проб. Этот метод, по мнению большинства специалистов, наиболее достоверен. Он включен в ряд отечественных и зарубежных стандартов как основной метод определения гранулометрического состава тонкодисперсных порошкообразных материалов.

В отечественной практике применяются два прибора, основанные на этом методе: пипетка Андреасена (простейший вариант) и прибор с подъемной пипеткой ПП-1 ЛИОТ [30].

Преимуществом последнего прибора является возможность во время анализа изменять высоту расположения заборного отверстия пипетки, что резко сокращает время определения наиболее тонких фракций. Несколько сот экземпляров прибора ПП-1 ЛИОТ было выпущено СКБ ВНИИОТ ВЦСПС в Ленинграде; на него имеется техническая документация. В настоящее время его выпуск осваивается на одном из предприятий Министерства промышленности стройматериалов СССР.

**Устройство и принцип действия прибора.** Прибор (рис. 19) состоит из пипетки /, закрепляемой в подъемном устройстве //, и седиментационного цилиндра ///. Пипетка состоит из стеклянной капиллярной трубки 7 с дюралевым наконечником 9, соединенной к трехходовому крану 4 с калиброванным резервуаром 3 (10 см<sup>3</sup>) и сливной трубкой 6.



Пробы суспензии отбираются в калиброванный сосуд 3 через отверстия 8 в наконечнике капиллярной трубки, для чего трубка 2 с помощью резинового шланга 1 через стеклянную ловушку 19 и латунную трубку соединяется с насос-сифоном 16.

После отбора пробы суспензии сначала с помощью трехходового крана 4 перекрывается сообщение между капиллярной трубкой и сосудом 3, а затем отобранная проба сливается через сливную трубку 6 в бюкс. Калиброванный сосуд промывается чистой дисперсионной жидкостью.

РИС. 19. Подъемная пипетка ПП-1 ЛИОТ.

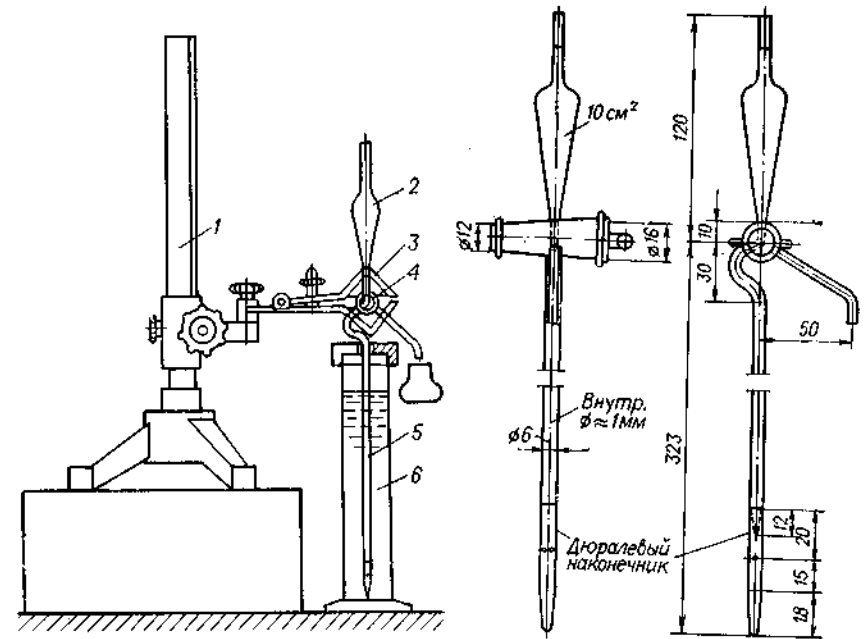


РИС. 20. Упрощенная конструкция подъемной пипетки.

РИС. 21. Стеклянная пипетка к прибору ПП-1 ЛИОТ.

Капиллярная трубка 7 пипетки при помощи подъемного устройства // опускается в цилиндр /// через центральное отверстие // в резиновой пробке 10 и устанавливается на такой высоте, чтобы ось радиальных отверстий находилась на заданной расчетной глубине ниже зеркала суспензии в цилиндре.

При взбалтывании суспензии перед началом опыта для равномерного распределения дисперсной фазы по высоте цилиндра центральное отверстие 11 в резиновой пробке 10 закрывается пробочкой 18. Кран пипетки закрепляется в зажиме 5 подъемного устройства и при помощи ручки 15 поднимается или опускается по вертикальным штангам 12, жестко соединенным с подставкой 13 прибора, которая устанавливается горизонтально при помощи винтов 14. На подставке установлен насос-сифон 16 с приводным штоком 17.

Упрощенный вариант прибора с подъемной пипеткой (рис. 20) можно изготовить собственными силами из стандартных деталей: типового штатива с подъемным устройством /, зажима 3, трехходового крана 4 и стеклянного цилиндра 6. Изготовление пипетки, состоящей из резервуара 2, трехходового крана и капиллярной трубки 5, должно быть поручено достаточно опытному стеклодуву. Размеры пипетки приведены на рис. 21,

**Подготовка к анализу.** Исходную пробу пыли, подготовленную, как указано в п. 1.4, просеивают на сите с ячейками размером 63 мкм (см. п. 3.4) и определяют остаток на сите  $R$  в процентах. Пыль, собранную в стеклянный стаканчик из поддона ситового аппарата, высушивают в сушильном шкафу до постоянной массы и хранят в эксикаторе [52].

Определяют плотность материала частиц пикнометрическим методом (см. п. 2.2).

Выбирают дисперсионную жидкость и определяют ее динамическую вязкость  $\eta$  и плотность  $\rho_{\text{ж}}$ .

Рассчитывают интервал времени, после которого следует отбирать первую и последующие пробы. Время  $t$  (в с) осаждения частиц пыли заданного диаметра  $\delta_s$  (в мкм) на глубину  $H$  (в см) от уровня зеркала суспензии рассчитывают по формуле

$$\tau = 18 \cdot 10^7 \eta H / (\rho_{\text{ж}} \delta_s^2) \quad (14)$$

Обозначения те же, что в формуле (1).

При вычислении момента отбора проб необходимо учитывать уменьшение высоты  $H$  столба суспензии после отбора предыдущих проб. Среднее уменьшение  $H$  при отборе пробы определяют опытным путем. Для этого цилиндр устанавливают строго вертикально, заполняют дистиллированной водой до верхней метки (500 мл) и отбирают калиброванным сосудом пипетки по 10 мл до тех пор, пока уровень зеркала воды не понизится на 2—3 см. Общее понижение уровня зеркала воды, замеренное с погрешностью  $\pm 0,5$  мм, делят на число отобранных проб и получают среднее уменьшение высоты столба суспензии при отборе одной пробы.

**Проведение анализа.** При отборе первой пробы всасывающее отверстие пипетки рекомендуется устанавливать на расстоянии не менее 20 см от зеркала суспензии.

Для уменьшения продолжительности анализа при отборе пробы суспензии с частицами размером 6,3 мкм пипетка поднимается и устанавливается на глубину  $H = 10$  см, а при 2,5 мкм на глубину  $H = 5$  см.

Из подготовленной пробы берут навеску 5 г с точностью до  $\pm 0,0001$  г. При анализе тонкодисперсной пыли ( $\delta_{50} < 8$  мкм) берут навеску 2,5 г. Навеску помещают в химический стакан на 100 мл, заливают 20—25 мл дисперсионной жидкости и диспергируют в течение 1 мин на ультразвуковой установке.

В цилиндр пипеточного прибора заливают 250 мл дисперсионной жидкости, количественно переносят в него суспензию из стакана, доводят уровень жидкости в цилиндре до метки (500 мл), закрывают крышкой и на 2 ч ставят в термостат для выравнивания температуры. (Температуру в термостате в течение всего опыта поддерживают на уровне  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$ .) При этом отверстие в крышке цилиндра закрывают пробкой, энергичным встряхиванием перемешивают суспензию в течение 2 мин, цилиндр быстро устанавливают на заранее фиксированное место

в термостате, включают секундомер и опускают пипетку в нижнее положение для первого отбора пробы.

Продолжительность отбора пробы суспензии объемом 10 мл должна составлять около 30 с, начинать отбор следует за 15 с до установленного расчетом момента времени взятия пробы. Для каждого заданного размера частиц берут одну пробу.

Каждую взятую пробу количественно переносят в предварительно высушенный до постоянной массы и взвешенный с точностью до  $\pm 0,0001$  г бюкс. Калиброванный сосуд пипетки объемом  $V$  после взятия каждой пробы промывают над бюксом точно замеренным количеством  $1/2$  дисперсионной жидкости. Бюксы с отобранными пробами ставят для выпаривания в сушильный шкаф. После того как жидкость полностью испарится, бюксы охлаждают в эксикаторе и, закрыв притертыми крышками, взвешивают на аналитических весах с точностью до  $\pm 0,0001$  г. Высушивание в эксикаторе и взвешивание повторяют до получения постоянной массы  $t$ .

Одновременно определяют сухой остаток после выпаривания дисперсионной жидкости. Для этого в сухой, взвешенный бюкс помещают дисперсионную жидкость в количестве, равном  $V - U - U/2$ . Жидкость выпаривают и определяют массу сухого остатка *trie* дисперсионной среды.

**Обработка результатов.** Массу фракции  $Z$ ; менее заданного эквивалентного диаметра  $\delta$  вычисляют в процентах по формуле

$$D_r = (mV/V_r G) 100 \quad (15)$$

где  $m = m_i - m_s$ ;  $V$  — объем суспензии в цилиндре, мл;  $V_r$  — объем отобранной пробы, мл;  $G$  — масса пыли в цилиндре, г.

За окончательный результат анализа принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений.

Расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 3%. Если расхождение между результатами параллельных определений превышает приведенную величину, определение повторяют.

**Пример анализа.** Условия проведения анализа: пыль кварцевая; дисперсионная жидкость — дистиллированная вода; температура суспензии  $20^\circ\text{C}$ ; объем суспензии в цилиндре 500 мл; объем отбираемых проб 10 мл; масса порошка в цилиндре 5 г; стабилизатор 20 мл 0,1 н. раствора тринатрий-фосфата; плотность дисперсионной среды  $1 \text{ г/см}^3$ ; плотность материала частиц  $2,65 \text{ г/см}^3$ ; вязкость дисперсионной среды  $0,001005 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

При отборе пипеткой одной пробы уровень суспензии в цилиндре понижается на 0,5 см.

Моменты времени отбора проб  $t$  устанавливаем в соответствии с продолжительностью оседания от зеркала суспензии до заборных отверстий пипетки частиц с  $\delta_r$  равными 25—16—10—6,3—4—2,5—1,6 мкм.

Всасывающие отверстия пипетки устанавливаем при отборе первой, второй, третьей пробы (соответственно определению массы частиц при  $\delta_s < 25$ , 16 и 10 мкм) на глубине 20 см от уровня зеркала суспензии, при отборе четвертой и пятой пробы (6,3 и 4 мкм) на глубине 10 см, при отборе шестой и седьмой пробы (2,5 и 1,6 мкм) на глубине 5 см.



Моменты времени  $t_i$  отбора пробы для определения массы частиц с размерами  $b_{si}$  вычисляем по формуле (14):

$$25 \text{ мкм } t_1 = 18 \cdot 10^7 \frac{0,001005 \cdot 20}{(2,65 - 1) \cdot 9,81 \cdot 25^2} = 11100 \frac{20}{25^2} = 356 \text{ с}$$

или 5 мин 56 с

$$16 \text{ мкм } t_2 = 11100 \frac{20 - 0,5}{16^2} = 845 \text{ с или 14 мин 5 с}$$

$$10 \text{ мкм } t_3 = 11100 \frac{20 - 1}{10^2} = 2109 \text{ с или 35 мин 9 с}$$

$$6,3 \text{ мкм } t_4 = 11100 \frac{10}{6,3^2} = 2796 \text{ с или 46 мин 36 с}$$

$$4,0 \text{ мкм } t_5 = 11100 \frac{10 \cdot 0,5}{4^2} = 6590 \text{ с или 1ч 49 мин 50 с}$$

$$2,5 \text{ мкм } T_6 = 11100 \frac{9}{2,5^2} = 8800 \text{ с или 2 ч 11 мин 20 с}$$

$$1,6 \text{ мкм } T_7 = 11100 \frac{5 \cdot 0,9}{1,6^2} = 19511 \text{ с или 5 ч 25 мин 11 с}$$

Сухой остаток при выпаривании бюкса с дисперсионной средой  $t_c = 0,00222$  г.

Значения масс сухих остатков в отобранных пробах  $m_i$ , а также значения проходов  $D_i$ , соответствующие массам частиц с размерами  $< b_{si}$  и вычисленные по формуле (15)

$$D_{\delta=25} = \frac{(0,0953 - 0,00222) 500}{10 \cdot 5} \cdot 100 = 93,1 \text{ И Т. Д.}$$

заносят в табл. 6.

Таблица 6. Протокол анализа дисперсного состава кварцевой пыли пипеточным методом

$b_{si}$ , мкм	$m_i$ , г	$m_i - m_c$ , г	$D_i$ , %	$\delta_{s_{i+1}} + \delta_{s_i}$ , мкм	ЛЭ, %
25	0,0953	0,0931	93,1	> 25	6,9
16	0,0845	0,0823	82,3	16—25	10,8
10	0,0637	0,0615	61,5	10—16	20,8
6,3	0,0523	0,0501	50,1	6,3—10	11,4
4,0	0,0322	0,0030	30,0	4,0—6,3	20,1
2,5	0,0175	0,0153	15,3	2,5—4,0	14,7
1,6	0,0082	0,0060	6,0	1,6—2,5	9,3
				< 1,6	6,0

Из приведенного примера видно, что при  $G = 5$  г и  $V = 500$  мл можно не пользоваться формулой (13), а вычислять значения А путем умножения значений  $m_i - m_c$  на 1000. Это значительно облегчает обработку результатов анализа,

## Анализ пыли жидкостным седиментографом НИИОГАЗ

Принцип анализа пыли на жидкостном седиментографе основан на методе накопления осадка на чашечке весов. В седиментографе НИИОГАЗ устранены недостатки, присущие приборам, основанным на этом методе. Результаты, получаемые на этом приборе и подъемной пипетке, достаточно хорошо совпадают.

**Устройство и принцип действия прибора.** Жидкостной седиментограф (рис. 22) состоит из седиментационного сосуда и регистрирующей системы [30, 52].

Седиментационный сосуд представляет собой стеклянный цилиндр 6 диаметром 65 мм (ГОСТ 1770—74). На верхнюю кромку цилиндра накладывается фигурный фланец 5 с закрепленной в нем соосно с цилиндром стеклянной трубкой 7 диаметром 35 мм. Кромка свободного конца трубки отшлифована. В центре трубки проходит капроновая нить (ГОСТ 10063—77), соединяющая чашечку 9 для накопления осадка, выпадающего из суспензии, с коромыслом весов.

Регистрирующая система включает электронный потенциометр КСП-4 (ГОСТ 7164—78), магазин сопротивления Р-33 и аналитические весы ВЛА с вмонтированным в них на специальном щите фоторезистором и соединенным соосно с левой чашкой весов сердечником / соленоида 2.

При поджаты к нижней кромке трубки 7 чашечке 9 в сосуд 6 заливают дисперсионную жидкость, а в сосуд 7 — суспензию анализируемой пыли в дисперсионной жидкости. Для поддержания равномерной температуры суспензии при проведении анализа сосуд 6 помещают в термостатирующий сосуд 8, заполненный дистиллированной водой и соединенный резиновыми шлангами с термостатом.

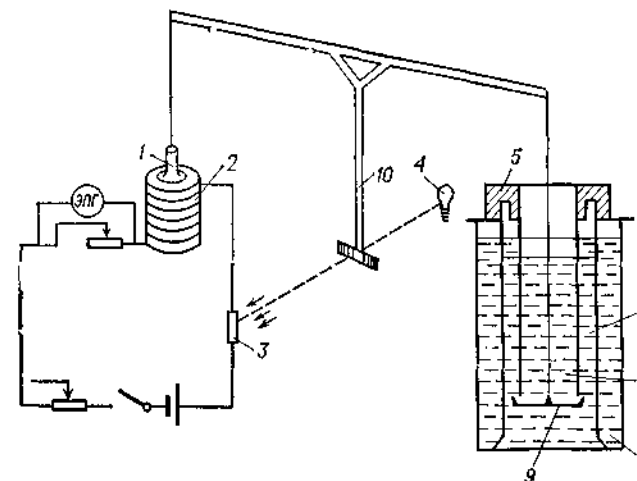


РИС. 22. Жидкостной седиментограф НИИОГАЗ.

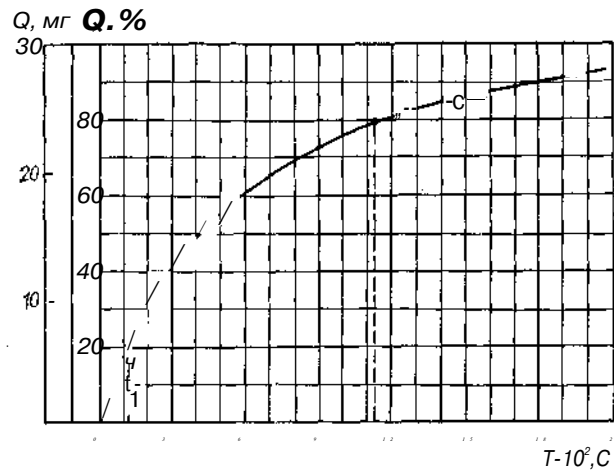


РИС. 23. Кривая накопления массы осадка на чашечке седиментографа.

Поджимное устройство от чашечки 9 отводят в сторону, и чашечка свободно повисает на капроновой нити. При выпадении осадка на чашечку равновесие весов нарушается. В результате этого стрелка 10 с диафрагмой, укрепленная в центре коромысла, отходит от среднего положения и луч света от лампочки 4, проходя через диафрагменную щель, попадает на фоторезистор 3. Сопротивление фоторезистора уменьшается, и на соленоид 2 подается большее напряжение. Сердечник 1 втягивается, возвращая весы в положение равновесия. При дальнейшем увеличении массы осадка стрелка снова отклоняется от положения равновесия — на соленоид подается еще большее напряжение, и он вновь возвращает весы в положение равновесия. Изменение напряжения и тока в соленоиде происходит до полного выпадения осадка на чашечку седиментографа и непрерывно регистрируется самописцем, вычерчивающим кривую накопления осадка анализируемой пыли (рис. 23).

Подготовка к анализу. Подготовку пробы пыли, определение плотности материала частиц, выбор дисперсионной жидкости, определение ее динамической вязкости и плотности проводят так же, как для анализа с помощью пипеточного прибора.

В цилиндр 6 (см. рис. 22) прибора заливают 600—700 мл дисперсионной жидкости. Опускают в цилиндр трубку 7, поджимают к ней при помощи капроновой нити чашечку 9 и укрепляют строго вертикально при помощи фигурного фланца. Цилиндр устанавливают на заранее фиксированное место в термостатирующем сосуде 8. Осторожно подвешивают при помощи капроновой нити к правому плечу коромысла чашечку 9 седиментационных весов. Включают термостат и поддерживают температуру суспензии постоянной ( $20 \pm 2^\circ \text{C}$ ) в течение всего времени проведения анализа,

После установления заданной температуры суспензии включают тумблеры блоков электрической схемы седиментографа. Уравновешивают седиментационные весы с помощью регулировочных грузиков. Луч света, идущий от лампочки, должен находиться в левой части на отражающем зеркальце весов.

После уравновешивания весов приступают к калибровке шкалы потенциометра. Открывают арретир весов. Стрелка потенциометра должна находиться в крайнем левом положении, которое фиксируют и принимают за нулевую точку. При помощи вращающегося малого лимба весов накладывают на правое коромысло грузики по 10 мг. Фиксируют на диаграммной ленте положение стрелки потенциометра соответствующее 10, 20, 30 мг и т. д. и так продолжают, пока стрелка не займет крайнее правое положение. Обычно предел шкалы потенциометра соответствует 30—50 мг.

Проведение анализа. Из подготовленной пыли берут навеску  $G_p$  взвешенную на аналитических весах с точностью до 0,1 мг. Массу навески (в мг) рассчитывают по формуле

$$G_n = G_p \cdot (P_t - P_x) / (P_t - P_x)$$

где  $G_p$  — предел шкалы потенциометра, мг;  $\rho_p$  — плотность исследуемой пыли, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_x$  — плотность дисперсионной среды, г/см<sup>3</sup>.

Навеску помещают в стакан вместимостью 50 мл, заливают 20—30 мл дисперсионной жидкости и диспергируют на ультразвуковой установке типа УЗДН-1 в течение 1 мин. Стакан закрывают пробкой, соединенной с вакуум-насосом, и вакуумируют до прекращения выделения пузырьков воздуха. При арретированных весах плотно поджимают чашечку 9 к сосуду 7 и грушей через резиновый шланг отсасывают жидкость из сосуда 7. Приготовленную суспензию выливают в сосуд 7 и дисперсионной жидкостью доливают до уровня жидкости в цилиндре 6. Суспензию в сосуде 7 тщательно перемешивают мешалкой и фиксируют время начала осаждения пыли. Убирают поджимное устройство от чашечки 9 и открывают арретир весов. Регистрирующий прибор начинает записывать на диаграммной ленте кривую накопления массы осадка (рис. 23).

Обработка результатов. Исходя из полученной кривой накопления массы осадка, вычисляют дисперсный состав пыли по методу Авдеева [1, 30, 52].

Интегральная кривая распределения частиц пыли, изображающая суммарное процентное содержание всех фракций больше данного размера, аппроксимируется выражением

$$Q_t = (1 - \rho_p / \rho_l) \cdot \Theta(t) + \text{const} \quad (16)$$

где  $Q(t)$  — относительная масса частиц, осевших за время  $t$ ; ее можно вычислить по формуле

$$QW = (1 - e^{-kx}) \quad (17)$$

$x = \chi_0 T^n$  — функция времени седиментации;  $\chi_0$  и  $n$  — параметры, определяемые из экспериментальной кривой накопления массы осадка.

К формулам (16) и (17) в приложении 4 даны таблицы.

На кривой накопления массы осадка для двух значений времени процесса седиментации  $x_1$  и  $x_2$  отмечают процентное количество осадка  $Q_1$  и  $Q_2$ . Значения  $x_1$  и  $t_2$  выбирают по обе стороны от наибольшей кривизны кривой (обычно  $x_1$  берут для  $Q_1$  в пределах от 20 до 30%, а  $x_2$  для  $Q_2$  — от 60 до 80%). По табличным значениям функции седиментации (см. приложение 4, таблица 1) находят величины  $x_1$  и  $x_2$ , соответствующие  $Q_1$  и  $Q_2$ .

Параметры при  $\mu_0$  вычисляют по следующим формулам:

$$\beta = \lg \frac{x_2}{x_1} / \lg \frac{t_2}{t_1} \quad \text{и} \quad \mu_0 = x_1 t_1^{-\beta} = x_2 t_2^{-\beta} \quad (18)$$

Задаваясь различными значениями  $x_i$ , вычисляют значения  $X_i$  по формуле

$$x_i = \mu A \quad (19)$$

Исходя из значений  $p$ , по таблице 2 приложения 4 или по формуле (16) находят для каждого  $X_i$  соответствующие величины  $R_i$ . Диаметры частиц  $b_{si}$ , соответствующие принятым значениям  $x$ , определяют по формуле (1).

Расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 3%. В противном случае определение повторяют.

Пример анализа. Условия проведения анализа: пыль корундовая; плотность материала частиц 3,27 г/см<sup>3</sup>; дисперсионная жидкость — этиловый спирт; плотность дисперсионной среды 0,81 г/см<sup>3</sup>; динамическая вязкость дисперсионной среды 0,00145 Па·с; высота осаждения частиц 16,4 см; предел шкалы потенциометра 30 мг; проход на сите 0063  $D = 0,864$ .

Для приготовления суспензии рассчитываем навеску пыли по формуле (15);

$$G_n = \frac{30 \cdot 3,27}{(3,27 - 0,81)} = 39,8 \text{ мг}$$

На кривой накопления массы осадка (рис. 23) для двух значений времени процесса седиментации  $X_1 = 120$  с и  $X_2 = 1140$  с отмечаем процентные количества осадка  $Q_1 = 20,0\%$  и  $Q_2 = 80\%$ .

По таблице 1 приложения 4 находим величины  $x_1 = 0,22$  и  $x_2 = 2,15$ , соответствующие  $Q_1$  и  $Q_2$ .

По формулам (18) вычисляем параметры  $\beta$  и  $\mu_0$ :

$$\beta = \lg \frac{2,15}{0,22} / \lg \frac{1140}{120} = 1,01$$

$$\mu_0 = 0,22 \cdot 120^{1,01} = 2,15 \cdot 1140^{1,01} = 0,001745$$

Задаваясь различными значениями  $t_i$ , вычисляем значения  $x_i$  по формуле (19)

$$\text{для } t_1 = 180 \text{ с} \quad x_1 = 0,001745 \cdot 180^{1,01} = 0,33$$

$$\text{для } t_2 = 300 \text{ с} \quad x_2 = 0,001745 \cdot 300^{1,01} = 0,56$$

и т. д. для  $x_i = 600, 1200, 3000, 6000$  и  $15000$  с.

Исходя из найденных значений  $x$  и  $p$ , по таблице 2 приложения 4 или по формуле (16) находим значения  $R_i$ , т.е. процент частиц крупнее седимен-

тационного диаметра  $b_{si}$ , вычисляемого по формуле (1) в зависимости от времени седиментации:

$$\delta_{s_1} = \sqrt[3]{\frac{18 \cdot 10^7 \cdot 0,00145 \cdot 16,4}{(3,27 - 0,81) \cdot 9,81}} \cdot \frac{1}{\sqrt{x}} = \frac{420}{\sqrt{x}} = \frac{420}{\sqrt{31}} = 31 \text{ мкм}$$

$$b_{s_1} = 420 / \sqrt{300} = 24 \text{ мкм и т. д.}$$

Результаты обработки данных анализа заносим в табл. 7.

Таблица 7. Протокол анализа корунда жидкостным седиментографом

Время седиментации, с	Седиментационный диаметр $b_{si}$ , мкм	Функция времени седиментации $Xt$	R, %	D, %	
				для прохода через сито	с учетом остатка на сите с ячейками 63 мкм
180	31,0	0,33	4,6	95,4	82,4
300	24,0	0,56	16,7	83,3	72
600	17,0	1,12	40,7	59,3	51
1200	12,0	2,26	64	36	31
3000	7,60	5,72	83,8	16,2	14
6000	5,35	11,5	91,6	8,4	7,25
15000	3,4	29,2	96,7	3,3	2,84

### Анализ высокодисперсной пыли при помощи стационарной лабораторной центрифуги

**Принцип метода и аппаратура.** Седиментометрический анализ суспензий в поле гравитационных сил применим только для фракций с частицами крупнее 1—2 мкм. Большая продолжительность седиментации более тонких частиц приводит к чрезмерным затратам времени на анализ. Центробежные силы, воздействующие на частицы в кювете обычной центрифуги, в сотни раз превышают силы тяжести.

Метод анализа суспензии при помощи лабораторной центрифуги основан на седиментации частиц пыли в центробежном поле и последующем определении массы частиц, осевших за определенный промежуток времени. Для проведения такого анализа рекомендуется лабораторная стационарная центрифуга ЦЛС-3 (МРТУ 42-1778-65).

**Подготовка к анализу.** Подбирают дисперсионную жидкость и определяют ее плотность и вязкость. Пикнометрическим методом определяют плотность материала частиц пыли.

Взвешивают с точностью до 0,0001 г восемь чистых центрифугальных пробирок вместимостью 25 мл.

В зависимости от дисперсного состава пробы анализ проводят при угловой скорости ротора центрифуги 41,8; 104,6 или

209,3 рад/с (частоте вращения 400, 1000 или 2000 об/мин). Необходимую частоту вращения ротора устанавливают опытным путем. Для этого берут две навески исследуемой пыли по 0,05 г и определяют, как описано ниже, количество пыли, осаждающейся за 1 мин при угловой скорости ротора 209,3 рад/с. Если осаждается менее 35% от взятой навески, то анализ проводят при 209,3 рад/с, если 35–50% — при 104,6 рад/с, более 50% — при 41,8 рад/с.

**Проведение анализа.** В две предварительно взвешенные пробирки центрифуги помещают по 0,05 г исследуемой пыли, взвешенной с точностью до 0,0001 г [52].

Пипеткой вливают по 25 мл дисперсионной жидкости и суспензию диспергируют на ультразвуковой установке в течение 1 мин с излучателем ультразвука с частотой 35 кГц. Быстро устанавливают пробирки в ротор центрифуги в диаметрально противоположные гнезда. Закрывают крышку и включают центрифугу в электросеть.

Устанавливают необходимую частоту вращения ротора центрифуги. После разгона ротора (определяют по счетчику оборотов центрифуги) включают секундомер. Время разгона и остановки ротора учтено калибровочным графиком. Через 1 мин центрифугу выключают, после остановки ротора вынимают пробирки с плотным осадком на дне. Суспензию над осадком осторожно, не нарушая структуры осадка, сливают в две другие предварительно взвешенные пробирки. Их устанавливают в центрифугу и вновь центрифугируют в течение 5 мин. Суспензию сливают в чистые пробирки и центрифугируют 10 мин. Следующее центрифугирование длится 40 мин. Пробирки с осадком ставят в стаканы, помещают в сушильный шкаф и сушат 2–3 ч при 105 °С (органические пыли — до 60 °С). После этого пробирки охлаждают в эксикаторе в течение 30 мин и взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Высушивание повторяют до постоянной массы.

По разности масс пробирки с пылью и пустой определяют массу пыли, выделенной из взвеси во время центрифугирования. Результаты взвешиваний заносят в протокол. Форма протокола приведена в табл. 8.

Таблица 8. Протокол анализа кварцевой пыли в поле центробежных сил

Время центрифугирования, мин	Масса пробирок, г		Привес пыли			Время центрифугирования суммарно, мин
	с пылью	чистых	в каждой пробирке, г	суммарный		
				г	%	
1	37,3366	37,3245	0,0121	0,0121	24,2	1
5	35,9110	35,8956	0,0154	0,0275	55,0	6
10	36,8752	36,8677	0,0075	0,0350	70,0	16
40	35,8387	35,8282	0,0105	0,0455	91,0	56

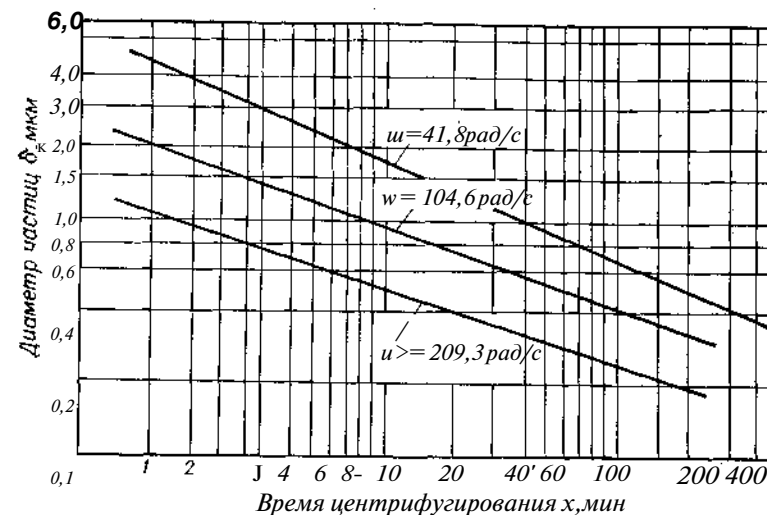


РИС. 24. Калибровочный график центрифуги.

**Обработка результатов.** По результатам опыта строят кривую накопления массы осадка в зависимости от времени центрифугирования.

Полученную кривую обрабатывают по методу Авдеева. Последовательность расчета интегральной кривой распределения и расчетные формулы те же самые, что и при обработке результатов анализа, выполненного жидкостным седиментографом.

По калибровочному графику для принятых значений  $t_c$  находят соответствующие значения размеров частиц  $b_{*i}$ . На рис. 24 приведен калибровочный график для дисперсионной жидкости плотностью  $\rho_{ж} = 1 \text{ г/см}^3$  и вязкостью  $\tau_{ж} = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , плотности материала частиц пыли  $\rho_t = 2,6 \text{ г/см}^3$ . Если эти параметры отличаются от калибровочных, то истинное значение седиментационного диаметра частиц  $b_{st}$  следует вычислить по формуле

$$b_{st} = b_{*i} \sqrt{\frac{\rho_T - \rho_{ж}}{\rho_T}}$$

За окончательный результат принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений.

Расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 3%. Если оно превышает указанную величину, определение повторяют.

**Пример анализа.** Условия проведения анализа: пыль кварцевая; плотность материала частиц 2,60 г/см<sup>3</sup>; дисперсионная жидкость — дистиллированная вода; стабилизатор — 1 мл 0,1% раствора ОП-10; плотность дисперсионной среды 1 г/см<sup>3</sup>; вязкость дисперсионной среды 0,001 Па·с; концентрация суспензии 0,2%; объем суспензии 25 мл; время центрифугирования 1; 5; 10 и

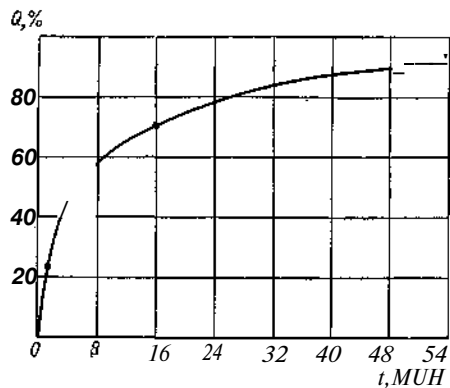


РИС. 25. Кривая накопления массы осадка в зависимости от суммарного времени центрифугирования.

40 мин; скорость вращения ротора центрифуги 104,6 рад/с (1000 об/мин).

Результаты взвешиваний сухого остатка в пробирках приведены в табл. 8.

По суммарному привесу пыли  $Q$ , выраженному в процентах, строим кривую накопления массы осадка в зависимости от суммарного времени центрифугирования  $t$ , мин (рис. 25).

На кривой накопления осадка выбираем две точки с координатами  $Q_1, T_1$  (33%, 2 мин) и  $Q_2$ ,

$T_2$  (74%, 20 мин) и по таблице 1 приложения 4 находим соответствующие значения  $x = 0,35$  и 1,6. Затем по формулам (18) определяем параметры (5 и  $c_0$ :

$$\beta = 0,35 \cdot 0,66 = 0,231$$

$$N_0 = 0,035 \cdot 0,5^{-0,66} = 1,6 \cdot 20^{-0,66} = 0,222$$

Задаваясь рядом значений  $X_i$  (см. табл. 8) вычисляем по формуле (19) значения  $X_i = 0,222 \cdot 1^{0,66} = 0,222$ ;  $x_2 = 0,222 \cdot 3^{0,66} = 0,47$  и т. д.

По найденным значениям  $x_i$  и параметру  $p$  в таблице 2 приложения 4 или пользуясь формулой (16) определяем значения  $Rx$ . По калибровочному графику (рис. 24) для скорости вращения ротора центрифуги  $\omega = 104,6$  рад/с находим значения  $\beta_i$ , соответствующие выбранным значениям  $t$  и все полученные результаты заносим в табл. 9.

Таблица 9. Результаты обработки данных анализа

Время центрифугирования, мин	$X_i$	Содержание частиц, %		Размер частиц, мкм
		крупнее $\bar{R}$	мельче $\bar{D}$	
1	0,22	8,2	91,8	2,1
3	0,47	21,4	78,6	1,4
10	1,02	46,4	53,6	0,9
30	2,09	68,0	32,0	0,63
100	4,66	83,9	16,1	0,4
240	8,30	90,5	9,5	0,3

### 3.5. МЕТОДЫ ВОЗДУШНОЙ СЕПАРАЦИИ

В отличие от седиментометрических методов, где частицы пыли оседают в дисперсионной среде, находящейся в спокойном состоянии, при воздушной сепарации (эти методы называются также аэродинамическими) дисперсионная среда (воздух) находится в период анализа в постоянном движении [36].

В отечественной практике применяются основанные на этом методе ротационный анализатор дисперсности РАД-1 [31, 59] и

струйные сепараторы — импакторы [11, 35, 57]. Основное преимущество этих устройств заключается в том, что с их помощью можно анализировать дисперсный состав пыли непосредственно в газоходах или воздухопроводах. Таким образом устраняются возможные искажения дисперсного состава реальной пыли при вторичном диспергировании отобранной пробы пыли.

Эти методы можно применить и в лаборатории для анализа уловленной пыли. В связи с этим отпадают трудности, связанные с подбором дисперсионной среды.

### Анализ пыли ротационным анализатором дисперсности РАД-1

**Основные сведения о приборе и принцип его действия.** Метод основан на центробежной сепарации частиц пыли в процессе движения пылегазового потока по вращающемуся ротору и определении массы осадка на различном расстоянии от начала проточного канала ротора.

При помощи РАД-1 можно определять дисперсный состав пыли в интервале  $\delta_s = 1,5$ –100 мкм (при  $p_t = 1$  г/см<sup>3</sup>), при температуре газа до 160 °С и запыленности газового потока до 50 г/м<sup>3</sup>.

Ротационный анализатор относится к классу центрифуг проточного типа. Пылегазовый поток просасывается по каналу вращающегося ротора. Под действием центробежных сил пылевые частицы выделяются из потока и оседают на стенке канала. Скорость движения частиц к стенке канала пропорциональна квадрату их диаметра. Следовательно, распределение массы осадка по длине ротора обусловлено дисперсным составом пыли. Исходя из распределения массы осадка по длине канала, рассчитывают дисперсный состав пыли. Для этого необходимо знать граничную длину / осаждения частиц различного размера. Значения / определяются по калибровочному графику, на котором по оси абсцисс откладываются значения граничного седиментационного диаметра частиц  $\delta_s$ , а по оси ординат — значения длины канала ротора /. На значение / оказывают также влияние частота вращения ротора и скорость движения запыленного потока по каналу ротора, а также плотность материала частиц и вязкость газа.

Общее количество осажженной в приборе пыли, отнесенное к объему прошедшего через ротор газа, дает величину запыленности потока.

Ротационный анализатор дисперсного состава пыли разработан в Семибратовском филиале НИИОГАЗ, который имеет техническую документацию на этот прибор.

**Устройство прибора.** Ротор анализатора (рис. 26) состоит из двух коаксиальных трубок / и 2; кольцевая щель 3 между ними служит проточным каналом ротора. Ротор размещен в корпусе, состоящем из трубки 6, на концах которой укреплены передняя 7 и задняя 11 головки. В головках расположены подшипники

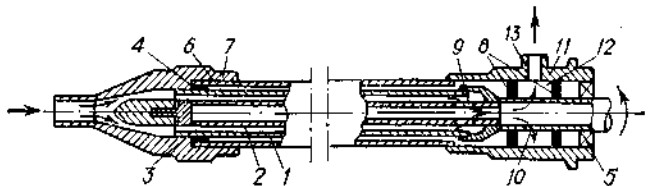


РИС. 26. Ротационный анализатор дисперсности РАД-1.

4 и 5, а также устройства ввода и вывода потока газа из проточного канала. По оси передней головки посредством винтообразных направляющих фиксируется конус-обтекатель 7. В задней головке с помощью уплотнений 8 образуется герметичная камера 12, сообщающаяся через окна 9 и 10 в трубке 2 с проточным каналом ротора 3.

Вращение ротора осуществляется ручной сверлильной электрической машиной ИЭ-ЮОЗА (ГОСТ 8524—80), подсоединенной к ротору с помощью переходной втулки. Частота вращения контролируется тахометром, вмонтированным в переходную втулку, а регулируется путем изменения напряжения, подаваемого на электродвигатель ротационного анализатора.

Пылегазовый поток по заборной трубке поступает в головку 7 и направляется в кольцевой канал 3, где ему сообщается вращательное движение. Пылевые частицы осаждаются на внутренней поверхности трубки /. С целью удобства сбора пыли в проточный канал вставляется пылесборная трубка — набор цилиндров из алюминиевой фольги. Не осевшая в канале пыль улавливается фильтром, присоединяемым к штуцеру 13.

Подготовка и проведение анализа в производственных условиях. Место отбора пробы из пылегазового потока непосредственно в газоходе или воздуховоде выбирают, как указано в п. 1.2. Обычно ее отбирают в точках, выбранных для измерения запыленности потока. Размеры анализатора позволяют вводить его в газоход через штуцера, используемые для ввода пылезaborной трубки.

Перед отбором пробы исследуют поле скоростей в сечении газохода (см. п. 1.2). Если скорость газа в каждой измерительной точке отличается от усредненной по сечению газохода скорости газа не более чем на 15% или отбираемая пыль тонкая (80—90% частиц мельче 5 мкм), то пробу можно отбирать из одной точки сечения (обычно по оси газохода). В противном случае необходимо дисперсный состав пыли определять в каждой измерительной точке и за окончательный результат принимать усредненное значение.

Перед проведением определения взвешивают пылесборные цилиндры анализатора на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Соединяют взвешенные цилиндры так, чтобы получилась трубка, заворачивают в кальку и помещают ее в канал ротора. Наворачивают головку 7, помещают в фильтровальный

патрон анализатора фильтр типа АФА-ХА-18 при отборе газа с температурой до 130°C или набивку из стекловолкна, которая выдерживаем температуру до 250°C. Фильтр со стекловолкном должен быть доведен до постоянной массы высушиванием при температуре 250°C. Набивку уплотняют так, чтобы гидравлическое сопротивление фильтровального патрона при расходе газа 20 л/мин достигало 6—9 кПа (50—70 мм рт. ст.). Патрон с фильтром взвешивают с точностью до 0,0001 г и помещают в фильтрующее устройство анализатора, имеющее обогрев для предотвращения возможной конденсации.

Подготовленный к работе прибор проверяют на герметичность. Для этого подключают прибор через расходомер к побудителю тяги и создают расход газа через прибор 15—25 л/мин. При включенном роторе плотно закрывают входное отверстие заборной трубки анализатора. Если прибор герметичен, показание расходомера должно упасть до нуля. Если обнаружится подсос, следует сменить прокладки и вновь проверить прибор на герметичность. Собирают установку согласно рис. 7,6, только вместо фильтрующего элемента и пылезaborной трубки подключают ротационный анализатор.

Рассчитывают время отбора пробы, исходя из условия, чтобы масса пыли, осажженной в трубке прибора, была в пределах от 25 до 250 мг. Минимальная продолжительность отбора пробы при ее содержании в газе от 0,1 до 50 г/м<sup>3</sup> составит при этих условиях от 20 мин до 25 с.

По формуле (4) рассчитывают показания шкалы расходомера  $Q_p$  из условия, что расход газа через прибор во время анализа должен быть 20 л/мин.

Отбор пробы пыли из газохода или воздуховода производят в такой последовательности:

определяют при помощи микроанометра и пневмометрической трубки скорость газа в измерительной точке газохода;

подбирают наконечник с диаметром заборного отверстия, удовлетворяющим при заданном расходе газа через прибор условию изокинетичности (диаметр наконечника рассчитывают по формуле (3) или находят по номограмме — см. рис. 30);

навинчивают на заборную трубку анализатора наконечник, а трубку — на головку прибора;

устанавливают прибор в газоход так, чтобы временно (до включения двигателя ротора и побудителя тяги) устье наконечника было направлено по потоку газа;

включают электрообогрев фильтра и прогревают фильтр в течение 15 мин;

включают двигатель ротора и наблюдая за показанием микроамперметра регулируют скорость его вращения — 524 рад/с (частота 5000 об/мин) и поддерживают ее постоянной;

соединяют резиновой трубкой штуцер патрона фильтра через расходомер с побудителем тяги и, регулируя зажим на резиновой трубке, устанавливают заданный расход газа;

поворачивают прибор так, чтобы устье наконечника было направлено навстречу газовому потоку и отмечают момент начала опыта на часах (минуты и секунды) или пускают в ход секундомер;

расход газа через прибор в течение отбора пробы поддерживают постоянным.

По окончании опыта анализатор разворачивают так, чтобы устье наконечника было направлено по ходу газового потока и, не выключая ротора и побудителя тяги, вынимают анализатор из газохода. Кладут его на горизонтальную плоскость и последовательно выключают побудитель тяги и электропитание.

Отвинчивают головку анализатора и пинцетом вынимают пылесборную трубку. Во избежание ссыпания пыли с первого цилиндра, его помещают на лист тонкой фольги размером 40X60 мм и заворачивают в нее. Трубку с осажденной на ней пылью и фильтрующий патрон помещают в специальный пенал. В таких пеналах пылесборные трубки с пылью транспортируются в лабораторию, где трубку расчлениают на отдельные цилиндрики и взвешивают их и патрон с точностью до 0,0001 г.

Результаты взвешиваний заносят в протокол (см. табл. 10)

Таблица 10. Протокол анализа золы ротационным анализатором

Номер цилиндра	Длина цилиндра, см	Масса цилиндра, г		Привес пыли Q			Суммарная длина цилиндров /, см
		с пылью	чистого	в каждом цилиндре, г	суммарно		
					г	%	
1	2	0,5348	0,5161	0,0187	0,0187	33,2	2
2	2	0,2986	0,2858	0,0128	0,0315	55,9	4
3	3	0,4764	0,4695	0,0069	0,0384	68,1	7
4	5	0,6793	0,6738	0,0055	0,0439	77,9	12
5	7	0,9067	0,9027	0,0040	0,0479	85	19
6	8	0,9569	0,9540	0,0029	0,0508	90,1	27
7	7,5	0,8794	0,8781	0,0013	0,0521	92,4	34,5
Фильтр		7,5364	7,5321	0,0043	0,0564	100	—

и по полученным данным строят кривую накопления массы осадка по длине канала ротора. По оси ординат откладывают суммарную массу осадка пыли в процентах, а по оси абсцисс — длину канала от начала его кромки в сантиметрах.

Дисперсный состав пыли определяют путем математической обработки кривой накопления массы осадка. Седиментационные диаметры частиц определяют по калибровочному графику для соответствующих значений длины трубки.

На рис. 27 приведен калибровочный график ротационного анализатора для следующих условий опыта: расход воздуха 20 л/мин; скорость вращения ротора 524 рад/с; плотность мате-

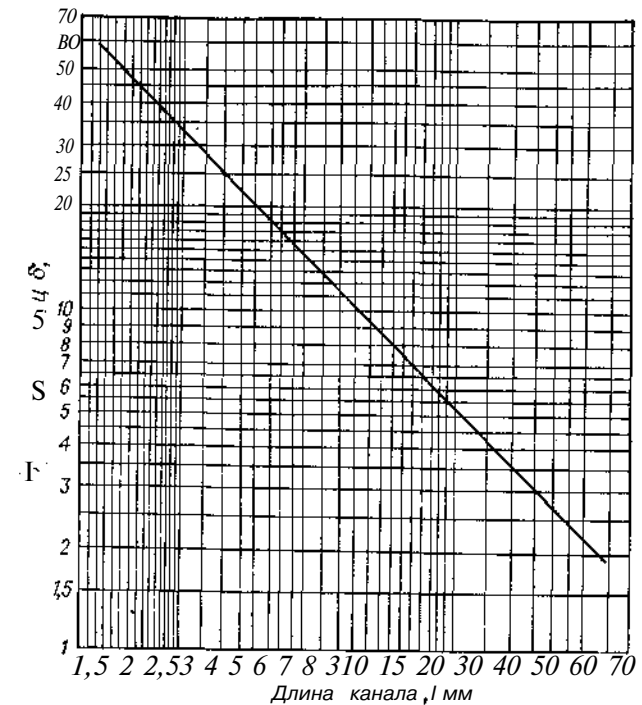


РИС. 27. Калибровочный график анализатора РАД-1,

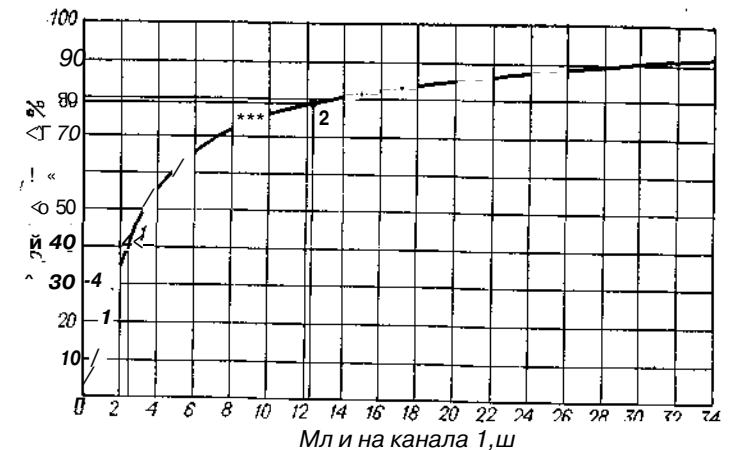


РИС. 28. Кривая накопления осадка пыли по длине канала ротационного анализатора.

риала частиц  $\rho_p = 1 \text{ г/см}^3$ ; температура воздуха  $20^\circ\text{C}$  и, соответственно, его динамическая вязкость  $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Если в условиях опыта плотность частиц  $\rho_p^*$  и вязкость газа будут отличаться от указанных выше величин, то диаметр частиц должен быть вычислен по следующей формуле:

$$b_s^* = \delta_s \cdot d / m^* / 1,82 \cdot 10^{-5} \rho; \quad (20)$$

где  $b_s$  — диаметр частиц, найденный по калибровочному графику.

**Пример обработки результатов.** Условия проведения анализа: вид пыли — зола; место отбора пробы — газопровод перед электрофильтром в котельном отделении ГРЭС; плотность материала частиц  $2,1 \text{ г/см}^3$ ; температура газа  $140^\circ\text{C}$  (вязкость  $2,35 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ); скорость вращения ротора  $524 \text{ рад/с}$ ; расход газа  $20 \text{ л/мин}$ .

Результаты взвешивания цилиндров приведены в протоколе анализа (табл. 10).

По полученным данным о суммарном привесе пыли строим кривую накопления массы осадка по длине канала (рис. 28). Кривую обрабатываем аналитически: выбираем две точки, первую для  $Q_1 = 40\%$ , вторую для  $Q_2 = 78\%$ . Выбранным точкам соответствуют значения  $h = 2,5 \text{ см}$  и  $h = 12,4 \text{ см}$ . По таблице 1 приложения 4 находим соответствующие  $Q_1$  и  $Q_2$  значения  $x_1 = 0,45$  и  $x_2 = 1,92$ .

По формулам (18) вычисляем параметры кривой накопления массы осадка:

$$P = \lg(1,92 : 0,45) / \lg(12,4 : 2,5) = 0,9$$

$$H_{0,1} = 0,45 \cdot 2,5^{-0,9} = 0,198$$

$$\mu_{0,2} = 0,2$$

$$H_{0,2} = 1,92 \cdot 12,4^{-0,9} = 0,202$$

Задаемся рядом значений  $h$  и вычисляем соответствующие им значения по формуле  $x_i = (x_0)^{h_i}$ .

Исходя из значения  $\beta = 0,9$  по таблице 2 приложения 4 для каждого значения  $h_i$  находим процентное содержание фракций  $R_i$  размером более  $b_{s,i}$ .

По калибровочному графику прибора (рис. 27) для выбранных значений  $h$  находим значения  $b_i$  и уточняем их по формуле (20), исходя из условий опыта!

$$b_s^* = b^* d / 2,35 \cdot 10^{-5} / (1,82 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1) = 0,784$$

За окончательный результат принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений. Расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 5% в области грубых фракций и 3% в области мелких ( $< 2 \text{ мкм}$ ) фракций. В противном случае определение повторяют.

Анализ уловленной пыли в лабораторных условиях. Ротационный анализатор РАД-1 можно также использовать для определения дисперсного состава уловленной пыли или порошкообразного материала в лабораторных условиях на специальной установке.

Лабораторная установка (рис. 29) представляет собой трубу / диаметром  $140 \text{ мм}$  и длиной  $1200 \text{ мм}$ . На входе в трубу

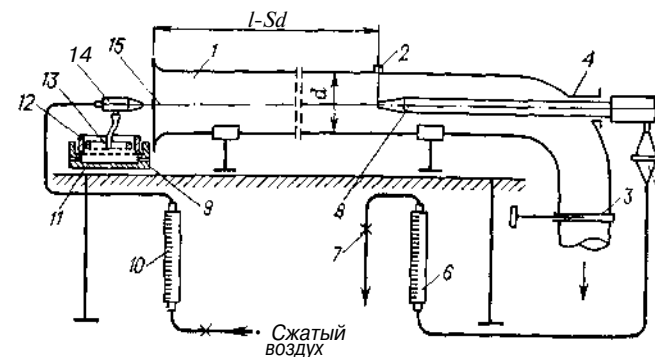


РИС. 29. Лабораторная установка для анализа уловленной пробы пыли при помощи ротационного анализатора и кассета с эжектором для диспергирования пыли.

Результаты вычислений заносим в табл. 11.

Таблица 11. Результаты аналитической обработки кривой накопления осадка

Длина канала $h$ , см	$\beta$	Функция $Q_i^* \cdot \beta$	Содержание частиц крупнее $R_i$ , %	Содержание частиц мельче $D_i$ , %	Размер частиц, мкм	
					$b_i$	$\mu_i$
2	18	0,36	9,0	91,0	48	37,6
3,5	3,1	0,62	22,9	77,1	29	22,7
5,0	4,2	0,84	33,2	66,8	20	15,7
8,0	6,5	1,30	48,7	51,3	13	10,2
12,0	9,4	1,88	60,6	39,4	8,6	6,7
18,0	13,4	2,68	70,3	29,7	5,8	4,5
25,0	18,1	3,62	77,1	22,9	4,3	3,4
35,0	24,5	4,90	82,4	17,6	3,1	2,44
50,0	33,8	6,76	87,0	13,0	2,2	1,73

имеется коллектор 15, а на противоположном конце — плавный поворот на  $90^\circ$ , после которого установлена задвижка 3 для регулировки расхода воздуха. Воздуховод после задвижки присоединен к всасывающему отверстию вентилятора (на рисунке не показан).

Ротационный анализатор 8 устанавливают в трубе 1 коаксиально через штуцер 4, приваренный на повороте трубы. Входное отверстие РАД и штуцер 2 диаметром  $5 \text{ мм}$  для измерения статического давления и температуры воздуха расположены на расстоянии пяти калибров от входного отверстия трубы.

Для искусственного запыления воздуха используют специальную кассету и эжектор 14.

Кассета представляет собой плоскую чашку 12 диаметром  $60\text{--}80 \text{ мм}$  и высотой  $5 \text{ мм}$  с сетчатым дном и крышкой 13, между которыми помещается анализируемая пыль. Размер ячеек



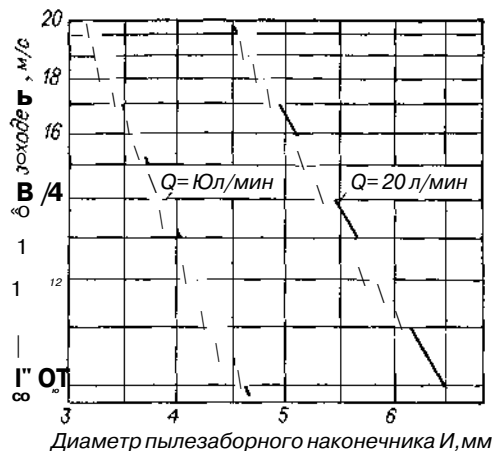


рис. 30. График для подбора диаметра наконечника.

сетки 100—200 мкм. Кассета помещается в металлический стакан *И*, имеющий по периметру на расстоянии 15 мм от дна 3-миллиметровый выступ. В нижней части стакана до выступа просверлено 15—20 отверстий для прохода воздуха. Стакан необходим для того, чтобы крепить кассету и собирать просыпавшуюся пыль через нижнюю сетку. Эта пыль во время

анализа также подается эжектором в трубу. При проведении анализа стакан и эжектор должны быть заземлены для снятия электростатических зарядов.

Расход воздуха в эжекторе и приборе РАД измеряют, соответственно, расходомерами *10* и *6*. Зажим *7* служит для регулировки расхода воздуха, просасываемого через прибор РАД и последовательно включенный фильтр АФА *5*.

При подготовке к анализу измеряют при помощи микроанометра с пневмометрической трубкой скорость воздуха в трубе. Носик пневмометрической трубки устанавливают в центре трубы в той точке, где будет расположено устье входного наконечника РАД-1.

Исходя из скорости воздуха в точке отбора пробы и его расхода в приборе РАД-1 по номограмме (рис. 30) подбирают наконечник с соответствующим диаметром входного отверстия. Выбранный наконечник навинчивают на входной патрубок анализатора.

Взвешивают пылесборные цилиндры и фильтр на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Взвешенные цилиндры соединяют так, чтобы получилась трубка, заворачивают ее в калку и помещают в канал ротора, а фильтр — в фильтровальный патрон анализатора.

Вводят анализатор через штуцер *4* (см. рис. 29) в газоход лабораторной установки, так чтобы носик пылезаборного наконечника был в точке замера скорости и направлен навстречу потоку. С помощью накидной гайки анализатор закрепляют в штуцере газохода. Соединяют анализатор резиновой трубкой через расходомер *6* с побудителем тяги. Закрывают зажим *7*.

Пробу пыли (40—60 г), подготовленную как указано в гл. 1, сушат в сушильном шкафу до постоянной массы и помещают в эксикатор для охлаждения,

Затем 20—30 г сухой пыли насыпают ровным слоем в кассету распыляющего устройства. Кассету помещают в стакан. Включают вентилятор лабораторной установки. Подают напряжение на ротационный анализатор, устанавливают регулятором напряжения скорость вращения ротора 524 рад/с. Включают устройство для отсоса газа и зажимом *7* создают расход газа через анализатор 20 л/мин.

Подают сжатый воздух на эжектор и прижимают всасывающий патрубок распылителя к крышке кассеты. Вращательными движениями от центра к периферии засасывают пыль из кассеты. После распыления всей пробы, кассету вынимают из стакана и засасывают просыпавшуюся через сетчатое дно кассеты пыль. Выключают вентилятор и побудитель тяги.

Не выключая электропитания ротационного анализатора, вынимают его из трубопровода, кладут на горизонтальную поверхность и затем выключают электродвигатель. Вынимают из прибора трубку с осевшей на ней пылью, фильтр из патрона и взвешивают.

Все дальнейшие операции по определению привеса цилиндров трубки, фильтра и обработке полученных данных выполняют, как указано выше.

#### Анализ пыли струйным сепаратором

**Основные сведения о приборе и принцип его действия.** Принцип действия струйного сепаратора (импактора) основан на инерционном осаждении взвешенных частиц на плоскую поверхность в результате резкого изменения направления движения запыленного потока при обтекании им плоской поверхности и на последующем определении массы частиц, осевших на эту поверхность [30, 52, 57].

Струя запыленного газа просасывается через несколько последовательно установленных в корпусе сепаратора сопел с расположенными против них экранами (ловушками). Диаметры сопел по ходу газового потока уменьшаются, а скорость выхода потока из них соответственно увеличивается. На каждой последующей ловушке улавливаются все более тонкие частицы. Наличие связи между размерами осаждающихся частиц и скоростью газа позволяет судить о дисперсности пыли.

Эффективность различных ступеней импактора принято определять диаметром частиц  $\delta_0$ . Каждой ступени соответствует свое значение  $\delta_0$ , которое является константой ступени. Величину  $\delta_0$  с достаточной точностью можно рассматривать как абсолютную границу разделения фракции, т. е. как значение диаметров частиц, улавливаемых с эффективностью 100%.

Существуют несколько отечественных модификаций струйных сепараторов, различающихся в основном числом и конфигурацией ступеней [И, 57]. Наиболее широко применяются в промышленности импакторы НИИОГАЗ. Последним вариантом

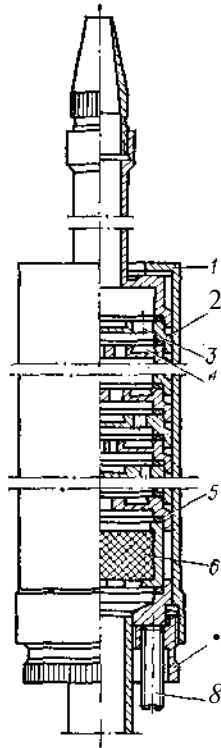


РИС. 31. Струйный сепаратор (импактор) модели IX.

этих импакторов является модель IX, техническая документация на которую имеется в НИИОГАЗ (Москва).

Устройство прибора. Устройство импактора модели IX схематично показано на рис. 31. Он состоит из семи сдвоенных ступеней. Сдвоенные ступени способны более четко к разделению частиц на фракции. Четырнадцать дисков 2 (на схеме сдвоенные ступени изображены как единые) заключены в корпусе 1. В каждом диске имеются сопла 3 и выемка 4, заполняемая смазкой или фильтровальным материалом для удержания частиц. При этом сопла принадлежат последующей ступени, а выемка предшествующей. Таким образом, число дисков, из которых собран импактор, отвечает числу ступеней в нем [52].

Сопла одних ступеней располагаются в центре диска, сопла других — по его периферии. Диски с центральным и периферийным расположением сопел чередуются с таким расчетом, чтобы смазка или подложка в выемке располагалась напротив сопла. Сопла каждой ступени выполнены в виде нескольких отверстий в дисках. Суммарное сечение отверстий

в дисках по ходу газа уменьшается. Пыль, не уловленная последней ступенью, задерживается в фильтре 6, который заполняется стекловолокном или другим фильтровальным материалом, обеспечивающим 100%-ную степень улавливания. Герметичность между дисками достигается сжатием фторопластовых прокладок 5 при помощи накидной гайки 7 и установочных болтов 8.

Пылегазовый поток поступает в импактор через входной патрубок, в который ввинчивается сменный пылезаборный накопчик, позволяющий производить изокINETический отбор пробы при различных скоростях газового потока с сохранением выбранного при калибровке расхода газа через прибор. Очищенный от пыли газ отводится через отсосную трубку, имеющую поворот и служащую также для удержания импактора в газоходе.

Смазка для удержания частиц на поверхности выемок 4 представляет собой смесь твердой и жидкой фаз. Твердая фаза придает смазке густоту; благодаря этому она не разбрызгивается под действием газовой струи, скорость которой достигает 100 м/с на выходе из последнего сопла. Жидкая фаза, диффундируя из слоя смазки в нарастающий слой пыли, смачивает оседающие частицы и таким образом удерживает их. Так как скорость диффузии должна быть выше скорости нарастания слоя, применимость прибора ограничивается концентрацией пыли в газах примерно  $1-7 \text{ г/м}^3$  в зависимости от плотности пыли.

При температуре газов до  $60^\circ\text{C}$  рекомендуется следующий состав смазки (в частях по массе):

Вазелиновое масло	2
Технический углерод газовый	1

при температуре газов от  $60$  до  $100^\circ\text{C}$ :

Масло МС-20	1
Корунд М-14	3,5

Вазелиновое масло предварительно выдерживают в сушильном шкафу при  $70-80^\circ\text{C}$  в течение  $1-1,5$  ч. После этого масло смешивают с твердой фазой и тщательно растирают до получения однородной массы. Смазка готова к употреблению через  $3-4$  ч после смешивания.

Качество смазки проверяют, продувая через импактор чистый воздух. Если на выходе последней ступени смазка не разбрызгивается при расходе  $15 \pm 20$  л/мин, то консистенцию ее можно считать нормальной, а смазку готовой к употреблению.

При отборе проб пыли из газового потока с температурой выше  $150^\circ\text{C}$  вместо смазки в выемки укладывают фильтровальную термостойкую ткань — оксалон и др.

Подготовка и проведение анализа. Заполняют фильтр набивкой из стекловолокна. Плотность набивки должна быть такой, чтобы при протягивании через прибор газа с расходом  $10$  л/мин сопротивление было  $6,5-8$  кПа ( $50-60$  мм рт. ст.). Заполняют выемки смазкой и взвешивают фильтр и диски на аналитических весах с точностью до  $0,0001$  г. Взвешенные диски собирают в порядке, указанном маркировкой на обратной стороне диска. Сборка производится в вертикальном положении. Собранный пакет вместе с фильтром устанавливают в гнездо отсосной трубки. На собранный пакет устанавливают входной патрубок и надевают цилиндрический корпус /. Затем заворачивают накидную гайку 7 и установочными болтами 8 поджимают диски.

Проверяют прибор на герметичность. Для этого его подсоединяют резиновым шлангом к побудителю тяги через расходомер. Включают побудитель тяги, устанавливают расход газа через импактор  $10$  л/мин и зажимают входное отверстие патрубка. При герметичном импакторе показание расходомера должно быть на нуле. Если расходомер будет показывать подсос, нужно сменить прокладки и вновь проверить герметичность.

При определении дисперсного состава пыли в промышленных установках для введения импактора внутрь воздуховода можно использовать штуцера, через которые производится замер запыленности. Отбор пробы пыли импактором из потока должен производиться с соблюдением условия изокINETичности. Поэтому при подготовке к анализу измеряют скорость газа в точке отбора пробы, как описано в п. 1.2. Исходя из полученного результата и расхода газа через импактор  $10$  л/мин, по номограмме (рис. 30) подбирают диаметр пылезаборного наконечника.

Подобранный наконечник навинчивают на входной патрубок импактора и собирают установку по схеме, представленной на

рис. 7, б. По формуле (4) рассчитывают показания  $Q_p$  шкалы расходомера из условия, что расход газа через импактор во время анализа должен быть 10 л/мин.

Вводят импактор в газодод так, чтобы пылезабортный наконечник был направлен по ходу газа. Закрепляют его в штуцере с помощью резиновой пробки или накидной гайки, надетой на отсосную трубку. Прогревают прибор 15 мин. Устанавливают по реометру расход газа  $Q_p$  и быстро поворачивают импактор на  $180^\circ$ , чтобы устье наконечника было направлено навстречу потоку. Продолжительность отбора пробы зависит от запыленности газового потока. В течение одного опыта рекомендуется отбирать импактором 80—120 мг пыли.

По окончании опыта импактор поворачивают на  $180^\circ$ , вынимают из газодода, располагают его пылезабортным наконечником вверх (во избежание ссыпания пыли) и затем выключают побудитель тяги. Вертикальное положение импактора сохраняется до взвешивания дисков и фильтра. Ослабляют установочные болты  $\delta$  (рис. 31), свинчивают накидную гайку  $\delta$  и придерживая рукой фильтр, снимают отсосную трубку. Корпус импактора с находящимися в нем фильтром и дисками устанавливают в жестяную коробку и транспортируют в лабораторию, где взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0001 г фильтр и диски с осажженной на них пылью. Результаты взвешиваний заносят в протокол, форма которого приведена в табл. 12.

По результатам взвешиваний ступеней и фильтра до и после опыта вычисляют массу пыли, осевшей на каждой ступени и на фильтре. Принимая за 100% суммарную массу осадка на всех ступенях и фильтре, рассчитывают кривую накопления осадка по ступеням. Полученная величина для каждой ступени указывает процентное содержание частиц диаметром более  $\delta_0$  данной ступени. Для импактора модели IX значения  $\delta_0$  следующие:

Номер каскада	12	3	4	5	6	7	
$\delta_{50}$ , мкм	8	5,8	3,6	3,25	2,6	1,3	0,9

Значения  $\delta_{50}$  приведены для плотности материала частиц  $\rho_p = 1$  г/см<sup>3</sup>, расхода газа, просасываемого через импактор,  $Q = 10$  л/мин и температуры воздуха  $20^\circ\text{C}$ , т. е. динамической вязкости  $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$  Па·с. При иных значениях этих величин  $R^*$ ,  $Q^*$ ,  $I^*$  диаметр частиц  $\delta_{50}$  вычисляется по формуле

$$\delta_{50} = \delta_{50} \sqrt{\frac{10}{Q^*} \frac{x}{\rho_p^*} \frac{\eta^*}{1,82 \cdot 10^{-5}}} \quad (21)$$

За окончательный результат принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений. Расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 5% в области грубых фракций и 3% в области мелких (< 2 мкм) фракций. В противном случае определения повторяют.

**Пример обработки результатов.** Условия проведения анализа: вид пыли — угольная; место отбора пробы — воздуховод аспирационной установки тракта топливоподдачи ГРЭС; плотность материала частиц пыли 1,5 г/см<sup>3</sup>; температура воздуха  $40^\circ\text{C}$  (вязкость  $1,92 \cdot 10^{-5}$  Па·с); расход газа через импактор 10 л/мин.

Результаты взвешивания ступеней импактора и соответствующие значения  $\delta_{50}$  для каждой ступени приведены в табл. 12.

Таблица 12. Протокол анализа угольной пыли импактором НИИОГАЗ

Номер ступени	Масса ступени, г		Привес пыли Q			$\delta_{50}$
	с пылью	чистой	на каждой ступени, г	суммарный		
				г	%	
1	30,2101	30,1832	0,0269	0,0269	24,0	8
2	28,7301	28,7164	0,0137	0,0406	36,2	5,8
3	29,1393	29,1203	0,0190	0,0596	53,1	3,6
4	27,8780	27,8715	0,0065	0,0661	59,0	3,25
5	28,6514	28,6413	0,0101	0,0762	68,0	2,6
6	27,9744	27,9522	0,0222	0,0984	87,5	1,3
7	29,6460	29,6385	0,0075	0,1059	94,5	0,9
Фильтр	20,6573	20,6511	0,0062	0,1121	100	

Истинное значение диаметра частиц  $\delta_{50}$  вычисляют по формуле (21):

$$\delta_{50} = 0,84 \cdot \frac{x}{\sqrt{V}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,92 \cdot 10^{-5}}} = 0,84$$

$$\delta_{50} = 0,84 \cdot 8 = 6,7 \text{ мкм}$$

$$\delta_{50} = 0,84 \cdot 5,8 = 4,9 \text{ мкм и т. д.}$$

Результаты расчетов сводим в табл. 13.

Таблица 13. Результаты анализа дисперсного состава угольной пыли

Размер частиц $\delta_{50}$ , мкм	Содержание частиц, %		Размер частиц $\delta_{50}$ , мкм	Содержание частиц, %	
	крупнее $V$	мельче $\delta_{50}$ , т. е. O		крупнее $R$	мельче $\delta_{50}$ , т. е. D
6,7	24,0	76,0	2,18	68,0	32,0
4,9	36,2	63,8	1,10	87,8	12,2
3,0	53,1	46,9	0,75	94,5	5,5
2,76	59,0	41,0			

Анализ уловленной пыли в лабораторных условиях при помощи импактора проводят на той же установке, что и анализ ротационным анализатором РАД-1 (рис. 29). В этом случае отсосная трубка 7 (рис. 31) берется прямая, и прибор вводится в трубу / (рис. 29) через штуцер 4, укрепляется с помощью накидной гайки так, чтобы устье заборного наконечника было расположено по оси штуцера 2 трубы /.

Последовательность подготовки, проведения анализа и обработки результатов та же самая, что и при работе с импактором в промышленных условиях.

#### Глава 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЫЛИ

#### 4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Удельной поверхностью пыли  $S$  называется отношение поверхности всех частиц к их массе или объему. По значению величины  $S$  можно сравнивать степень дисперсности одного и того же вида пыли или порошкообразного материала.

Применяемые на практике методы определения удельной поверхности пыли значительно проще, удобнее и менее трудоемки, чем методы анализа дисперсного состава. Поэтому для предварительного выяснения сравнительной степени дисперсности уловленной пыли часто прибегают к определению ее удельной поверхности.

Величина удельной поверхности порошкообразных материалов имеет большое значение для контроля за правильным ведением многих технологических процессов. От удельной поверхности цемента зависит прочность бетона. Энергия, затрачиваемая на измельчение материалов, расход смачивающих жидкостей или флотационных добавок при обогащении, горение пылевидного топлива — во всех этих процессах и ряде других основные технологические свойства порошкообразного материала зависят от поверхности его частиц. В таких случаях основным показателем степени измельчения материала должна являться его удельная поверхность.

Величину удельной поверхности легко пересчитать на условный (средний по объему) диаметр частиц пыли. Предположим, что все частицы имеют одинаковый диаметр  $b_p$  и число их равно  $n$ . Тогда отношение их поверхности  $n \cdot 4\pi b_p^2$  к объему  $n \cdot \frac{4}{3}\pi b_p^3$  будет равно их удельной поверхности  $S$ , выраженной в  $\text{см}^2/\text{см}^3$ , а при плотности материала частиц  $\rho_T = 1 \text{ г}/\text{см}^3$  — в  $\text{см}^2/\text{г}$ :

$$S = n \cdot 4\pi b_p^2 \cdot \frac{3}{4\pi b_p^3} = 3/b_p$$

или

$$b_{cp} = 60\,000/S\rho_T \text{ мкм}$$

В основу методов определения удельной поверхности может быть положена ее зависимость от воздухопроницаемости слоя порошка при протекании через него воздуха при давлении близком к атмосферному или сильно разреженного воздуха при вы-

соком вакууме; от адсорбции мономолекулярного слоя газа на поверхности частиц порошка и от дисперсного состава порошка, найденного путем его дисперсионного анализа [30, 69].

#### 4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ СЛОЯ ПРИ ДАВЛЕНИИ БЛИЗКОМ К АТМОСФЕРНОМУ

##### Основные положения

Течение воздуха через слой порошкообразного материала предполагается подобным его движению через пучок извилистых капилляров. Площадь поверхности капилляров в единице объема слоя равна удельной поверхности порошка. При этом имеется в виду поверхность частиц, зависящая от основных их геометрических форм, без учета поверхности открытых наружу мелких трещин и тупиковых пор.

Суммарное поперечное сечение капилляров зависит от пористости  $e$ , т. е. от доли незанятого частицами порошка объема в единице толщины слоя. Длину капилляров  $l_0$  в слое полагают в  $d/2$  раз больше его толщины  $l$ . При этом полагают, что скорость течения воздуха в капиллярах  $u$  находится в следующем соотношении с его скоростью  $v$ , отнесенной к площади всего сечения слоя порошка:

Связь между перепадом давления  $\Delta P$  в слое, скоростью течения воздуха  $v$  и параметрами, характеризующими слой порошкообразного материала, выражается формулой Коцени — Кармана:

$$\Delta P/l = K/C(1-e)^2 e^{-3} \text{TiS}^2 \quad (22)$$

где  $K$  — постоянная Коцени — Кармана, равная 5;  $e$  — динамическая вязкость воздуха, Па·с.

В измерительной технике применяются два варианта прибора, основанных на методе воздухопроницаемости. В одном из них расход воздуха, протекающего через кювету с исследуемым порошком, непостоянен, а в другом стационарен. К первому варианту относится широко применяемый в Советском Союзе прибор ПСХ-2 [69], а из зарубежных — прибор Ли и Нёрса [30]. Ко второму варианту относятся также широко используемый в отечественной практике прибор Товарова [65] и приборы Блейна и Фридриха [30].

Прибор ПСХ-2 рекомендуется применять до значений удельной поверхности  $5000 \text{ см}^2/\text{г}$ , так как при превышении этого значения результаты получаются несколько заниженными по сравнению с данными, полученными на приборе Товарова.

Следует также отметить, что уравнение (22) выведено для случая вязкостного течения. При движении воздуха через слой

порошка высокой степени дисперсности ( $>5000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) появляется эффект скольжения газа в порах слоя. Поэтому при обработке результатов, получаемых на приборе Товарова, использованы формулы, предложенные Луневым [37], в которых учтены структура слоя и физические свойства потока.

### Определение удельной поверхности прибором ПСХ-2

**Устройство прибора.** Прибор (рис. 32) состоит из трех основных частей: кюветы /, однотрубчатого манометра (трубка 6, резервуар 7 и колбочка 10) и резиновой груши 8 с краном 9.

Манометр и груша с краном присоединены резиновыми трубками к стеклянному коллектору 4 и смонтированы на вертикальной панели, где укреплен также термометр 5. Внутреннее пространство кюветы под слоем порошка при помощи штуцера 2 и резинового шланга 3 соединено с общим коллектором 4.

**Подготовка и проведение определения.** Перед началом анализа пробу порошка высушивают (до постоянной массы) в сушильном шкафу при  $105-110^\circ\text{C}$ . (Известь-кипелку и цемент высушивать не следует.) После охлаждения в эксикаторе пробу взвешивают с точностью до 0,01 г. Массу пробы  $G$  (в г) выбирают в зависимости от плотности материала  $\rho_r$  (в  $\text{г}/\text{см}^3$ ):

$$G = 3,33\rho_r$$

Вырезают два кружка из фильтровальной бумаги по внутреннему диаметру кюветы. На положенный в кювету кружок бумаги высыпают навеску пыли, разравнивают ее легким постукиванием кюветы и на образовавшийся слой укладывают второй кружок бумаги и уплотняют его плунжером путем нажатия на него рукой.

С помощью конуса на планке плунжера и шкалы на внешней поверхности кюветы измеряют высоту слоя порошка  $L$  и удаляют плунжер из кюветы.

При помощи груши (или, при ее отсутствии, ртом) создают разрежение под слоем порошка, так, чтобы жидкость в манометре поднялась до уровня колбочки 10. Затем кран закрывают и секундомером измеряют время  $t$ , в течение которого мениск жидкости опустится от риски / до // или

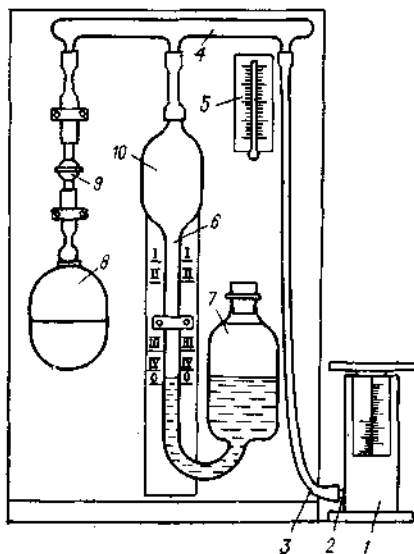


РИС. 32. Прибор ПСХ-2.

от /// до IV, Температура воздуха измеряется термометром 5.

Искомое значение удельной поверхности  $S$  (в  $\text{см}^2/\text{г}$ ) вычисляется по формуле

$$S = KM\sqrt{t}/G$$

где  $K$  — постоянная прибора для той пары рисков, между которыми измерялось время  $t$  падения столба жидкости;  $G$  — масса навески, г;  $M$  — величина, зависящая от температуры воздуха, высоты слоя и площади сечения цилиндра кюветы (находится из таблицы, прилагаемой к прибору).

Для проверки постоянной прибора  $K$  применяется порошок с известной величиной удельной поверхности. С этим порошком проводят такой же опыт, как и при определении удельной поверхности. Значения  $G$ , % определяют из опыта,  $M$  находят из таблицы, приложенной к прибору, и, подставляя их вместе с известной величиной  $S$  в формулу (23), вычисляют значения константы:

$$K = SGIM\sqrt{t} \quad (23)$$

При проверке исправности прибора наблюдают за тем, чтобы уровень жидкости в манометре при пустой и открытой кювете приходился против нижней риски 0—0.

Для проверки герметичности прибора кювету сверху плотно закрывают резиновой пробкой. Затем создают в приборе разрежение и наблюдают положение уровня жидкости в манометре. При герметичном приборе уровень жидкости не опускается.

В кювету с двумя слоями фильтровальной бумаги опускают плунжер и проверяют совпадение нулевых делений нониуса и шкалы. Если нулевые деления не совпадают, определяют поправку, которую надо вносить при измерении высоты слоя порошка.

**Пример.** Условия проведения опыта: материал — пылевидный кварц КП-3; плотность материала частиц  $\rho_r = 2,65 \text{ г}/\text{см}^3$ ; навеска  $G = 3,33 \cdot 2,65 = 8,83 \text{ г}$ ; температура воздуха  $21^\circ\text{C}$ ; постоянная прибора для рисков ///—/V  $K = 9,4$ ; высота слоя 1,25 см; значение  $M = 425$  (из таблицы); время опускания столба от риски /// до IV  $t = 42 \text{ с}$ .

Удельная поверхность  $S$  равна

$$S = 9,4 \cdot 425 \sqrt{42}/8,83 = 2960 \text{ см}^2/\text{г}$$

Условный средний диаметр шарообразной частицы

$$d_p = \frac{60000}{2960 \cdot 2,65} = 8 \text{ мкм}$$

### Определение удельной поверхности прибором Товарова

В отечественной лабораторной практике распространен также прибор Товарова (рис. 33).

**Устройство прибора.** Постоянство расхода воздуха просасываемого через испытуемый слой порошка поддерживается при помощи склянки Мариотта /, из которой вода через наконечник

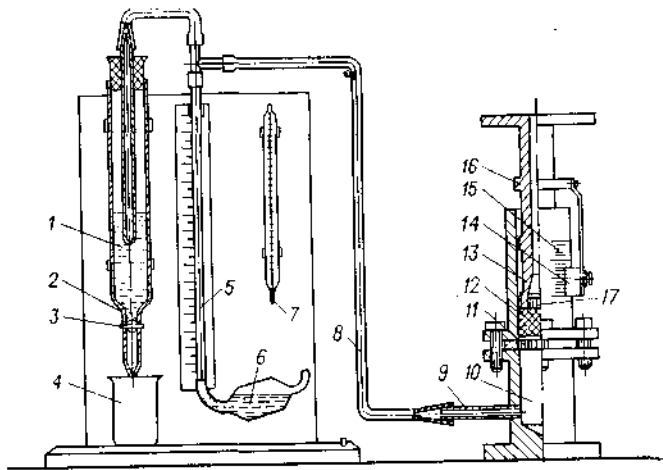


РИС. 33. Прибор Товарова.

2 с краном 3 сливается в стаканчик 4. Перепад давления в слое измеряется при помощи одноколейного манометра 5 с резервуаром 6. При стационарном режиме течения воздуха через слой порошка уровень жидкости в трубке манометра должен оставаться постоянным. Скланка Мариотта соединена резиновым шлангом 8 со штуцером 9 нижней камеры 10 кюветы. Температура воздуха измеряется термометром 7.

Кювета представляет собой металлическую гильзу с поперечным сечением  $5 \text{ см}^2$ , разделенную опорной решеткой 11 на нижнюю 10 и верхнюю камеры. Над решеткой располагается слой испытуемого порошка 12, который уплотняется плунжером 13, имеющим в нижней части впрессованный диск 17, а в верхней — фланец 16. Высота слоя контролируется и измеряется по шкале 15 на поверхности гильзы при помощи нониуса 14, укрепленного на штоке.

Объем анализируемой пробы, засыпаемой в кювету, подбирается с таким расчетом, чтобы фланец 16 при нажатии на плунжер 13 доходил или почти доходил до края корпуса кюветы.

**Подготовка и проведение определения.** Собирают установку по схеме, указанной на рис. 33, и заполняют сосуд Мариотта водой через воронку. Проверяют герметичность гильзы и соединений, плотно закрывают сверху резиновыми пробками гильзу и свободный конец манометра. Если гильза и все соединения вполне герметичны, то из сосуда Мариотта вначале вытечет небольшой объем воды, равный объему воздуха в системе. Затем наблюдают, чтобы в течение 5—10 мин не вытекало ни капли воды. В противном случае следует отыскать место прососа воздуха и добиться полной герметичности.

Вырезают из фильтровальной бумаги кружки диаметром 25 мм. Один кружок кладут в гильзу на перфорированный диск. Вычисляют величину навески пыли (в г) по формуле

$$O = \frac{V}{p_t} \Pi (1 - e)$$

Здесь  $p_t$  — плотность материала частиц пыли,  $\text{г/см}^3$ ;  $V$  — объем слоя пыли в гильзе,  $\text{см}^3$ ;  $e$  — пористость в долях единицы (принимается от 0,48 до 0,52).

Пробу пыли, подготовленную, как указано в п. 14, высушивают при  $105 \pm 5^\circ \text{C}$ , растирают комочки. Из сухой пробы берут навеску с точностью до 0,01 г, помещают в гильзу, покрывают вторым кружком фильтровальной бумаги и закрывают гильзу плунжером [53].

Затем ставят гильзу под пресс и спрессовывают слой до высоты 1,5—1,8 см при давлении 3—4 МПа ( $30\text{—}40 \text{ кгс/см}^2$ ).

Высоту спрессованного слоя пыли измеряют с помощью нониуса на планке плунжера и шкалы на поверхности гильзы с точностью до 0,1 мм.

Затем присоединяют гильзу шлангом к измерительной части установки. Открывают кран и первые 10—15 мл воды, вытекшей из сосуда, отбрасывают. Подставляют под сосуд мерный цилиндр и одновременно включают секундомер.

Записывают атмосферное давление  $B$  по показанию барометра и разрежение под слоем пыли  $\Delta P$  по показанию водяного манометра. Через 5—10 мин кран перекрывают и выключают секундомер.

Записывают объем вытекшей воды  $V_B$  и время фильтрации воздуха  $t$ . Если вода вытекает быстро, то замечают время вытекания 100 мл воды.

Величину удельной поверхности  $S$  (в  $\text{см}^2/\text{г}$ ) по данным опыта вычисляют в зависимости от величины безразмерного коэффициента проницаемости  $\Pi$  по следующим формулам: для  $\Pi = 0,1 \text{—} 3$

$$S = \sqrt{K^{-1} \Pi^{-0,83}} 12 \cdot 10V / (1 - e) p_t$$

для  $\Pi = 3\text{—}100$

$$S = \sqrt{K^{-1} \Pi^{-0,26}} 8,73 \cdot 10^4 e^2 / (1 - e) p_t$$

для  $\Pi > 100$

$$S = \sqrt{V \#^{-1}} 4,7 \cdot 10^4 e^2 / (1 - 8) p_t$$

Здесь

$$\Pi = 6,585 / C / e$$

$L^*$  — коэффициент фильтрации газа, определяемый по формуле

$$K = P_1 V_B L / \Delta P F \tau$$

$e$  — пористость, определяемая по формуле

$$e = 1 - G / p_t V$$

$G$  — навеска пыли, г;  $p_t$  — плотность материала частиц пыли,  $\text{г/см}^3$ ;  $V = FL$  — объем, занимаемый пылью в гильзе после спрессования,  $\text{см}^3$ ;  $F$  — площадь поперечного сечения гильзы,  $\text{см}^2$ ;  $L$  — высота слоя пыли в гильзе

после прессования, см;  $P_i$  — давление в середине слоя порошка, мм рт. ст., причем  $P_i = B - AP/2$ ;  $B$  — атмосферное давление, мм рт. ст.;  $AP$  — перепад давления на манометре, мм рт. ст.;  $t$  — время, за которое вытекло замеренное количество воды, с;  $V_B$  — объем вытекшей воды, см<sup>3</sup>.

За окончательный результат анализа принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений, выполненных из разных навесок.

Допустимые расхождения между результатами параллельных определений для  $S < 5000$  см<sup>2</sup>/г не должны превышать 5%, для  $S > 5000$  см<sup>2</sup>/г 4%.

## Глава 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЛИПАЕМОСТИ И СЫПУЧЕСТИ ПЫЛИ

#### 5.1. СЛИПАЕМОСТЬ ПЫЛИ

##### Основные положения

Причиной неудовлетворительной работы пылеуловителей сухого типа во многих случаях является образование трудно удаляемых отложений пыли на внутренних поверхностях пылеспускных отверстий и течек.

Склонность частиц пыли образовывать конгломераты, налипать на стенки аппаратов обусловлена аутогезионным и адгезионным взаимодействием. Аутогезией называется взаимодействие пылевых частиц между собой, адгезией — взаимодействие частиц с поверхностями. Аутогезия, которую применительно к пылевидным материалам называют слипаемостью, вызвана силами электрического, молекулярного и капиллярного происхождения. Она зависит от природы частиц и от параметров среды, в которой они находятся. Адгезионные взаимодействия проявляются между поверхностью аппарата и монослоем частиц, контактирующих с ней. Сила адгезионного взаимодействия зависит как от природы пыли, параметров среды ее существования, так и в значительной степени от состояния поверхности.

В пылеуловителях явления адгезии наблюдаются в начальной стадии запыления, когда частицы осаждаются на чистую поверхность. В дальнейшем, после образования монослоя частиц, удержание вновь поступающей пыли обуславливается силами аутогезии. На поверхности, не подвергшейся специальной обработке, монослой частиц удерживается очень прочно и не удаляется обычными средствами регенерации осадительных поверхностей [24]. Сила адгезии частиц к стальной поверхности на один—два порядка больше сил аутогезионного взаимодействия частиц [23]. На практике усилению адгезионных связей в

аппаратах способствуют шероховатость стенок, а также обогащение монослоя тонкодисперсными фракциями, содержащими прочно прилипающие к поверхности частицы. Обогащение происходит в результате того, что крупные частицы более подвержены срыву потоком и сыпаются при вибрации. На место сыпавшихся частиц поступают новые, среди которых будут также более мелкие, лучше удерживающиеся частицы. В результате такого замещения на поверхности образуется прочно удерживаемый монослой частиц с адгезионной способностью, превосходящей адгезионную способность пылевых частиц, находящихся в потоке. Поэтому процессы образования отложения пыли внутри аппаратов и проблемы их удаления определяются аутогезией.

В качестве основного показателя, характеризующего аутогезию сыпучих материалов, принимается прочность пылевого слоя на разрыв [3]. Количественно она равна силе, отнесенной к площади контакта, необходимой для разрыва слоя.

По величине разрывной прочности пылевого слоя предложено классифицировать пылевидные материалы на следующие четыре группы:

	Разрывная прочность, Па		Разрывная прочность, Па
Неслипающиеся	<60	Средне слипающиеся	300-600
Слабо слипающиеся	60-300	Сильно слипающиеся	>600

В зависимости от того, к какой группе относится улавливаемая пыль, решается вопрос о выборе пылеулавливающего аппарата. Так, слипаемость пыли определяет выбор типа направляющего элемента батарейных циклонов и необходимость оснащения бункеров специальными ворошителями или вибраторами [4, 70]. Рекомендации по проектированию и эксплуатации циклонов устанавливают максимальную концентрацию пыли третьей группы вдвое меньше, а для пыли четвертой группы вчетверо меньше, чем в случае улавливания слабо слипающейся пыли, относящейся ко второй группе.

Все методики оценки прочности слоя порошкообразного материала на разрыв состоят из формирования образца и последующего приложения к нему растягивающего усилия, величина которого постепенно возрастает до момента разрушения образца.

Прямое определение прочности пылевого слоя, сформированного непосредственно в действующем аппарате, представляет значительные трудности. В настоящее время нет надежно работающего устройства для определения разрывной прочности слоя пыли в промышленном аппарате. Фильтрационный метод требует доработки [3]. Поэтому для оценки прочности слоя используют косвенные методы, из которых наиболее удачным оказался метод воздушной эрозии. Сущность этого метода заключается в том, что на сформировавшийся в аппарате слой пыли направляют поток воздуха из тонкой трубки. Постепенно

увеличивая расход воздуха, а следовательно и его скорость, определяют критическую скорость потока, при которой начинается интенсивный унос частиц с поверхности слоя и образование в этом слое эрозионной лунки. От величины критической скорости к величине разрывной прочности слоя пыли переходят с помощью калибровочного графика. Для построения такого графика в лабораторных условиях проводят опыт по определению критической скорости эрозии для слоя пыли, сформированного насыпкой и механическим уплотнением. Значение разрывной прочности этого слоя определяют методом разъемного цилиндра (см. ниже).

В лабораторных условиях образцы обычно формируют, насыпая исследуемый порошок в ячейку и уплотняя его. Поскольку при лабораторных испытаниях не выдерживаются условия идентичности окружающей среды и формирования пылевого слоя, полученные таким путем характеристики слипаемости пылей относительны и могут существенно отличаться от фактической разрывной прочности пылевых слоев в действующих аппаратах. Они применимы только для сопоставительных оценок.

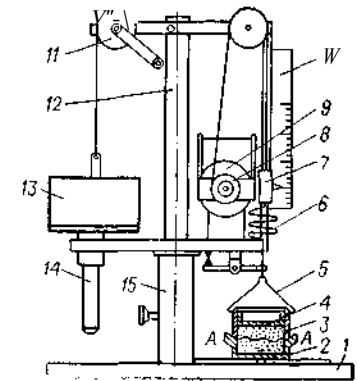
Разрывная прочность пылевого слоя пригодна в качестве сравнительной характеристики при условии единообразия формирования разрушаемого пылевого слоя. Предложено при формировании слоя для лабораторных исследований считать стандартной уплотняющую нагрузку, равную 50 кПа [3]. При меньших нагрузках на прочность слоя сильно влияет степень агрегированности частиц, а более высокие не характерны для пылеулавливания. Уплотняющая нагрузка и разрывающее усилие должны прикладываться нормально к сечению разрыва.

#### Определение разрывной прочности слоя пыли методом разъемного цилиндра

Для измерения разрывной прочности пылевого слоя в лабораторных условиях наибольшее распространение в СССР получил метод разъемного цилиндра с использованием прибора, разработанного в НИИОГАЗ [3].

**Устройство прибора НИИОГАЗ.** Ячейка прибора (рис. 34) состоит из стакана 2, укрепленного на основании 1, и сторцованного с ним цилиндра 3. Соосность стакана и цилиндра обеспечивается четырьмя центрирующими выступами на стакане. Внутри стакана и цилиндра засыпают исследуемую пыль, уплотняют ее с помощью плунжера 4 под воздействием груза 13, помещаемого на площадке уплотняющего штока 14. Уплотняющее и измерительное устройство смонтированы на вращающейся опоре, состоящей из втулки 15 и вала 12. Вал может поворачиваться на 90° (на схеме для наглядности этот угол увеличен до 180°). В правом крайнем положении вала по оси цилиндра располагается уплотняющий шток 14 с грузом. Подъем

РИС. 34. Прибор для определения разрывной прочности пылевого слоя методом разъемного цилиндра.



и опускание штока осуществляется поворотом ручки блока // . В левом крайнем положении вала место над цилиндром занимает устройство, служащее для приложения к слою пыли разрывающего усилия и измерения его величины. Усилие создается растягиванием калиброванной пружины 6, один конец которой прикреплен к ползуну 7, а второй зацепляется за дужку 5 на цилиндре 3. Пружина растягивается нитью, наматываемой на барабан 8 с помощью электродвигателя 9 (тип ДСД-2П) со скоростью 1 мм/с. Величину разрывающего усилия измеряют по шкале 10. Пружины прибора изготовлены из балалаечных струн.

Калибровку пружины выполняют следующим образом. Один конец ее загибают крючком, другой закрепляют в ползуне прибора (рис. 34). Ползун поднимают в верхнее крайнее положение и отмечают по шкале 10 положение крючка. К аналитическим гилям массой 5, 10 и 20 г привязывают тонкие нити и поочередно подвешивают гири на крючок. Под весом гири пружина растягивается, и это положение крючка отмечают по шкале. По полученным данным, делением массы гири в граммах на величину растяжения пружины в миллиметрах, определяют усилие  $P_r$ , растягивающее пружину на 1 мм. Калибровочную характеристику пружины  $P_{nr}$  в г/мм находят как среднее арифметическое значений  $P_m$  для растягивающих усилий под воздействием гирь 5, 10 и 20 г.

В Семибратовском филиале НИИОГАЗ используется прибор несколько модернизированной конструкции. Отрыв верхней части цилиндра производится с помощью соленоида. Величина усилия отрыва определяется по значению силы тока, питающего катушку соленоида. Сила тока измеряется с помощью микроамперметра, шкала которого отградуирована в граммах.

Прибор конструкции НИИОГАЗ позволяет измерять прочность слоя порошка в интервале 20 4-4000 Па [24]. Область применения прибора не распространяется на материалы, частицы которых обладают высокой упругостью, так как после снятия уплотняющей нагрузки части цилиндра могут раздвигаться. Не рекомендуется использовать этот прибор для определения прочности слоя грубодисперсных и рыхлых материалов. Для таких материалов применяется метод диска, покрытого липкой смазкой — вазелином, олифой. Диск приводится в соприкосновение со слоем порошка и затем отрывается вместе с прилипшей частью слоя [4, 24]. Для измерения внешнего усилия могут быть использованы торсионные весы, к коромыслу которых подвешивают диск. Прибор позволяет измерять прочность слоя от 1 Па.

**Подготовка и проведение определения.** В исследуемой пробе, подготовленной, как указано в п. 1.4, растирают комочки и совком засыпают пыль в цилиндр прибора (рис. 34), слегка



уплотняя ее совком; при этом следует избегать смещения верхней части цилиндра. Пыль насыпают до верхней кромки цилиндра. Затем на нее помещают плунжер, устанавливают над цилиндром уплотняющее устройство и поворотом ручки блока // опускают шток с грузом на плунжер. Время приложения усилия 15 с. Шток поднимают и поворотом вала 12 устанавливают над цилиндром измерительное устройство. Опускают ползун 7 в крайнее нижнее положение, зацепляют крючком пружины дужку цилиндра и включают электродвигатель. Постепенно нарастающее усилие, достигнув некоторой величины  $P_p$ , разрывает образец по сечению  $A-A$ , месту стыка цилиндра и стакана. Отметив по шкале 10 величину усилия, возвращают ползун и цилиндр с пылью в исходное положение. Пружина будет растянута на некоторую величину под воздействием массы цилиндра с плунжером и пылью, удерживаемой силами адгезии и трения о его стенки. По шкале 10 отмечают балластное усилие, соответствующее этой массе  $PQ$ .

**Обработка результатов.** Разрывную прочность слоя пыли  $P$  (в  $г/см^2$ ) вычисляют по формуле

$$P = (P_v - P_e) / s$$

где  $s$  — площадь поперечного сечения цилиндра,  $см^2$ . Коэффициент для перевода граммов на квадратный сантиметр в паскали равен 98,1.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое 6—8 параллельных определений. Расхождение между параллельными определениями не должно превышать 10%.

## 5.2. СЫПУЧЕСТЬ ПЫЛИ

### Основные положения

Уловленная промышленная пыль относится к категории порошкообразных материалов, характерной особенностью которой является подвижность частиц относительно друг друга и способность перемещаться под действием внешней силы. Это свойство подвижности частиц пыли называют сыпучестью. Сыпучесть порошкообразных материалов и уловленной пыли зависит от размера частиц, их влажности и степени уплотнения. Она характеризуется косвенными показателями, среди которых наиболее распространенным является угол естественного откоса. Широкое использование этого показателя в технике (при определении наклона стенок бункеров, воронок, желобов, течек, а также вместимости транспортных средств и хранилищ для сыпучих материалов [46, 75]) объясняется простотой и наглядностью его измерения.

Углом естественного откоса называется угол между горизонтальной поверхностью и образующей конуса насыпанного на нее порошкообразного материала. Различают собственно

угол естественного откоса  $\alpha_d$  и угол обрушения  $\alpha_{ст}$ . Первая величина относится к случаю формирования откоса при падении частиц порошка на плоскость. Образование поверхности откоса отвечает состоянию динамического равновесия, поэтому  $\alpha_d$  называют также динамическим углом естественного откоса. Углом обрушения называют угол, образующийся при обрушении слоя в результате удаления подпорной стенки. Его называют также статическим углом естественного откоса  $\alpha_{ст}$ . Угол обрушения всегда больше динамического угла естественного откоса.

Угол естественного откоса связан с аутогезией, внутренним трением и плотностью упаковки частиц. Последняя зависит от высоты падения порошка при насыпке. Для того чтобы иметь одинаковую плотность упаковки частиц при проведении измерений углов откоса, измерительные устройства должны заполняться исследуемой пылью из бункеров, расположенных на одинаковой высоте (400 мм) от основания устройства. Экспериментально установлено, что засыпка с высоты 400 мм уже не сказывается на плотности упаковки и не влияет на результаты измерения.

### Определение статического угла естественного откоса

Статический угол естественного откоса используется в качестве одного из исходных параметров при проектировании бункеров сухих пылеуловителей, емкостей для хранения порошкообразных материалов и пылевывозных устройств [52].

Определение этого показателя заключается в измерении угла, под которым располагается боковая поверхность сыпучего материала в результате его обрушения после удаления подпорной стенки.

**Устройство для измерения угла обрушения** (рис. 35) состоит из сосуда 6 и камеры 4. Камера представляет собой параллелепипед (с основанием 70 X 40 и высотой 400 мм) с расположенным над ним бункером 3. Течка бункера перекрывается задвижкой 2. Камера укреплена на стойках 5 при помощи хомута И, стержней 12 и колец 13. Высота расположения камеры фиксируется зажимными болтами /.

**Подготовка и проведение определения.** Вращением регулировочных винтов 8 камеру устанавливают горизонтально по уровню 7, вмонтированному в основание 9 устройства. Измерительный стеклянный сосуд 6 устанавливают под камерой. Сместив камеру по вертикали, устанавливают ее на сосуд.

Подготовленную для анализа исследуемую пыль в количестве 70—100 г совком через щель 14 осторожно высыпают в камеру. Объем пыли, взятой для анализа, должен в 1,2—1,3 раза превышать объем измерительного сосуда. Засыпку ведут по всей длине бункера. После засыпки всей пыли задвижку на бункере закрывают и через 4—5 мин поднимают камеру вверх.

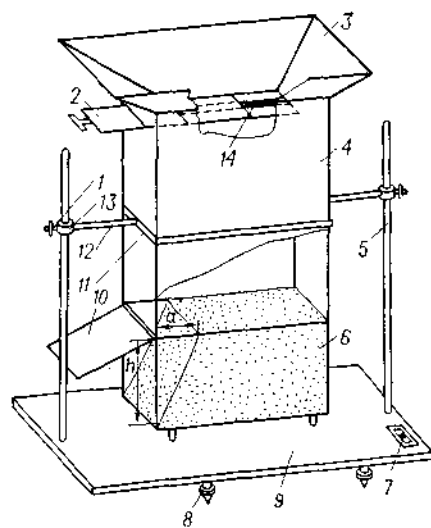


РИС. 35. Устройство для определения статического угла естественного откоса.

Лишнюю пыль в измерительном сосуде срезают линейкой вровень с кромками сосуда. После этого осторожно убирают съемную стенку 10. Часть порошка в виде треугольной призмы сползает, при этом образуется откос.

Измеряют с точностью до 0,5 мм величину освободившейся верхней кромки сосуда  $a$  и высоту откоса  $h$ . Если угол откоса четко выражен, то его величину можно измерить транспортиром.

По величинам  $a$  и  $h$  статический угол естественного откоса вычисляют с помощью формулы

$$\alpha_{ст} = \arctg (h/a)$$

За окончательный результат принимают среднее арифметическое шести параллельных определений. Расхождение между результатами отдельных измерений и их средней арифметической величиной не должно превышать 10%.

#### Определение динамического угла естественного откоса

Метод заключается в определении угла между основанием и образующей конуса, полученного насыпкой уловленной пыли (порошка) на горизонтальную плоскость.

В лабораторной практике применяются несколько способов, различающихся между собой приемами формирования конуса и измерения его угла. Наиболее часто используются два описанные ниже способа, которые дают сопоставимые результаты.

**Определение с помощью прибора Меринга — Баранова [7].** Устройство для определения динамического угла естественного откоса представляет собой прямой пространственный угол, образованный тремя плоскостями из деревянных досок (рис. 36). В ребре, образованном вертикальными стенками 4, имеется цилиндрический канал 3 диаметром 10 мм, ось которого совпадает с пересечением внутренних плоскостей стенок. В этот канал с помощью воронки 2 засыпается из бункера / анализируемая пыль. На боковые стенки 4 и дно 5 нанесены угломерные шкалы. Высота стенок 40—70 мм. В основание устройства вмонтированы уровень 7 и штатив для укрепления бункера.

Вращением регулировочных винтов 6 устанавливают устрой-

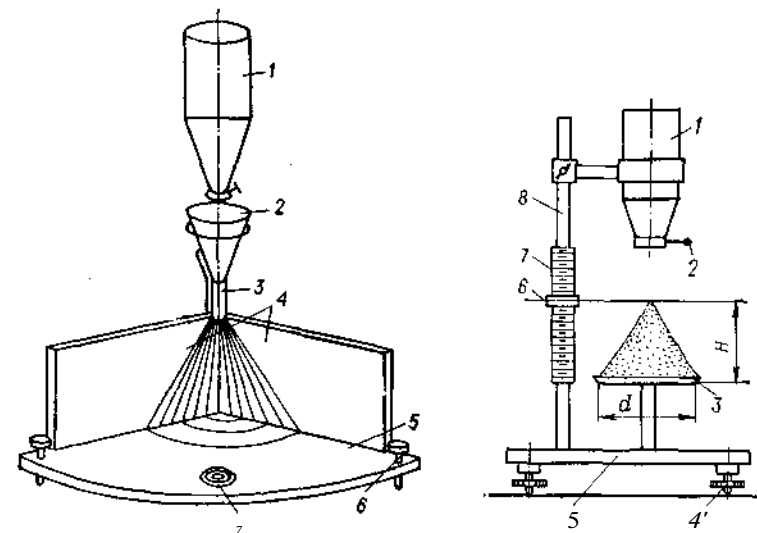


РИС. 36. Прибор Меринга — Баранова.

РИС. 37. Устройство для определения динамического угла естественного откоса.

ство горизонтально по уровню. Устанавливают воронку так, чтобы носик воронки был продолжением канала. Бункер располагают в 350 мм над воронкой. Выпускное отверстие бункера должно быть соосно с носиком воронки.

Пробу пыли (30—40 г), подготовленную к анализу, помещают в бункер. Приоткрывают задвижку бункера так, чтобы пыль тонкой струйкой высыпалась в воронку, а из нее в угол устройства до тех пор, пока вершина конуса не достигнет верхнего среза стенок.

Величину динамического угла естественного откоса определяют по угломерным шкалам с точностью до 2°. За окончательный результат принимают среднее арифметическое из шести определений.

**Определение методом насыпания порошка на диск.** Применяемое для этой цели устройство (рис. 37) состоит из бункера / с ирисовым затвором 2, закрепленного на штанге 8, которая жестко соединена под прямым углом с основанием 5. Основание устанавливается горизонтально при помощи установочных винтов 4. Над основанием параллельно его плоскости устанавливается диск 3. На штанге закреплена линейка 7 с передвижным указателем 6.

В исходном состоянии ирисовая диафрагма 2 в дне бункера / закрыта. Ползун указателя уровня 6 находится вверху штанги 5, а сам указатель сдвинут в сторону. Пробу пыли засыпают в бункер. Затем приоткрывают ирисовую диафрагму так, чтобы пыль начала высыпаться на середину диска. Засыпку

продолжают до заполнения диска и завершения формирования конуса, т. е. до стабилизации его высоты. Закрывают отверстие диафрагмы, опускают ползун указателя уровня и измеряют высоту конуса.

Исходя из диаметра диска  $d$  и высоты конуса  $Y$  вычисляют динамический угол естественного откоса;

$$\alpha_d = \arctg (2H/d)$$

За окончательный результат принимают среднее арифметическое шести определений.

## Глава В

### ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ И СМАЧИВАЕМОСТЬ ПЫЛИ

#### 6.1. ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЫЛИ

##### Общие сведения

Гигроскопичностью пыли называется ее способность поглощать влагу из окружающей воздушной среды.

Поглощение влаги оказывает влияние на свойства пыли. Так, изменяются электрическая проводимость слоя пыли, силы адгезионного и аутогезионного взаимодействия, сыпучесть и другие свойства, которые необходимо учитывать при проектировании пылеочистных устройств.

Если частицы пыли растворимы в воде, то во влажной газовой среде на их поверхности образуется насыщенный водный раствор вещества, из которого они состоят. Если парциальное давление паров воды над этим раствором меньше парциального давления паров воды в окружающей газе, пары воды из газа будут поглощаться веществом, обуславливая этим явление гигроскопичности [28, 46].

Для водонерастворимых веществ процесс поглощения влаги обусловлен вначале адсорбцией молекул воды поверхностью частиц, а затем постепенным дополнительным поглощением влаги под действием капиллярных сил и диффузии [25, 33]. В обоих случаях поглощение влаги продолжается до установления равенства парциальных давлений паров воды над пылью и в окружающей ее газе [33]. Каждой относительной влажности газа соответствует свое содержание влаги в сыпучем материале, называемое равновесной влажностью сыпучего материала. Равновесие между относительной влажностью воздуха и влажностью материала описывается характерными для каждого вещества изотермами сорбции.

Имея изотермы сорбции влаги промышленной пылью, можно предсказывать поведение улавливаемой пыли в технологических

аппаратах, бункерах, пылевыгрузных устройствах при различной относительной влажности газа-носителя.

Содержание влаги в материале характеризуется чаще всего или влагосодержанием, или влажностью. Влагосодержание — это отношение количества влаги в материале к количеству абсолютно сухого материала. Влажность — это отношение количества влаги в материале ко всему количеству материала (сыхому веществу вместе с влагой).

При определении и оценке содержания влаги в исследуемом порошкообразном материале необходимо учитывать разнообразные формы связи влаги с материалом, а также способность материала поглощать или отдавать влагу. Связи влаги с материалом подразделяются на химические, физико-химические и физико-механические.

При химических связях (ионных и молекулярных) молекулы воды не существуют самостоятельно, а входят в состав молекул самого вещества и химически с ними связаны. Эту влагу нельзя удалить сушкой, так как удаление ее связано с разрушением молекулы самого вещества.

К физико-химическим относится адсорбционная связь. Влага адсорбируется на поверхности сыпучего материала и может быть удалена испарением.

Наиболее слабая связь с материалом — физико-механическая — имеет место при непосредственном соприкосновении воды с материалом, когда влага заполняет поры и капилляры и механически удерживается в них. Такая свободная влага может перемещаться в порах материала в виде жидкости или пара.

Влага, которая удерживается на поверхности, в порах и капиллярах сыпучего материала и может быть удалена сушкой, называется гигроскопической.

Многие из промышленных пылей, улавливаемых газоочистным оборудованием, используются в народном хозяйстве (моющие порошки, удобрения, пыли биохимических производств, пищевой промышленности и т. д.). В этих продуктах содержание влаги регламентировано и контроль содержания гигроскопической влаги обязателен [ГОСТ 19219—73, ГОСТ 359411—77].

Существует несколько методов определения гигроскопической влаги [25, 38]. Наиболее распространен метод высушивания пробы [33].

#### Определение гигроскопической влаги пыли высушиванием

Гигроскопическая влага пыли может быть определена по количеству потерянной влаги при высушивании пробы пыли до постоянной массы в сушильном шкафу. Этот метод более всего распространен, но он не подходит для веществ, имеющих температуру разложения или плавления ниже 110 °С.

Определение гигроскопической влаги пыли желательно проводить в заводской лаборатории сразу же после отбора пробы. Для этого перед анализом необходимо иметь три высушенных и взвешенных с точностью до 0,0001 г бюкса.

Пыль (2—3 г) помещают в каждый бюкс и разравнивают по его дну. Высота слоя в бюксе не должна быть более 5 мм. Закрывают бюксы крышками и взвешивают их на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Затем помещают бюксы в предварительно нагретый до 70—80 °С сушильный шкаф. Снимают крышки с бюксов и закрывают дверцу шкафа. Постепенно поднимают температуру в шкафу до 105 °С. В течение всего времени высушивания температура в шкафу поддерживается 105 ± 2 °С. Через 2—3 ч бюксы помещают в эксикатор, заполненный силикагелем или хлоридом кальция, закрывают крышки и охлаждают. Охлажденные бюксы взвешивают с точностью до 0,0001 г и снова помещают в сушильный шкаф. Каждое повторное высушивание продолжают 30 мин, и повторяют их, пока масса бюксов с пылью не перестанет изменяться.

Содержание гигроскопической влаги в пробе пыли  $W_r$  (в %) вычисляют по формуле

$$W_r = [(G_1 - G_2)/(G_1 - G_0)] \cdot 100$$

Здесь  $G_0$  — масса чистого сухого бюкса, г;  $G_1$  — масса бюкса с влажной пылью, г;  $G_2$  — масса бюкса с сухой пылью, г.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое двух параллельных определений (выбираются два ближайших результата из трех). Допустимое расхождение  $\Delta W_r$  между результатами параллельных определений не должно превышать следующие значения:

$W_r$	$\Delta W_r$	$W_r$	$\Delta W_r$
< 1	0,1	5—10	0,6
1—2	0,2	> 10	0,8
2—5	0,4		

В противном случае определение повторяют.

#### Определение равновесной влажности пыли (изотерм сорбции)

Метод заключается в определении количества влаги, впитываемой сухой пылью при выдерживании ее до постоянной массы в атмосфере с известной относительной влажностью.

Для проведения анализа готовят растворы серной кислоты различной концентрации с таким расчетом, чтобы относительная влажность воздуха над ними различалась на 10—15% (см. табл. 14).

Концентрации приготовленных растворов серной кислоты определяют ориентировочно денсиметром и уточняют титрованием 1 н. раствором NaOH [2].

Таблица 14. Общее давление паров (в мм рт. ст.) и относительная влажность воздуха (в %) над водными растворами серной кислоты [64]

Концентрация $H_2SO_4$ (масс.)	Температура, °С					
	15		20		25	
	давление пара	относительная влажность	давление пара	относительная влажность	давление пара	относительная влажность
10	12,30	96,18	16,60	94,66	22,4	94,29
20	11,30	88,36	15,40	87,82	20,80	87,55
25	10,50	82,10	14,30	81,55	19,40	81,66
30	9,65	75,46	13,20	75,27	17,80	74,92
35	8,65	67,64	11,80	67,29	15,80	66,50
40	7,27	56,85	9,95	56,74	13,50	56,82
45	5,85	45,75	8,10	46,19	10,90	45,88
50	4,50	35,19	6,20	35,36	8,45	35,56
55	3,19	24,95	4,43	25,26	3,15	25,89
60	2,09	16,03	2,87	16,37	2,97	16,71
65	1,15	8,99	1,61	9,18	2,24	9,43
70	0,506	3,96	0,723	4,12	1,03	4,34
75	0,195	1,524	0,284	1,629	0,408	1,73
90	0,0032	0,025	0,005	0,0028	0,0076	0,032

Приготовленные растворы серной кислоты наливают в десять чистых и сухих эксикаторов. В одиннадцатый заливают концентрированную кислоту. Он применяется для охлаждения бюксов с сухой пылью. Уровень кислоты должен быть в 2—3 мм от решетки эксикатора. Эксикаторы закрывают крышками, смазанными вакуумной смазкой. Крышки должны иметь пришлифованные пробки с краном, позволяющим отсасывать воздух из эксикаторов. На каждом эксикаторе надписывают концентрацию кислоты, находящейся в нем. Каждые 10 дней концентрацию кислоты проверяют и вносят соответствующие изменения в надписи на эксикаторах.

В начале проведения анализа чистые, высушенные бюксы (три штуки на каждый эксикатор) взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Результаты взвешиваний  $G_0$  вносят в журнал, форма которого представлена в табл. 15. Помещают в бюксы исследуемую пыль и разравнивают по дну бюкса; высота слоя 2—3 мм. Открытые бюксы помещают в предварительно нагретый до 60—80 °С сушильный шкаф и сушат до постоянной массы при 105 ± 2 °С. Первое взвешивание производят через 2—3 ч, повторные — через 30 мин. Бюксы с высушенной пылью закрывают крышками, охлаждают в эксикаторе, заполненном концентрированной серной кислотой, и взвешивают с точностью до 0,0001 г. Результат взвешивания  $G_1$  также вносят в журнал.

После доведения бюксов с сухой пылью до постоянной массы, снимают крышки и помещают в подготовленные эксикаторы

Таблица 15. Журнал записи результатов определения равновесной влажности пыли при различной относительной влажности воздуха

Температура в помещении . . . °С.

Номер эксикатора	Номер бюкса	Концентрация H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %	Относительная влажность воздуха над раствором, %	Масса бюкса, г		Навеска сухой пыли G <sub>1</sub> , г	Масса бюкса с пылью после выдержки в эксикаторе C <sub>2</sub> , г	Количество впитавшейся влаги O <sub>3</sub> , г	Равновесная влажность пыли-ни, %
				O	с сухой пылью G <sub>1</sub>				

Примечание. Данные об относительной влажности воздуха над раствором кислот берутся из табл. 14 в зависимости от температуры в помещении.

с различной относительной влажностью воздуха. Для ускорения процесса адсорбции влаги пылью рекомендуется создавать в эксикаторах разрежение. Остаточное давление в эксикаторе должно быть 40—53 гПа (30—40 мм рт. ст.). Процесс адсорбции при атмосферном давлении практически заканчивается через 7—10 суток, в разреженной среде — через 2—3 суток. Во время проведения анализа температура в помещении должна поддерживаться близкой к постоянной и фиксироваться. По прошествии указанного времени, открывают эксикатор, быстро закрывают бюксы крышками и тотчас же взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Для предотвращения поглощения пылью влаги из воздуха каждый последующий эксикатор открывают только после взвешивания всех бюксов из предыдущего эксикатора.

После определения массы бюкса с влажной пылью его вновь открывают и помещают в эксикатор с соответствующей концентрацией кислоты на 24 ч при атмосферном давлении и на 12 ч при разрежении. Процесс выдерживания в эксикаторах с определенной относительной влажностью повторяют, пока масса бюкса с пылью не станет постоянной G<sub>2</sub>.

Результаты взвешиваний вносят в журнал и рассчитывают равновесную влажность пыли φ<sub>п</sub> (в %) по следующей формуле:

$$\phi_{п} = [G_3 / (G_3 + G)] \cdot 100$$

Здесь C<sub>3</sub> = O<sub>3</sub> — Gi — количество впитавшейся влаги, г; G = G<sub>1</sub> — G<sub>0</sub> — навеска сухой пыли, г.

Для удобства пользования результатами анализа строят график зависимости равновесной влажности пыли от относительной влажности воздуха (изотерма сорбции). По оси ординат

откладывают равновесную влажность пыли φ<sub>п</sub> в процентах, а по оси абсцисс — относительную влажность воздуха в процентах.

## 6.2. СМАЧИВАЕМОСТЬ ПЫЛИ

### Общие сведения

Процесс смачивания порошкообразного материала происходит в результате сложного взаимодействия молекул на границе твердой, жидкой и газообразной фаз и приводит к образованию на поверхности частиц тонкой жидкостной пленки, из которой влага проникает в частицы. Смачивание порошка всегда сопровождается уменьшением поверхностной энергии частиц, тем полнее и лучше смачивается пыль. Смачивание частиц пыли капельками распыленной воды лежит в основе процесса мокрого пылеулавливания. Смачиваемость пыли водой влияет на гидропылеудаление из бункеров пылеуловителей, а также определяет пригодность мокрых способов пылеподавления и уборки запыленных помещений.

Склонность пыли к смачиванию оценивают методом пленочной флотации. Метод основан на определении доли массы затонувших за определенное время частиц порошка, насыпанного тонким слоем на поверхность воды [36]. Предполагается, что каждая из частиц, образующих слой, контактирует с водой. Момент засыпки порошка в кювету с водой считается началом смачивания. В действительности же насыпать исследуемый порошок на поверхность воды в виде монослоя невозможно. Однако время заполнения водой капилляров слоя порошка мало, и им пренебрегают. Тем не менее при определении смачиваемости методом пленочной флотации следует стремиться насыпать пробу на поверхность воды возможно тонким слоем и равномерно.

По смачиваемости, определенной методом пленочной флотации, промышленная пыль разделяется на три группы [68]:

Доля затонувших частиц, %	
Плохо смачиваемая	<30
Средне смачиваемая	30-80
Хорошо смачиваемая	>80

Дополнительной характеристикой активности пыли по отношению к воде служит кинетика смачивания. Этот показатель определяется методом капиллярного впитывания посредством измерения скорости впитывания влаги пылевым слоем при контакте его с влажной поверхностью [71]. По результатам измерений строят кривые кинетики смачивания слоя пыли (см., например, рис. 38),

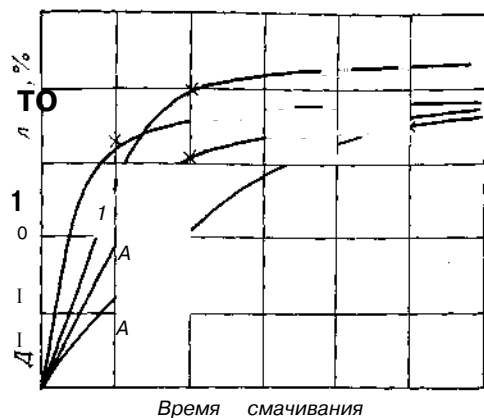


РИС. 38. Пример кривых кинетики смачивания различных видов пыли.

Как видно из рис. 38, кривые кинетики смачивания можно разделить на отрезки, отвечающие двум периодам. Первый (до отмеченной крестиком точки) характеризуется быстрым ростом объема поглощаемой влаги и соответствует заполнению влагой крупных пор в частицах пыли и

капилляров, образованных этими частицами. При этом происходит смачивание основной поверхности пыли. Второй соответствует вытеснению молекул газа из микропор в частицах пыли и характеризуется уменьшением скорости смачивания. Пыль можно считать практически полностью смоченной в том случае, когда объем поглощенной влаги составляет примерно 92% максимального объема смачивания.

Кинетические кривые смачиваемости пыли, построенные в логарифмических координатах (по оси ординат откладывается процент поглощенной влаги, а по оси абсцисс — время смачивания) — прямые линии. Угол наклона этих линий характеризует скорость смачивания.

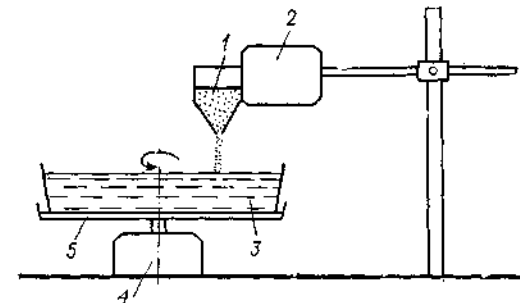
#### Определение смачиваемости пыли методом пленочной флотации

Обязательным условием этого метода является соблюдение постоянного времени высыпания из бункера на поверхность воды одного и того же количества различных видов пыли. Принято брать 1 г пыли, время высыпания — 2 мин.

Устройство для определения смачиваемости схематично изображено на рис. 39. Оно состоит из вращающегося столика 5, на который устанавливается сосуд 3 диаметром 18—20 см и высотой 7 см, и вибрационного пылепитателя 2. Столик, приводимый в движение электродвигателем 4 (тип ДСД-2), вращается с частотой 2 об/мин. Бункер / вибропитателя 2 имеет приспособление, позволяющее увеличивать и уменьшать ширину выпускного отверстия.

Подготовка и проведение определения. Опытным путем подбирают ширину выпускного отверстия бункера. Для этого берут несколько навесок исследуемой пыли по 1 г и, уменьшая или увеличивая ширину выпускного отверстия бункера, добиваются, чтобы время насыпания 1 г пыли было  $2 \pm 0,1$  мин.

рис. 39. Устройство для определения смачиваемости пыли методом пленочной флотации.



Взвешивают предварительно высушенную и охлажденную воронку Шотта. С помощью резиновой пробки вставляют воронку в колбу для фильтрации под вакуумом. Колбу подсоединяют к водоструйному насосу.

Из подготовленной согласно п. 14 пробы исследуемой пыли отвешивают на аналитических весах 1 г с точностью до 0,0001 г. Заполняют дистиллированной водой сосуд ниже его верхней кромки на 3—4 мм. Ставят сосуд на столик. Располагают вибропитатель так, чтобы расстояние от точки бункера до поверхности воды было 3—4 мм и находился он у стенки сосуда, и включают электродвигатель. После 4—5 оборотов столика в бункер включенного вибропитателя высыпают навеску пыли и следят, чтобы свежая порция пыли не попадала на уже покрывшую воду и удерживающуюся в поверхностном слое пыль. С этой целью после каждого оборота столика передвигают вибропитатель от периферии к центру сосуда.

После высыпания всей пробы устройство останавливают. Воду с оставшейся на ее поверхности пылью сливают в стакан.

Осевшую на дно сосуда в процессе опыта пыль с помощью промывалки количественно переносят в предварительно взвешенную воронку Шотта, включают водоструйный насос и отфильтровывают пыль. Воронку с пылью помещают в сушильный шкаф и сушат при 105 °С до постоянной массы. Охлаждают воронку следует в эксикаторе, заполненном силикагелем или хлоридом кальция. Взвешивание производят на аналитических весах с точностью до 0,0001 г.

Смачиваемость (в %) вычисляют по формуле

$$[(G_2 - G_1) / G] 100$$

где  $G_2$  — масса воронки с пылью, г;  $G_1$  — масса чистой воронки, г;  $G$  — навеска пыли, г.

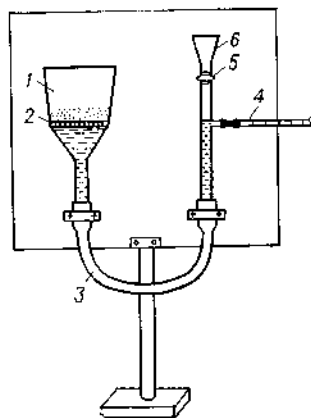
Проводят пять—шесть параллельных опытов и вычисляют среднее арифметическое из полученных результатов. Расхождение между результатами отдельных измерений и их средним арифметическим значением не должно превышать 3%. Результаты измерений, отклоняющиеся от среднего арифметического больше чем на 3%, отбрасывают. За окончательный результат принимают среднее арифметическое значение оставшихся измерений.

## Определение смачиваемости пыли методом капиллярного впитывания

**Подготовка и проведение определения.** Собирают установку по схеме, показанной на рис. 40, и закрепляют на панели. Петка (капиллярная трубка) 4 должна быть установлена строго горизонтально на одном уровне с пористой прокладкой 2 в конусе Шотта 1. Вместимость пипетки 2 мл, цена делений ее шкалы 0,01 мм. Через воронку 6 заливают дистиллированную воду в установку так, чтобы она заполнила пипетку, соединительные трубки 3 и воронку Шотта 1 до пористой перегородки 2, смочив ее, и закрывают кран 5. Необходимо проверить, чтобы в заполненных водой частях установки не было пузырьков воздуха. Затем 1 г подготовленной по п. 14 исследуемой пыли быстро помешают равномерным слоем в воронку Шотта и одновременно включают секундомер. Каждые 5—10 с снимают показания уровня жидкости в капиллярной трубке 4. Уровень жидкости уменьшается за счет впитывания воды слоем

Таблица 16. Протокол определения смачиваемости пыли

Уровень наблюд.	Время контакта слоя пыли с влажной подложкой, с	Объем впитавшейся жидкости, мл	Средняя толщина слоя, мм	Номер наблюд. дни:	Время контакта слоя пыли с влажной подложкой, с	Объем поглощенной влаги, мл	Доля впитавшейся жидкости, %
1	5	0,14	25,5	6	40	0,38	69,0
2	10	0,20	36,4	7	60	0,47	85,5
3	15	0,25	45,4	8	80	0,55	100
4	20	0,28	51,0	9	100	0,55	100
5	30	0,35	63,0				



пыли. Наблюдения за изменением уровня жидкости в трубке продолжают до его прекращения. Практически впитывание влаги заканчивает за 60—100 с. Результаты наблюдений записывают по форме, представленной в табл. 16.

**Пример.** Условия определения: доломитовая пыль; характеристика дисперсного состава  $\delta_{90} = 15$  мкм,  $\sigma = 3$ .

По данным таблицы (графы 2 и 4) на логарифмической сетке строим кинетические

РИС. 40. Установка для определения смачиваемости пыли методом капиллярного впитывания.

линии смачиваемости пыли, откладывая по оси ординат процент поглощенной влаги, а по оси абсцисс — время контакта слоя пыли с влажной подложкой.

## Глава 7

### АБРАЗИВНОСТЬ ПЫЛИ

#### 7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Одним из важных условий обеспечения нормальной работы пылеуловителей является прогнозирование мер по предупреждению износа поверхностей их корпуса.

В практике эксплуатации пылеочистных установок можно достаточно часто наблюдать истирание стенок аппаратов и газоходов вплоть до образования сквозных отверстий. Интенсивный износ стенок аппаратов характерен для сухих инерционных пылеуловителей, газоходов и воздухопроводов в местах поворота запыленного газового потока. В особенности изнашиваются стенки циклонов в верхней части цилиндра (в начале первого поворота запыленного потока) и конусов.

Изнашивание стенок пылеочистных аппаратов происходит вследствие абразивных свойств частиц пыли, ударяющихся или трущихся о внутренние поверхности пылеуловителей под воздействием инерционных сил. Так, износ конической части циклонов объясняется ударами крупных частиц, которые, отражаясь от стенок, совершают скачкообразные движения. В ряде случаев вследствие особой структуры вращающегося потока в циклоне крупные частицы не проходят в пылесборный бункер и продолжают вращаться в конусе до полного их истирания или остановки работы побудителя тяги. Истирание стенок циклона наблюдается также в местах движения так называемого пылевого жгута, который образуется в основном из крупных фракций пыли.

Износ стенок пылеуловителей зависит от концентрации пыли и резко возрастает при увеличении скорости газа. Истирание стенок зависит также от абразивных свойств частиц пыли, а именно от их твердости, формы, размера и плотности. Например, известно [10], что при увеличении частиц золы истирание Металлической поверхности увеличивается.

Исследования процесса абразивного воздействия частиц пыли показали [10, 13, 14], что в первом приближении износ пропорционален концентрации пыли  $C$ , времени воздействия  $t$  и третьей степени скорости газового потока  $v$ . Износ также зависит от упомянутых абразивных свойств пыли. На основании экспериментальных исследований [15] была предложена расчетная формула для оценки глубины износа  $h$  (в м) поверхности

металла при абразивном воздействии пыли:

$$L = eCv^3 rK/g \quad (24)$$

Здесь  $g$  — ускорение силы тяжести,  $m/c^2$ ;  $b$  — вероятность попадания частиц на изнашиваемую поверхность (максимальное значение  $e = 1$ );  $Da$  — коэффициент абразивности пыли при заданном материале поверхности,  $m^2/kg$ .

Для того чтобы пользоваться формулой (24), необходимо знать значения всех входящих в нее параметров. Концентрации пыли и скорость газового потока определяются по обычной методике пылегазовых замеров (см. п. 1.2).

Вероятность  $e$  попадания пылевых частиц на изнашиваемую поверхность для случая движения потока по изогнутому колону лежит в пределах 0,5—1. Для случая омывания потоком препятствия произвольной конфигурации вероятность попадания частиц оценивается экспериментально [10]. Для этого исследуемый элемент поверхности покрывают слоем липкого вещества и определяют долю осевших на элементе частиц.

Коэффициент абразивности  $Ka$  зависит от минералогического состава пыли, от прочности, твердости, формы, плотности и размеров частиц. Этот коэффициент в каждом конкретном случае должен определяться экспериментально.

Лабораторный метод определения коэффициента абразивности разработан [15] применительно к изучению абразивных свойств золы. Можно полагать, что он пригоден для оценки абразивности других порошкообразных материалов, имеющих  $Ka \sim 0,5-10^{-12} m^2/kg$ . Этот метод основан на определении степени абразивного износа пластинки из исследуемой марки стали, причем пластинка располагается под углом  $45^\circ$  к пылевой струе. Испытания образцов проводятся с помощью абразивметра центробежного типа [52].

Глубина износа образца  $h$  (в м) вычисляется по формуле

$$h = Am/pS_{нз} \quad (25)$$

где  $Dт$  — потеря массы образца в результате истирания, кг;  $p$  — плотность материала образца,  $kg/m^3$ ;  $S_{нз}$  — изношенная поверхность образца,  $m^2$ .

Количество пыли, попавшее на образец

$$q = C \cdot S_{тр} \cdot T \quad (26)$$

где  $S_{тр} = S_{нз} \sin \frac{\pi}{4}$  — площадь сечения трубки, по которой пыль поступает на образец,  $m^2$ .

Из соотношения (24) имеем

$$K_a = hglzCv^4$$

С учетом зависимостей (25) и (26) можно записать

$$K_a^2 = \Delta m \sin \frac{\pi}{4} \frac{g}{epv^2} q$$

В правой части выражения (27) переменной величиной является только  $\Delta m$  — изменение массы образца. Произведение

стальных членов можно принять за константу прибора для одних и тех же условий опыта. Тогда

$$\Delta m = A Dт \quad (28)$$

где  $A$  — константа прибора,  $m^2/(H-кг)$ .

Для центробежного абразивметра (рис. 41)  $A = 1,208 \times 10^{-6} m^2/(H-кг)$ . При этом угловая скорость вращения разгонной трубки  $\omega = 314$  рад/с («3000 об/мин»), длина трубки 150 мм, количество пыли, расходуемое за один опыт, 0,1 кг.

Определение коэффициента абразивности  $Ka$  практически сводится к нахождению изменения массы образца. Зная  $Ka$  (в  $m^2/kg$ ),  $v_r$  (в м/с) и  $C$  (в  $kg/m^3$ ) и задаваясь вероятностью попадания частиц на поверхность  $e$  в пределах от 0,5 до 1,0, можно оценить продолжительность работы  $t$  (в ч) аппарата до допустимой величины абразивного износа  $h$

$$x = hg/3600eCv^3 Ka \quad (29)$$

## 7.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АБРАЗИВНОСТИ ПЫЛИ

Описание установки. Центробежный абразивметр (рис. 41) состоит из кассеты 1 для крепления образца 2; устройства для разгона частиц пыли 3; вибрационного питателя 6 с бункером 5; корпуса 7; электродвигателя 8 и сборника пыли 9.

Исследуемая пыль из бункера 5 подается в воронку 4, закрепленную на крышке корпуса 7. Из воронки пыль поступает в разгонное устройство, представляющее собой трубку длиной 150 мм с внутренним диаметром 6 мм. На одном конце трубки крепится кассета 1 с образцом 2, установленным под углом  $45^\circ$  к оси трубки, на другом — противовес для балансировки разгонного устройства. Разгонное устройство вращается электродвигателем 8 в горизонтальной плоскости.

Во вращающейся трубке частицы разгоняются под действием центробежных сил, ударяются о поверхность образца, истирают его, а затем через проем в кассете выносятся в сборник пыли 9. Взвешиванием образца до и после опыта определяют массовый износ образца. Количество исследуемой пыли, скорость вращения разгонного устройства во всех опытах должны быть одинаковыми.

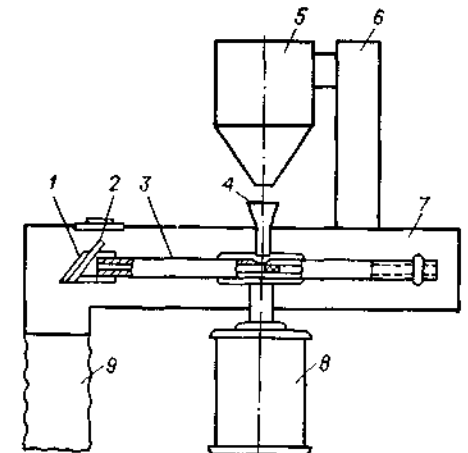


РИС. 41. Центробежный абразивметр.



**Подготовка к определению.** Рабочую поверхность образца подвергают механической обработке с целью удаления окисной пленки и шлифованию [52]. Параметр шероховатости  $R_a = 0,63 \pm 0,50$  мкм по ГОСТ 2789—73.

Устанавливают с помощью стробоскопического тахометра скорость вращения двигателя  $314 \pm 2$  рад/с и производят регулировку питателя. Для этого в бункер питателя засыпают 10 г пыли, включают питатель, открывают отверстие бункера и секундомером засекают время разгрузки бункера. Расход пыlif (в г/мин) вычисляют по формуле

$$Q = 10/T$$

где 10 — масса навески пыли, г;  $T$  — время разгрузки бункера, мин.

Разгрузку бункера регулируют, изменяя напряжение, подаваемое на электромагнитную катушку вибратора, т. е. варьируя интенсивность встряхивания бункера питателя. Если этого недостаточно, то увеличивают или уменьшают отверстие в бункере питателя, через которое подается пыль.

Расход пыли должен быть равен  $3 \pm 0,1$  г/мин.

**Проведение определения.** Из подготовленной по п. 1.4 пробы пыли берут навеску 100 г с точностью до 0,01 г.

Стальной образец протирают сухой мягкой тканью, взвешивают с точностью до 0,02 мг и помещают в кассету разгонного устройства.

Закрывают крышку абразивметра, подают регулируемое напряжение на электродвигатель и с помощью тахометра устанавливают скорость вращения двигателя  $314 \pm 2$  рад/с и поддерживают ее постоянной в течение опыта. Навеску пыли помещают в бункер питателя, включают вибратор.

После разгрузки бункера выключают питатель и двигатель абразивметра, извлекают образец из кассеты, протирают его мягкой тканью и взвешивают.

**Обработка результатов.** Коэффициент абразивности исследуемой пыли вычисляют по формуле (28).

Потеря массы образца  $\Delta m$  в результате истирания его в абразивметре равна

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

где  $m_0$  — масса образца до испытания, кг;  $m_1$  — масса образца после испытания, кг.

За окончательный результат испытания принимают среднее арифметическое результатов двух параллельных определений. Допустимое расхождение между результатами двух параллельных определений не должно превышать 4%. В противном случае определение повторяют.

В табл. 17 приведены для примера коэффициенты абразивности золы некоторых видов угля.

Таблица 17. Коэффициенты абразивности золы

Месторождение угля	Характеристика дисперсного состава		Л.-10П, м <sup>2</sup> /кг
	650, мкм	В	
Воркутинское	24	2,02	1,43
Харанорское	36	3,3	2,2
Экибастузское	17	3,2	1,98
Назаровское	17	3,55	1,9
Подмосковное	15	4,0	1,48

**Пример расчета времени износа.** Рассчитать время износа стенки циклона в месте первого поворота пылегазового потока. Условия: пыль — зола подмосковного угля; коэффициент абразивности  $K_2 = 1,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/кг; концентрация пыли  $C = 0,005$  кг/м<sup>3</sup>; скорость пылегазового потока  $v = 12$  м/с; вероятность попадания частиц на поверхность (по экспериментальным данным)  $e = 0,6$ ; толщина стенки циклона  $\delta = 0,004$  м.

Подставляя заданные значения величин в формулу (29), получим:

$$X = \frac{0,004 \cdot 9,81}{3600 \cdot 0,6 \cdot 0,005 \cdot 12 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}} = 13\,860 \text{ ч или } 1 \text{ год } 5 \text{ месяцев}$$

## Глава 8

### УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЫЛИ

#### 8.1. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ СЛОЯ ПЫЛИ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

Электрическая проводимость пылевого слоя оказывает большое влияние на работу электрофильтра и эффективность электрической очистки газов.

Очистка газов в электрофильтре включает следующие основные процессы:

зарядку пылевых частиц, содержащихся в газе, отрицательно заряженными ионами, образующимися в поле коронного разряда;

дрейф заряженных частиц пыли к осадительным электродам под воздействием электрического поля и осаждение их на поверхности осадительных электродов с образованием пылевого слоя;

нейтрализацию заряда пылевого слоя на осадительных электродах;

сброс пыли с поверхности осадительных электродов в бункер посредством отряхивания электродов.

Эффективная работа электрофильтра возможна только при условии беспрепятственного протекания каждого из перечисленных процессов.

От электрической проводимости пыли зависит, быстро или медленно стекают заряды с пылевого слоя на поверхность осадительного электрода. Хорошо проводящие частицы пыли при соприкосновении с осадительным электродом почти мгновенно отдают ему свой заряд, перезаряжаются и, отталкиваясь от электрода, возвращаются в газовый поток. В потоке частицы снова заряжаются и переносятся к осадительным электродам. Таким образом хорошо проводящие частицы, прикасаясь к осадительными электродами, совершают скачкообразное перемещение по ходу газа и проходят электрофильтр, не осажаясь [6].

В случае улавливания плохо проводящей (высокоомной) пыли слой на осадительных электродах разряжается очень медленно. На нем создается потенциал. Напряженность поля в слое пыли при достаточно большом электрическом сопротивлении может достичь такой величины, при которой возможен электрический пробой, сопровождающийся ионизацией газа в порах и каналах пылевого слоя [6, 67]. Это явление, называемое обратной короной (положительной полярности), связано с образованием положительных ионов, частично нейтрализующих отрицательный заряд частиц пыли в объеме электрофильтра. Вследствие этого падает эффективность улавливания пыли. Кроме того, в результате искажения электрического поля в межэлектродном пространстве, вызванного наличием положительных ионов, оно становится легкопробиваемым, что ведет к работе при пониженном напряжении, а это также ухудшает степень очистки газов [67].

Наиболее эффективно улавливается электрофильтрами пыль с умеренной проводимостью. Заряды с осажденных пылевых частиц равномерно стекают на поверхность электродов по мере поступления заряженных частиц из объема электрофильтра.

В случае электрической очистки газов от пыли, неблагоприятной для улавливания, обеспечить эффективную работу электрофильтра можно только специальными мерами. Так, для улавливания хорошо проводящей пыли следует применять электрофильтры (если нет возможности использовать аппараты других типов) с осадительными электродами, препятствующими возврату осажденных частиц в газовый поток, например карманными [18]. Проблему улавливания высокоомной пыли решают путем улучшения ее проводимости (кондиционированием) и оптимизацией электрического режима [43, 67]. Для того чтобы предусмотреть те или иные меры на стадии проектирования установок электроочистки или при модернизации эксплуатируемых систем, необходимо иметь данные по проводимости слоя улавливаемой пыли [9—11].

## 8.2 УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЫЛИ

Электрическую проводимость пыли характеризуют величиной удельного электрического сопротивления ( $УЭС$ ) слоя пыли  $\rho$  (в Ом-м), которое равно сопротивлению прохождению электрического тока через куб пыли со стороной, равной 1 м.

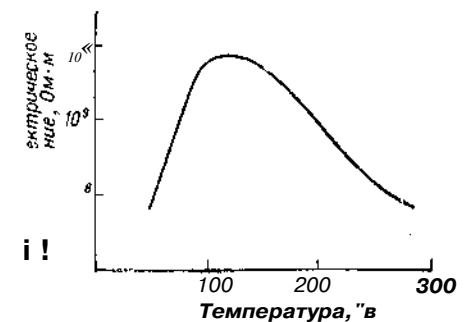
По величине  $УЭС$  улавливаемую пыль можно приближенно разделить на три группы [67]:

	$\rho$ , Ом-м
Хорошо проводящая	$< 10^2$
Со средней проводимостью	$10^2 - 10^{8,49}$
Высокоомная	$> 10^{8,49}$

Электрическое сопротивление пыли обусловлено поверхностной и внутренней (объемной) проводимостью. Вследствие адсорбции влаги и газов на пылинках имеется поверхностный слой, несколько отличающийся по свойствам от основной массы частиц. Этот слой и обуславливает поверхностную проводимость. Внутренняя проводимость вызвана электронной или ионной проводимостью материала самой частицы и увеличивается с ростом температуры за счет увеличения энергии возбуждения электронов. На рис. 42 показана зависимость электрического сопротивления слоя пыли от температуры. При комнатной температуре частицы адсорбируют из воздуха влагу и поэтому имеют сравнительно высокую поверхностную проводимость и, соответственно, низкое сопротивление. По мере нагревания пыли адсорбированная влага испаряется и сопротивление пыли возрастает. Такое возрастание для различных видов пыли продолжается до 90—180°C. Дальнейшее повышение температуры приводит к повышению объемной проводимости и уменьшению сопротивления благодаря тепловому возбуждению электронов в частицах. Таким образом, кривая зависимости сопротивления пыли от температуры отражает два существенно различных вида электропроводности пыли: поверхностную — при более низких температурах и объемную — при высоких. Имея кривую зависимости сопротивления пыли от температуры, можно посредством регулирования рабочей температуры в известных пределах влиять на проводимость улавливаемой пыли [18, 43].

Кроме температуры и влажности на величину  $УЭС$  пыли влияют химический состав, размер и упаковка частиц [6].

РИС. 42. Зависимость электрического сопротивления слоя пыли от температуры.



### 8.3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЫЛИ

Методы определения УЭС пыли как в лабораторных, так и в промышленных условиях состоят из двух этапов: формирования измерительного слоя пыли и измерения электрического сопротивления этого слоя.

От условий формирования слоя зависит плотность упаковки частиц. Поэтому в приборах для определения УЭС пыли наиболее правильно было бы формировать слой под воздействием электрических сил в поле коронного разряда. В этом случае плотность упаковки частиц соответствовала бы плотности упаковки частиц на осадительном электроде электрофильтра.

Сопротивление слоя пыли может быть замерено тераомметром или определено расчетным путем с учетом величины напряжения, приложенного к измерительным электродам прибора, и тока, протекающего через слой пыли.

#### Определение удельного электрического сопротивления пыли в промышленных условиях

Метод заключается в измерении сопротивления слоя пыли, сформированного в зазоре между измерительными электродами под действием электрических сил поля коронного разряда.

Измерения проводятся с помощью измерителя сопротивления пыли ИСП-1, разработанного Семибратовским филиалом НИИОГАЗ [27].

Метод измерения УЭС пыли с использованием этого устройства положен в основу руководящего технического материала [44]. Этот РТМ, обязательный для организаций Управления газоочистки, связанных с исследованием, проектированием и наладкой электрофильтров в различных отраслях промышленности, устанавливает способ определения УЭС пылей при температуре до 200 °С в промышленных условиях.

**Устройство и принцип действия ИСП-1.** Прибор (рис. 43, а) состоит из измерительных 14 и коронирующего 15 электродов, помещенных в камеру 12. Измерительные электроды представляют собой пару гребенчатых пластин из нержавеющей стали, закрепленных на гребнедержателях. Гребнедержатели установлены в крышке камеры 12, изолированы друг от друга фторопластовыми изоляторами // и имеют в верхней части клеммы 9. Пластины крепятся так, чтобы они были расположены строго в одной плоскости, образуя гребенчатый зазор. Коронирующий электрод 15 представляет собой П-образную рамку с натянутой нихромовой проволокой диаметром 0,1—0,2 мм. Коронирующий электрод расположен над осадительным. Он крепится через изолятор к крышке камеры и имеет на выходе клемму 10. Камера снабжена заборной трубкой 17, у входного отверстия которой вставлена импульсная трубка для измерения статического

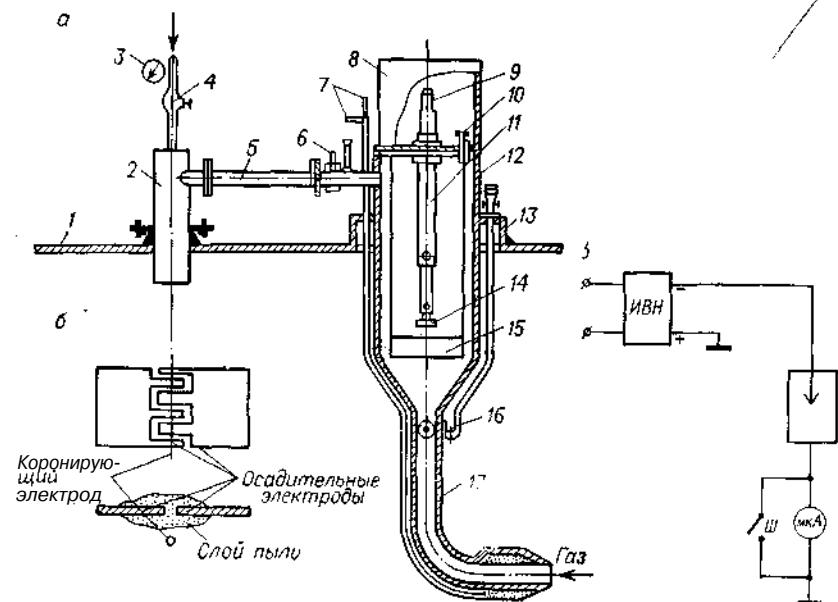


РИС 43. Устройство для измерения УЭС пыли в промышленных условиях:

а — ИСП-1 и установка его в газоход; б — принципиальная схема измерительных электродов ИСП-1; s — электрическая схема ИСП-1 (Zf — шунтирующий тумблер; ИВН — источник высокого напряжения; К — измерительная камера ИСП; мкА — микроамперметр).

давления в канале. В верхней части камеры имеется отводной патрубок 5 для вывода прошедшего через камеру газа.

Измеритель работает следующим образом. Камера 12 с вмонтированными в нее измерительными и коронирующим электродами помещается в газоход или электрофильтр. С помощью эжектора 2 запыленный газ протягивается через камеру. Клеммы 9 на гребнедержателях переключаются, и на них подается высокое напряжение положительной полярности. Тогда на заземленном коронирующем электроде возникает отрицательная корона. Под действием коронного разряда газ ионизируется, ионы адсорбируются частицами пыли. Отрицательно заряженные частицы пыли движутся к осадительному электроду (гребенчатой пластиной) и осаждаются на них. После запыления зазора между гребенчатыми пластинами отключают высокое напряжение, снимают переключку с клемм 9 и приступают к измерению сопротивления образовавшегося слоя пыли. Для этого к клеммам 9 подключают тераомметр (в этом случае гребенчатые пластины служат измерительными электродами).

**Подготовка к измерению.** Выбирают место на промышленном газоходе с соблюдением условий, необходимых для пылегазовых замеров. Скорость газов в точке отбора не должна превышать 20 м/с. Скорость газа измеряют по методике, изложенной в гл. 1.

Для обеспечения безопасности проведения измерений необходимо предусмотреть сооружение площадок, лестниц и ограждений.

Приваривают на газоходе / люк размером 140ХЮ0Х Х 25 мм с фланцем 13 для установки измерительной камеры и штуцер диаметром 50 мм для ввода эжектора. Расстояние между центрами люка и штуцера 250 мм.

Подводят к месту измерения линию сжатого воздуха (труба диаметром не менее  $\frac{3}{8}$ " ), заземляющий провод, состоящий из оголенных гибких медных многожильных проводов общим сечением не менее 25 мм<sup>2</sup>, и электрическую сеть напряжением 220 В с сечением подводящих проводов не менее 2,5 мм<sup>2</sup>.

Перед установкой измерительной камеры в газоход проверяют изоляцию между измерительными электродами 15. Сопротивление изоляции измеряют тераомметром. Оно должно быть не менее 10<sup>13</sup>—10<sup>14</sup> Ом-м. Если сопротивление изоляции меньше указанной величины, необходимо тщательно протереть поверхность изоляторов // спиртом.

Устанавливают измерительную камеру в газоход так, чтобы входное отверстие заборной трубки было направлено навстречу потоку газа. Шиберная заслонка 16 стоит в положении «закрыто».

Устанавливают эжектор в штуцер, соединяют его с линией сжатого воздуха и отводящим патрубком камеры.

Изокинетичность отбора части запыленного газового потока в измерительную камеру / соблюдается при равенстве нулю разности статических напоров, измеряемых соответственно внутри канала заборной трубки 17 а в газоход. Разность статических напоров измеряется микроманометром. Для этого двумя резиновыми трубками соединяют согласно маркировке штуцеры микроманометра с соответствующими импульсными трубками 7.

Получение слоя пыли на гребенчатых пластинах. Перед осаждением пыли на гребенках необходимо прогреть камеру с установленными в ней электродами в течение 30 мин. Установить шиберы на входе в камеру 16 и на выходе из нее б в положение «открыто». Подать сжатый воздух на эжектор 2. Давление воздуха должно быть не менее 0,2 МПа. Скорость отбора газа из газохода, соответствующая нулевому показанию микроманометра 3, устанавливается воздушным вентилем 4 эжектора (грубо) и шибером б на выходе из камеры (точно) и поддерживается в течение всего времени напыления.

Подключают к измерительным клеммам 9, предварительно переключенным, источник высокого напряжения с помощью высоковольтного кабеля. Подключают к клемме 10 коронирующего электрода схему измерения тока коронного разряда (рис. 43, в). Клеммы закрывают экраном 8. Источник высокого напряжения и схема измерения должны быть надежно соединены с заземляющим проводом.

Включают источник и устанавливают напряжение, соответствующее току коронного разряда 10—20 мкА. В промежутках между измерениями тока короны прибор ИСП должен быть зашунтирован тумблером Ш (рис. 43, в).

Чтобы зазор заполнился пылью, слой пыли на измерительных электродах должен быть 1—3 мм. Время, необходимое для формирования слоя пыли требуемой величины, приближенно можно определить, исходя из следующих данных:

Запыленность газа, г/м	Время напыления, мин
5—10	30
15—25	15
30—60	10

Более точно время напыления устанавливается предварительным опытом.

По истечении времени запыления измерительных электродов закрывают вентиль 4, шиберы б и 16 устанавливают в положение «закрыто».

Выключают источник высокого напряжения, снимают экран 8, снимают остаточный заряд прикосновением заземляющего провода к клеммам 9, отключают высоковольтный кабель.

Проведение измерения. Подготавливают тераомметр к измерению согласно инструкции, прилагаемой к прибору. Экранированными проводами подключают клеммы 9 к тераомметру. На время измерения клеммы следует закрыть экраном 8. Измеряют сопротивление пыли и результат записывают в журнал по форме, приведенной в табл. 18.

Таблица 18. Протокол определения УЭС золы

Номер опыта	Температура газа, °С	Сопротивление, Ом	Удельное электрическое сопротивление, Ом-м	Номер опыта	Температура газа, °С	Сопротивление, Ом	Удельное электрическое сопротивление, Ом-м
1	160	4,0-10"	2,0-10 <sup>11</sup>	6	160	4,4-10"	2,2-10 <sup>11</sup>
2	160	3,6-10"	1,8-10 <sup>11</sup>	7	160	4,0-10"	2,0-10 <sup>11</sup>
3	160	4,8-10"	2,4-10 <sup>11</sup>	8	160	3,8-10"	1,9-10 <sup>11</sup>
4	160	4,2-10"	2,1-10 <sup>11</sup>	9	160	4,2-10"	2,1-10 <sup>11</sup>
5	160	3,8-10"	1,9-10 <sup>11</sup>	10	160	3,8-10"	1,9-10 <sup>11</sup>

Вынимают из камеры измерительные электроды, очищают их и поверхность изоляторов от пыли сухим ватным тампоном и тщательно протирают спиртом.

Для определения сопротивления пыли проводят 10 параллельных опытов.

**Обработка результатов.** УЭС пробы пыли для каждого опыта вычисляют по формуле

$$p = RS/b \quad (30)$$

где  $R$  — сопротивление слоя пыли, измеренное тераомметром, Ом;  $S$  — площадь сечения активной части измерительных электродов, м<sup>2</sup>;  $b$  — зазор между измерительными электродами, м. Для конструкции ИСП-1, разработанной в Семибратовском филиале НИИОГАЗ,  $S/b = 0,05$ .

Затем находят среднее арифметическое значение:

$$D_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j$$

и среднее квадратическое отклонение величины  $p$  от их среднего значения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - p_{cp})^2}$$

Здесь  $p_j$  — результаты измерений;  $n$  — число опытов.

Результаты измерений, отклоняющиеся от среднего арифметического значения на величину больше  $3\sigma$ , отбрасывают. За окончательный результат принимают среднее арифметическое значение оставшихся измерений.

**Пример обработки результатов определения УЭС в промышленных условиях.** Предприятие — ГРЭС; пыль — летучая зола; место отбора пробы — газоход на входе в электрофильтр.

Результаты измерений записываем в табл. 18

Вычисляем

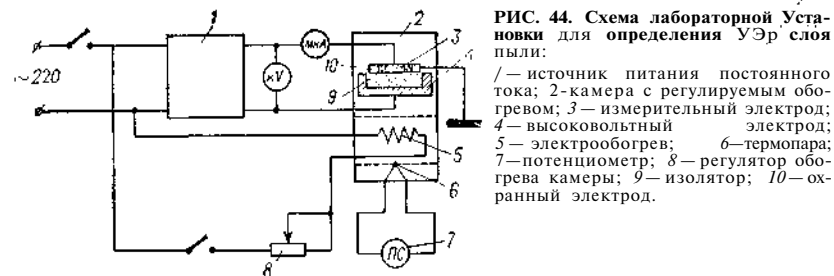
$$p_{cp} = 2,03 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad \sigma = 0,168 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Результаты измерений не выходят за пределы  $p_{cp} \pm 3\sigma$ , т.е.  $2,53 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и  $1,53 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Окончательно принимаем величину удельного электрического сопротивления золы  $p = 2,0 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

### Определение удельного электрического сопротивления слоя пыли в лабораторных условиях

С помощью ИСП-1 УЭС пылевого слоя измеряется в конкретных условиях газохода. Температурная зависимость УЭС и влияние увлажненности газа на его величину могут быть исследованы только на лабораторных или стендовых установках, так как изменения указанных параметров пылегазового потока на производстве практически неосуществимы. Ввиду того что определение УЭС с помощью ИСП-1 в лабораторных условиях требует создания специального стенда с запылением газового потока исследуемой пылью и сравнительно большого количества пыли (0,5—1,0 кг на один замер), этим прибором в лабораторных условиях не пользуются.



**РИС. 44.** Схема лабораторной установки для определения УЭС слоя пыли:  
1 — источник питания постоянного тока; 2 — камера с регулируемым обогревом; 3 — измерительный электрод; 4 — высоковольтный электрод; 5 — электрообогрев; 6 — термопара; 7 — потенциометр; 8 — регулятор обогрева камеры; 9 — изолятор; 10 — охранный электрод.

Аппаратурное оформление. В настоящее время для исследования УЭС пыли в лабораторных условиях применяются устройства, в которых слой пыли формируется методом свободной засыпки между измерительными электродами [49, 78]. Такие устройства могут быть изготовлены по чертежам организаций-разработчиков — Гинцветмета, Гипроцемента, НИИОГАЗ [5, 9, 49]. Все эти устройства однотипны по конструкции и имеют незначительные различия в размерах электродов, способах измерения толщины и проводимости пылевого слоя. Устройства (рис. 44) состоят из камеры с регулируемым обогревом 2, измерительной ячейки и средств измерения сопротивления пылевого слоя. Измерительная ячейка обычно включает высоковольтный 4, измерительный 3 и охранный 10 электроды. Охранный электрод предназначен для выравнивания электрического поля на краях измерительного электрода, для уменьшения влияния краевых эффектов и для защиты измерительной цепи от токов утечки по поверхности пылевого слоя. Сопротивление слоя пыли может быть измерено с помощью тераомметра или рассчитано, исходя из величины напряжения, приложенного к электродам, и тока, протекающего через пылевой слой (методом вольтметра-амперметра). При измерении сопротивления пыли тераомметром во избежание электростатических наводок необходимо тщательно экранировать объект измерения и тераомметр, для чего должна быть предусмотрена специальная измерительная камера. Тераомметр работает при фиксированном напряжении, поэтому при высоком УЭС пыли приходится измерять малые токи, отсюда возможны повышенные погрешности. Так, при измерении сопротивления порядка  $10^{12}$  Ом погрешность может достигать 20%. Методом вольтметра-амперметра можно измерить сопротивление с большей точностью, так как, подбирая напряжение, всегда можно получить токи достаточной величины, чтобы избежать значительных погрешностей.

Чаще всего один из электродов — обычно высоковольтный 4 — представляет собой чашечку с небольшими бортиками, в которую засыпают пробу пыли. Второй электрод — измерительный 3 — накладывают на исследуемую пыль. Охранный электрод 10 в виде кольца расположен в одной плоскости с измерительным и также накладывается на исследуемую пыль.

ио́мно охранный электрод составляет с измерительным электродом одно целое, но изолирован от него термостойким изоляционным материалом 9 (фторопласт, слюда и т. д.). Сопротивление изоляции должно быть не менее чем на два порядка выше максимального сопротивления исследуемой пыли.

Для получения сопоставимых результатов измерения УЭС пыли, а также его зависимостей от температуры и влажности для всех видов пыли исследования следует проводить в идентичных условиях, т. е. при единых условиях формирования измерительного слоя, выдерживания пыли перед анализом в атмосфере определенной влажности воздуха, уплотняющей нагрузке и способе измерения сопротивления слоя исследуемой пыли.

Подготовка к проведению измерения. Подготовленную, как указано в п. 14, пробу пыли (50—70 г) в чашке Петри помещают в эксикатор с  $60 \pm 2\%$  относительной влажностью воздуха над 38,5% раствором серной кислоты и выдерживают в течение двух суток, перемешивая пыль 2—3 раза в сутки. Температура в эксикаторе должна быть в пределах 18—22°C.

Собирают установку по схеме, приведенной на рис. 44. Протирают электроды сухим ватным тампоном.

На нижний чашеобразный электрод 4 насыпают подготовленную пробу пыли несколько выше кромки электрода и срезают тонкой металлической линейкой вровень с кромками. Накладывают на пыль верхний электрод 3. Через 15 с после наложения верхнего электрода измеряют толщину слоя пыли микрометром. Ячейку помещают в камеру 2 и экранированными проводами соединяют согласно схеме с источником питания постоянного тока /. При измерении сопротивления до  $10^9$  Ом источник тока Б 5-50, при более высоком сопротивлении подключают источник высокого напряжения постоянного тока ВС-23. Экран провода, охранное кольцо, источник питания заземляют.

Проведение измерения. Включают источник питания постоянного тока в электросеть напряжением 220 В и прогревают его в течение 20—25 мин.

Устанавливают переключатель микроамперметра на максимальный предел измерения (750 мкА). Затем регулятором источника питания подают напряжение на измерительную ячейку. Напряжение подают, начиная с 10—20 В. Установив заданное напряжение, включают микроамперметр и переключателем изменяют предел измерения до отклонения стрелки минимум на 5—10 делений. Если переключатель микроамперметра установлен в положение 0,3 (минимальный предел измерения), а стрелка микроамперметра не отклоняется (сила тока в цепи менее  $0,3 \cdot 10^{-8}$  А), то необходимо повысить напряжение, подаваемое на ячейку, на 10—100 В в зависимости от вида пыли. Перед каждым увеличением напряжения переключатель микроамперметра переводят в положение 750 мкА. Увеличив напряжение до определенного значения, включают микроамперметр и изме-

ряют силу тока. Записывают в журнал напряжение, подаваемое на ячейку, силу тока в цепи и температуру в камере. Затем источник питания и микроамперметр отключают. Измерив сопротивление слоя пыли при комнатной температуре, приступают к измерению сопротивления в зависимости от температуры.

Включают обогрев 5 камеры и регулятором 8 устанавливают необходимую температуру. Следующее измерение сопротивления слоя пыли производят через 30 мин после выхода температуры на заданную величину, чтобы температуры в камере и слое пыли сравнялись. Интервал измерений — изменение температуры на 20—30 °С.

Если необходимо снять зависимость УЭС пыли от влажности окружающего газа, то с помощью специального приспособления в камере создают заданную влажность, выдерживают при этой влажности пыль не менее 1 ч и проводят измерения в той же последовательности, как описано выше. Температура и влажность газа в камере должны контролироваться и регулироваться в течение всего опыта.

Обработка результатов. УЭС слоя исследуемой пыли (в Ом-м) вычисляют по формуле

$$p = US/b$$

где  $U$  — напряжение, поданное на измерительную ячейку, В;  $I$  — сила тока в цепи, соответствующая поданному напряжению, А;  $S$  — площадь сечения активной части измерительных электродов, м<sup>2</sup>;  $b$  — высота слоя пыли, м.

Результаты измерений заносят в журнал, форма которого приведена в табл. 19.

Таблица 19. Протокол определения УЭС пылевого слоя

Температура в слое пыли, °С	Напряжение, подаваемое на электроды, В	Сила тока в цепи, А	Сопротивление, Ом	Удельное электрическое сопротивление, Ом-м

За окончательный результат принимают среднее арифметическое двух параллельных определений. Расхождение между параллельными определениями должно быть не более 10%. Если расхождение между параллельными определениями превышает указанную величину, определение повторяют.

К работе с устройствами для измерения УЭС пыли допускаются лица, прошедшие проверку квалификационной комиссией знаний правил работы с электроустановками напряжением выше 1 000 В.

## ГОРЮЧЕСТЬ И ВЗРЫВАЕМОСТЬ ПЫЛИ

## 9.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Круг определяемых характеристик и методики их определения принимаются в зависимости от решаемых задач, которые могут относиться к области пожаровзрывобезопасности, энергетики (сжигание топлива), технологии (технологическое горение, металлургия и т. п.). Здесь мы остановимся лишь на методиках определения характеристик горючести и взрываемости пылевых смесей для оценки их пожаровзрывоопасности, под словом пыль понимая взвешенные в воздухе частицы и под словом порошок — уловленную пыль.

К таким характеристикам относятся:

температуры вынужденного воспламенения (зажигания)  $t_B$  и самовоспламенения  $t_{\text{св}}$  пыли и в слое порошка;

температура вспышки  $t_{\text{всп}}$  (определяемая для твердых веществ с температурой плавления ниже 300 °С);

температура тления  $t_{\text{тл}}$ ;

нижний концентрационный предел воспламенения пыли (НКПВ);

максимальное давление взрыва  $P_{\text{макс}}$ ;

скорость нарастания давления взрыва  $v_p$ ;

минимальное взрывоопасное содержание кислорода (окислителя) в пыли  $K_{O_2}$ .

Помимо названных характеристик на практике определяют еще и другие, необходимость в которых для оценки пожаровзрывоопасности устанавливает разработчик систем обеспечения пожаро- и взрывобезопасности.

Под горением понимают самоускоряющееся химическое превращение, сопровождающееся интенсивным выделением тепла и обычно появлением пламени.

Воспламенение (возгорание) — это возникновение горения. Воспламенение и горение обуславливаются взаимодействием материалов с окислителями. Большинство металлов и их соединений, кремний, сера элементарная и связанная (колчедан) и другие неорганические и органические соединения взаимодействуют с окислителями, а некоторые металлы — с галогенами. Материалы воспламеняются также в результате других экзотермических процессов, например при взаимодействии некоторых металлов с азотом (с образованием нитридов) и с углеродсодержащими газами (с образованием карбидов). Ускорение химического превращения, приводящее к воспламенению, происходит главным образом при разогреве реагирующих веществ теплотой реакции (тепловое воспламенение). При этом первоначально химическая система разогревается либо вслед-

ствие притока тепла извне, либо в результате выделения тепла в самой системе. Повышение температуры может привести к тому, что выделение тепла превысит его отвод, в результате чего стационарное течение реакции станет невозможным — начнется лавинообразный саморазгон реакции с очень быстрым возрастанием температуры, т. е. произойдет воспламенение.

Различают два вида воспламенения: самовоспламенение и вынужденное воспламенение — зажигание. При самовоспламенении реакция ускоряется во всем объеме системы. Начальная температура, при которой происходит самовоспламенение, называется температурой самовоспламенения.

При зажигании условия для воспламенения создаются лишь в очень ограниченном объеме смеси (газовзвеси или отложений пыли) с помощью какого-либо источника тепла: нагретого тела, электрической искры, пламени и др. Вблизи такого источника возникает пламя, распространяющееся в системе. В этом случае экспериментально фиксируют минимальную температуру источника тепла, вызывающего воспламенение, — температуру воспламенения (зажигания).

Температурой тления  $t_{\text{тл}}$  называют наименьшую температуру порошка, при которой в результате нагревания возникает тление.

Температура вспышки  $t_{\text{всп}}$  — самая низкая температура горючего вещества, при которой в условиях испытаний над его поверхностью образуется смесь паров и газов с воздухом, способная вспыхивать от источника зажигания, но скорость их образования еще недостаточна для последующего горения.

Быстрое выделение энергии приводит к разогреву, движению и сжатию продуктов горения и окружающей среды, т. е. происходит тепловой взрыв. Химические превращения горючих материалов происходят в результате взаимодействия с окислителем газовой среды, в отличие от взрывчатых веществ, химические превращения которых обусловлены наличием содержащегося в них окислителя.

Если газовзвеси горят в неограниченном пространстве, то процесс протекает, как правило, без повышения давления; если же они горят в замкнутом объеме, то повышение давления может быть значительным. С уменьшением размера частиц и, следовательно, с увеличением удельной поверхности твердой фазы растет интенсивность выделения тепла.

Нижним концентрационным пределом воспламенения (НКПВ) называют минимальное пылесодержание, при котором возможно распространение по твердой фазе пламени от источника зажигания.

Отметим, что определяемые характеристики горючести и взрываемости не являются константами вещества, а зависят от условий проведения опыта: теплоотвода, параметров

продуцируемого облака газозвеси, подвода окислителя к исследуемому порошку и эталонному материалу.

Процессы воспламенения и горения очень сложны вообще, а для гетерогенных систем, какими являются пыли и порошки, тем более. Попытки аналитического описания процессов не привели пока к созданию надежных расчетных методов определения характеристик горючести и взрываемости. Поэтому в настоящее время их определяют в основном экспериментальным путем на лабораторных установках.

## 9.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ ПОРОШКОВ

Определение температуры самовоспламенения обычно проводят термографическим методом. Схема лабораторной установки для определения  $t_{\text{смв}}$  по методике, основанной на дифференциальном термографическом способе, представлена на рис. 45. Тигли с исследуемым порошком и инертным материалом с погруженными в них термопарами помещают в реакционную трубу и устанавливают с помощью держателей в вертикальную печь. Показатели термопар записываются параллельно двухкоординатным самопишущим потенциометром. Подавая в реакционный сосуд газовую смесь определенного состава, получают заданную концентрацию кислорода. Повторяя опыты при различной концентрации кислорода, определяют ту минимальную, при которой порошок воспламеняется. Начало самопроизвольного разогрева порошка определяют по точке перегиба на термограмме.

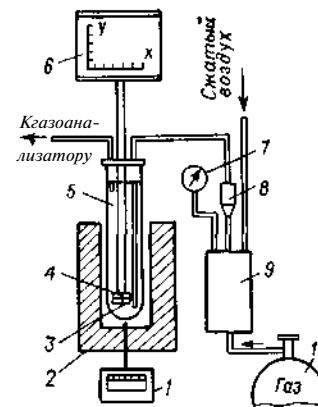
При определении температуры воспламенения (зажигания)  $t_{\text{в}}$  в качестве источника зажигания используют нагретый металлический стержень. Пробу порошка помещают на разогретую металлическую подложку и нагретый стержень опускают до соприкосновения с поверхностью порошка. Температуру порошка измеряют введенной в него термопарой, показатели которой записывают потенциометром. При воспламенении температура образца резко возрастает: на термограмме моменту воспламенения соответствует всплеск кривой нарастания температуры.

Определение температуры тления  $t_{\text{тл}}$  производят обычно путем визуального наблюдения за процессом нагревания и фиксации момента начала тления параллельно с определением температур самовоспламенения и воспламенения по методикам, описанным выше. Недостатком такой методики является трудность фиксации момента начала тления образца в нагретой печи.

По другой методике [41], порошок распределяют на нагреваемой пластине равномерным слоем определенной толщины. Пластина может быть открыта для свободного доступа воздуха и интенсивного теплообмена или помещаться в термостат, где процесс тления начинается при более низкой температуре.

РИС. 45. Схема установки для определения температуры самовоспламенения:

1 — потенциометр; 2 — печь; 3 — тигель с эталонным материалом; 4 — тигель с исследуемым порошком; 5 — реакционная труба; 6 — двухкоординатный потенциометр; 7 — манометр; 8 — реометр; 9 — ресивер; 10 — баллон с инертным газом.



Температура тления является характерным показателем для порошков с невысокой (600—700°C) температурой самонагрева (наименьшей температуры, при которой в порошке возникает экзотермическая реакция от постороннего источника тепла) и в то же время горящих без пламени или имеющих довольно высокую температуру самовоспламенения.

Минимальная температура тления угольного порошка 125°C, пирита 150°C, а порошков карбонильного железа 500°C.

Необходимо отметить, что встряхивание тлеющего слоя приводит к бурному горению и может вызвать взрыв вследствие интенсивного притока кислорода воздуха.

Определение температуры вспышки. Этот показатель используется при классификации производств, помещений и установок по пожаровзрывоопасности. Его определяют для веществ с дисперсной фазой, представляющих собой твердые плавящиеся органические соединения (например, нефтяной пек, битум и т.п.).

Величину температуры вспышки определяют по стандартному методу ССБТ (ГОСТ 12.1.021—80), заключающемуся в нагреве определенной массы вещества в открытом тигле с заданной скоростью, периодическом зажигании выделяющихся паров и визуальной оценке результатов. Метод не распространяется на быстро окисляющиеся на воздухе вещества, температура разложения которых ниже температуры вспышки или равна ей. Для испытания веществ с  $t_{\text{всп}}^* < 80^\circ\text{C}$  используют прибор ТВ, а при  $t_{\text{всп}} \geq 80^\circ\text{C}$  — аппарат ТВ-2 по ГОСТ 1369—79.

При определении  $t_{\text{всп}}$  в аппарате ТВ-2 вначале пробу нагревают со скоростью 14—17 град/мин, затем интенсивность нагрева уменьшают из расчета повышения температуры в интервале последних 28°C до ожидаемой  $t_{\text{всп}}$  со скоростью 5—6 град/мин. Именно в этом интервале температур начинают определять  $t_{\text{всп}}$ , перемещая пламя газовой горелки непрерывным движением над поверхностью пробы вещества в течение 1—1,5 с. Такое испытание повторяют через каждые 2°C повышения температуры.

Продолжая после установления  $t_{\text{всп}}$  нагрев образца со скоростью 5—6 град/мин, повышают его температуру до воспламенения. За температуру воспламенения принимают наименьшую температуру, при которой вещество воспламеняется от



пламени газовой горелки и продолжает гореть не менее 5 с после его удаления.

Определение температуры вспышки в закрытом тигле производится по ГОСТ 6356—75. Стандарт этот распространяется на плавящиеся при температуре до 50°C органические соединения.

Приведем величины  $\hat{\lambda}_{всп}$  некоторых веществ: смачиватель ОП-7, температура плавления которого 19°C, имеет  $\lambda_{всп} = 49^\circ\text{C}$ ; для нафталина, имеющего температуру плавления 80,2°C,  $\lambda_{всп} = 81^\circ\text{C}$ .

### 9.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВАЕМОСТИ ПЫЛИ

Существуют методики, предусматривающие проведение опытов при больших размерах систем, т. е. в условиях, максимально приближающихся к натурным, и на лабораторно-модельных установках. Первые находят применение, главным образом, при исследовании угольной пыли в опытных штольнях; стоимость таких установок велика, и осуществление их технически трудно. От применения подобных методик приходится вообще отказываться, когда для испытаний можно располагать лишь ограниченным количеством порошка. Поэтому более распространены лабораторные установки. Последние можно классифицировать в зависимости от характера создаваемой газозвеси: в виде облака с быстро изменяющимися параметрами или относительно стабилизированного потока.

Газозвесь в виде облака образуют обычно путем диспергирования пробы исследуемого порошка, кратковременно подаваемой в цилиндрическую или сферическую камеру сжатым газом.

Поточные установки могут быть незамкнутыми с направленным движением газозвеси и с циркуляцией потока в замкнутом объеме. В установках открытого типа невозможно определять максимальное давление при взрыве и скорость его нарастания. В замкнутых поточных установках в результате действия инерционных сил частицы в поперечных сечениях распределяются неравномерно. Кроме того, конструкция поточных установок сложнее установок с кратковременной подачей сжатого газа в реакционную камеру, поэтому к ним прибегают в редких случаях.

Установки, помимо системы распыления, снабжаются системами воспламенения, измерения температуры воспламенения, давления и скорости его нарастания при взрыве, окнами (при непрозрачных стенках камер) для наблюдения за процессом воспламенения и распространения пламени.

В установках с продуцированием газозвеси кратковременно подаваемым сжатым газом очень трудно добиться равномерности в распределении частиц взвеси в объеме реакционного сосуда. Известно много конструкций подобных установок. Осо-

бенно трудно получить равномерное распределение частиц при большой плотности вещества.

Остановимся здесь на устройстве установки ИПМ АН УССР, которая используется для материалов различной плотности. В отличие от большинства методик, оперирующих условной концентрацией, рассчитываемой как отношение массы распыляемого порошка к геометрическому объему камеры и, как правило, существенно отличающейся от фактической, методика ИПМ предусматривает определение концентрации взвеси. Для этого разработан специальный пробоотборник, основанный на принципе быстрого выделения из исследуемой газозвеси некоторого ее объема [40]. Время «отсечки» объема пробы 0,02 с.

Взрывная камера объемом 4000 см<sup>3</sup> имеет толстостенный корпус из нержавеющей стали с фланцами, к которым с помощью откидных болтов крепятся крышки. Через одну из крышек в камеру подается сжатый газ, к другой прикреплен воспламенитель. Для подогрева и охлаждения цилиндра предусмотрена водяная рубашка. Внутренний диаметр корпуса ПО мм, высота 400 мм. К стенкам корпуса приварены два патрубка, продольные оси которых совпадают. В одном установлен датчик давления, в другом вставлено бронестекло для визуального наблюдения за процессом взрыва.

В рабочем положении камера ориентируется вертикально. Вместе с тем для выполнения подготовительных операций ей можно придавать различный угол наклона при повороте в подшипниках цапф, приваренных к кожуху. Подшипники укреплены в опорных кронштейнах. Требуемый наклон фиксируется стопорными винтами.

Воспламенитель крепится к крышке камеры посредством шпилек. Предусмотрена возможность применения различных типов инициаторов воспламенения: теплового (нагретого тела), искрового, плавкой вставки и др.

На вводе сжатого газа в камеру предусмотрен обратный клапан, предотвращающий попадание исследуемого порошка в подводящую трубу. Камера снабжена также предохранительным клапаном. Помимо этого имеются штуцеры для присоединения манометров.

Предусмотрена возможность распыления порошка распылителями различных конструкций. Фланцевые соединения взрывного цилиндра герметизированы фторопластовыми прокладками.

Взрывная камера помещается в шкафу, смонтированном на каркасе. Шкаф препятствует распространению газообразных продуктов взрыва, для удаления которых в верхнюю его часть встроена местная отсос.

Системой газоподготовки (рис. 46) предусмотрены подготовка газовой смеси с заданным содержанием составляющих, необходимая степень осушки и очистки газов. Система газораспределения позволяет производить импульсную дозированную с соблюдением заданного режима подачу подготовленного газа

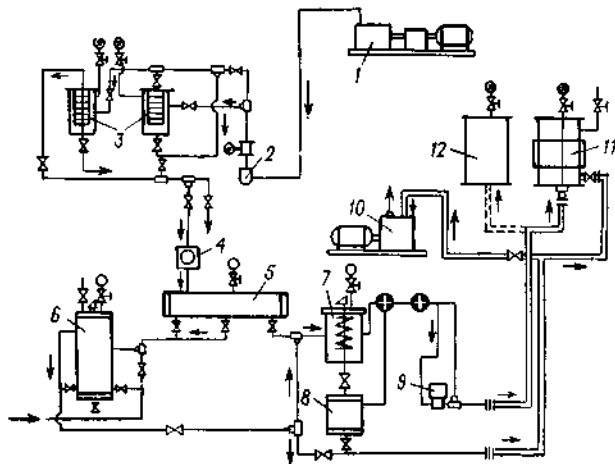


РИС. 46. Система газоподготовки и газораспределения [40]:  
1 — компрессор; 2 — маслоотделитель; 3 — осушитель; 4 — влагомер; 5 — коллектор; 5 — смеситель; 7 — 6-литровый расходный цилиндр с подогревателем; 8 — 2-литровый расходный цилиндр; 9 — электроклапан; 10 — вакуумный насос; 11 — взрывная камера; 12 — модель взрывной камеры.

во взрывную камеру. Предусмотрена возможность проведения взрывов при различных значениях разрежения — давления среды во взрывной камере и начальной температуры газов и корпуса камеры.

Регистрация давления, возникающего при взрыве, осуществляется осциллографом. Давление воспринимает тензодатчик тензометрической установки.

Управление производством взрыва полуавтоматическое в функции времени. Необходимые выдержки времени с минимальным интервалом в 0,1 с обеспечиваются программными и электронными реле времени. Электрические приборы контроля управления производством взрыва смонтированы на общем пульте (рис. 47).

Для регистрации, контроля и регулирования температуры установлены терморезисторы  $777$  в качестве первичного прибора и электронный потенциометр ЭП типа ПСР1-01 в качестве вторичного. Напряжение на воспламенитель подается от автотрансформатора РНТ и контролируется вольтметром. Ток воспламенителя контролируется амперметром. Регистрация давления, возникающего при взрыве, осуществляется осциллографом ОФ типа Н-700. Датчиком давления служит тензодатчик  $74$ , являющийся одним из четырех плечей измерительного моста. Сигналы от датчика усиливаются тензометрическим усилителем УТ типа ТУ-4м.

Действие электрической схемы сводится к следующему. Включают автомат ЛВ; при этом напряжение 220 В подается к выпрямителю осциллографа ИП, электронному стабилизатору

СТ тензометрического усилителя УТ, стабилизатору напряжения СТ<sub>2</sub>, электронному потенциометру ЭП. Одновременно напряжение подается и к цепи программного реле РП, реле времени РВ, промежуточного реле Р и электромагнитного клапана ЭМ.

Включением ВП напряжение подается в цепь управления и питания воспламенителя  $R_{II}$ . При температуре воспламенителя меньше заданной нормально открытый (н.о.) контакт «min» электронного потенциометра ЭП замыкается в цепи магнитного пускателя Я/И, который замыкает свой н.о. контакт во вторичной цепи автотрансформатора РНТ, тем самым включая воспламенитель РН. В зависимости от требуемой температуры воспламенителя подбирают силу протекающего через него тока за счет регулирования напряжения во вторичной цепи РНТ. Превышение заданной предельной температуры предотвращается размыканием контакта «min», обесточивающего цепь катушки пускателя ПМ, который размыкает цепь воспламенителя  $R_{II}$ .

К проведению взрыва должна быть подготовлена также вся аппаратура, регистрирующая давление. Для этого включают все тумблеры на осциллографе ОФ, кроме кассеты, и тензометрический усилитель. Затем тумблером В включается программное реле РП, которое замыканием своего н.о. контакта РП<sub>1</sub> включает кассету осциллографа. После паузы 1 с, необходимой для разгона кассеты, замыкается н.о. контакт РП<sub>2</sub> в цепи реле времени РВ. Реле РВ своим н.о. контактом мгновенного действия включает электромагнитный клапан ЭМ и подает напряжение батареи В на один из шлейфов осциллографа. Тем самым на осциллограмме в виде отрезка прямой фиксируется

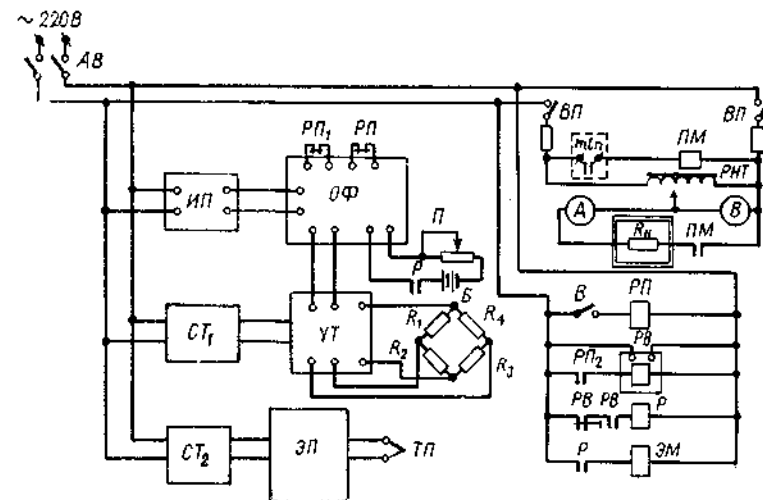


РИС. 47. Электрическая схема управления взрывом на установке для определения характеристик взрываемости пыли [40].

длительность впуска сжатого воздуха в цилиндр. Потенциометр /7 служит для регулирования рабочего тока гальванометра осциллографа, т. е. угла отклонения светового луча.

Длительность распыления порошка, как и подача напряжения батареи *Б* на шлейф осциллографа, определяется реле *РВ*, которое установленной выдержкой времени размыкает свой нормально закрытый (н. з.) контакт в цепи реле *Р*.

С выдержкой времени, достаточного для регистрации давления в процессе взрыва, программное реле *РП* размыкает свой н. з. контакт в цепи мотора кассеты осциллографа, останавливая его. Обычно достаточно выдержки 9 с с момента включения тумблера *В*. Электрические приборы контроля и управления проведением взрыва смонтированы на общем пульте.

Конструкция распылителя разработана, исходя из условия равномерного распределения взвеси в поперечном сечении реакционной камеры.

В качестве источника зажигания (воспламенителя) используется тепловой воспламенитель в виде нагреваемой электрическим током спирали. При исследовании малоактивных порошков используется пиротехнический воспламенитель, действие которого основано на выделении тепла в результате окисления алюминия кислородом при разложении перекиси бария.

Экспериментальное определение НКПВ производится путем создания в объеме реакционного сосуда (камеры) облака пыли известной концентрации, зажигания ее и оценки результатов зажигания. Изменяя концентрацию твердой фазы, находят минимальное ее значение, при котором происходит ее воспламенение.

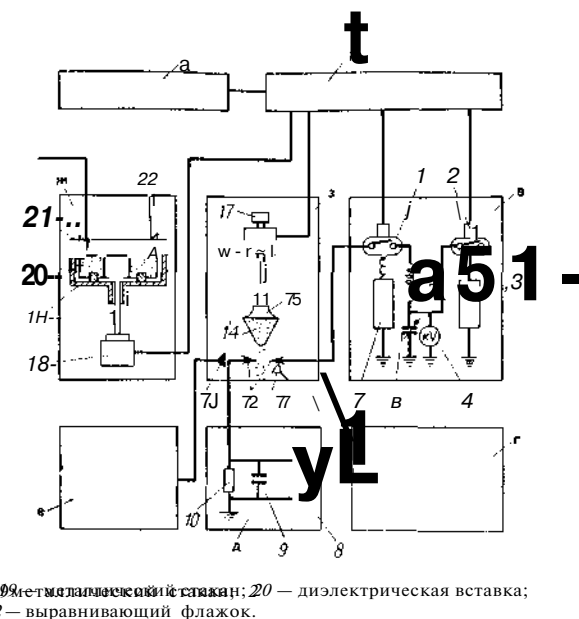
По методике ИПМ АН УССР [41], результаты зажигания оценивают по величине приращения давления, соответствующей опыту, когда воспламенение распространяется на весь объем пыли.

Метод определения НКПВ по проекту ГОСТа предусматривает оценку воспламенения по результатам визуальных наблюдений за распределением пламени в реакционном сосуде, представляющем собой стеклянный цилиндр диаметром  $105 \pm 7$  мм, с толщиной стенки  $9 \pm 1$  мм и высотой  $425 \pm 25$  мм. Температуру воспламенителя измеряют с помощью оптического пирометра.

Температурой воспламенения пыли в этой методике принято считать минимальную температуру воспламенителя (регулируемую в процессе опыта), при которой еще происходит воспламенение. Температура воспламенителя, необходимая для устойчивого горения исследуемого порошка, в зависимости от условий опыта, может значительно превышать температуру воспламенения. Температура воспламенителя по мере увеличения времени нахождения частиц в зоне действия воспламенителя приближается к температуре воспламенения.

РИС. 48. Схема установки для определения минимальной энергии зажигания аэровзвесей и аэрогеля [39]:

Блоки: *a* — питания; *б* — управления; *в* — формирования разрядов; *г* — счета числа воспламенений; *д* — измерения зарядов; *е* — импульсных разрядов; *ж* — зажигания аэровзвесей; *з* — зажигания аэровзвесей; / и 2 — высоковольтные выключатели; 3 — высоковольтный источник питания; 4 — статический киловольтметр; 5 — катушка индуктивности; 6 — высоковольтный конденсатор переменной емкости; 7 — измеритель емкости; 8 — измеритель импульсного напряжения; 9 — конденсатор; 10 — резистор; У/ — датчик счета числа воспламенений; 12 — высоковольтные электрозажигатели; 13 — датчик счетчика числа разрядов; 14 — кожух вибратора; 15 — насадка вибратора; 16 — электромагнит вибратора; 17 — головка вибратора; 18 — электропроводитель; 19 — датчик давления; 20 — диэлектрическая вставка; 21 — высоковольтный электрод; 22 — выравнивающий флажок.



Минимальная энергия зажигания пыли определяется как наименьшая энергия конденсатора, при разряде которого через воздушный промежуток возникает искра, зажигающая пыль с вероятностью, равной 0,01. С помощью этого показателя сравнивают чувствительность различных смесей к воспламенению от внешних источников зажигания. Для определения минимальной энергии зажигания пыли используют установку ВНИИПО (рис. 48). В реакционной камере продуцируют направленный поток пыли с помощью вибропитателя с регулируемой амплитудой колебания. При этом следует отметить, что испытаниям подвергают порошки с частицами мельче 74 мкм. Испытуемый в установке питатель недостаточно эффективно диспергирует порошки, особенно этот недостаток может проявляться в случае высокодисперсных порошков и слипающихся пылей.

Через разрядный промежуток между электродами с заданным интервалом проскакивает искра, которая либо зажигает пыль, если энергия достаточна для этого, либо не зажигает, если энергия недостаточна. Число искровых зарядов фиксируется датчиком, а оператор регистрирует число воспламенений аэровзвеси. Регулируя вибропитателем подачу порошка, определяют, при какой интенсивности подачи возникает наиболее легко воспламеняющаяся пыль. Затем определяют концентрацию твердых частиц, предварительно демонтировав электроды зажигания и на их место установив открытый пробоотборник-отсекатель. Разделив массу частиц, оказавшихся внутри пробоотборника, на объем отсеченного столбика пыли, получают среднюю концентрацию частиц.

За энергию зажигания  $E$  принимаем величину

$$E = 0,5C (U_0^2 - U_p^2)$$

где  $C$  — емкость конденсатора;  $U_0$  и  $U_p$  — напряжение на обкладках конденсатора соответственно до и после разряда.

Вероятность  $P_0$  воспламенения данной дисперсной смеси искрой энергии  $E$  равна

$$P_0 = n - \theta)n.$$

где  $n$  — число опытов, при которых смесь воспламеняется; и  $\theta$  — общее число испытаний на зажигание.

Температуру самовоспламенения пыли, т. е. минимальную температуру взрывеси, при которой происходит ее воспламенение, определяют в трубчатой печи, контролируя температуру в реакционной зоне термомпарой в сочетании с потенциометром [50]. Значения температур самовоспламенения и зажигания порошков и взрывесей некоторых материалов приведены в приложении 7.

Давление, развиваемое при взрыве, и скорость его нарастания могут быть определены на описан-

ной выше установке ИПМАН УССР. Величины  $AP_{\max}$  и  $v_p$  определяют, проводя серию опытов при различ-

ных значениях концентрации частиц, начиная от НКПВ и затем повышая концентрацию с заданным шагом. Для иллюстрации приведены осциллограммы давления

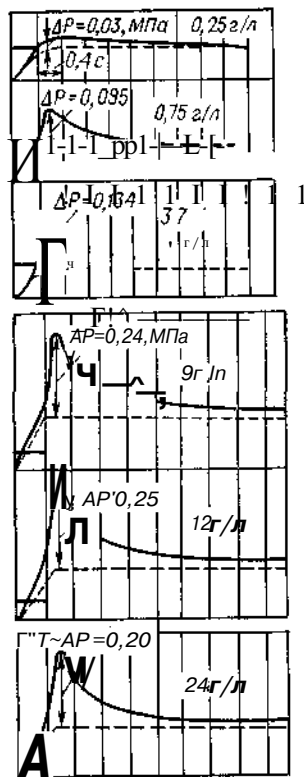


РИС. 49. Осциллограммы давлений взрыва (МПа) фракций порошка железа мельче 5 мкм.

РИС. 50. Зависимость  $AP$  и  $v_p$  от концентрации взвеси порошков железа  $N$ :

1, 1' — аспирационная пыль с частицами мельче 50 мкм; 2, 2' — аспирационная пыль; 3, 3' — тонкий порошок с частицами мельче 50 мкм; 4, 4' — тонкий порошок; 5 — порошок средней крупности с частицами мельче 50 мкм; 1-е —  $DP$ ; 1'-е —  $v_p$ .

взрывов порошков восстановленного железа (рис. 49) и зависимости  $AP$  и  $v_p$  от концентрации (рис. 50).

Как видим,  $AP$  и  $v_p$  при изменении концентрации в области (1 — 6) НКПВ быстро возрастают, а дальнейшее увеличение концентрации приводит лишь к незначительному повышению давления. Достигнув максимума при 14 г/л, оно начинает уменьшаться.

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (окислителя) в взрывеси определяют на описанной выше установке (рис. 46). Для этого предварительно вакуумированную камеру заполняют приготовленной смесью газов из расходного цилиндра. Содержание кислорода контролируют газоанализатором. Вначале с уменьшением концентрации кислорода давление при взрыве снижается медленно, а при дальнейшем снижении концентрации — резко.

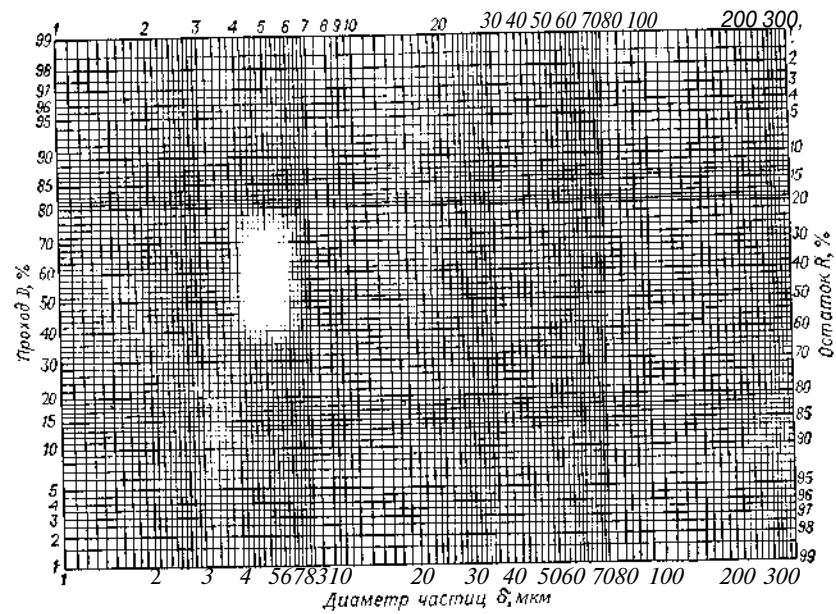
На установке (рис. 48) определяют также минимальную энергию зажигания слоя порошка. Для этого установка содержит специальный блок зажигания.

Показатели взрываемости пылей распространенных органических и неорганических материалов приведены в приложении 7.

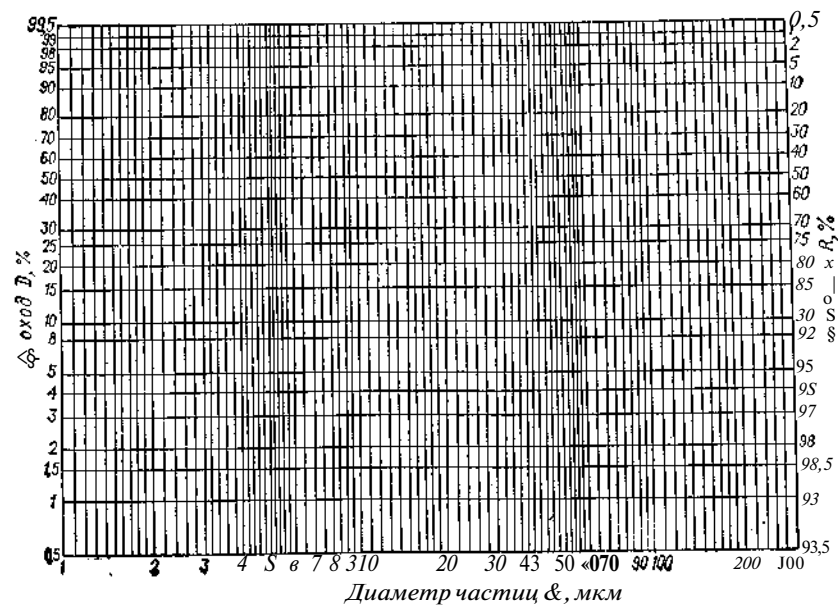


ПРИЛОЖЕНИЕ 1. КООРДИНАТНЫЕ СЕТКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛИ

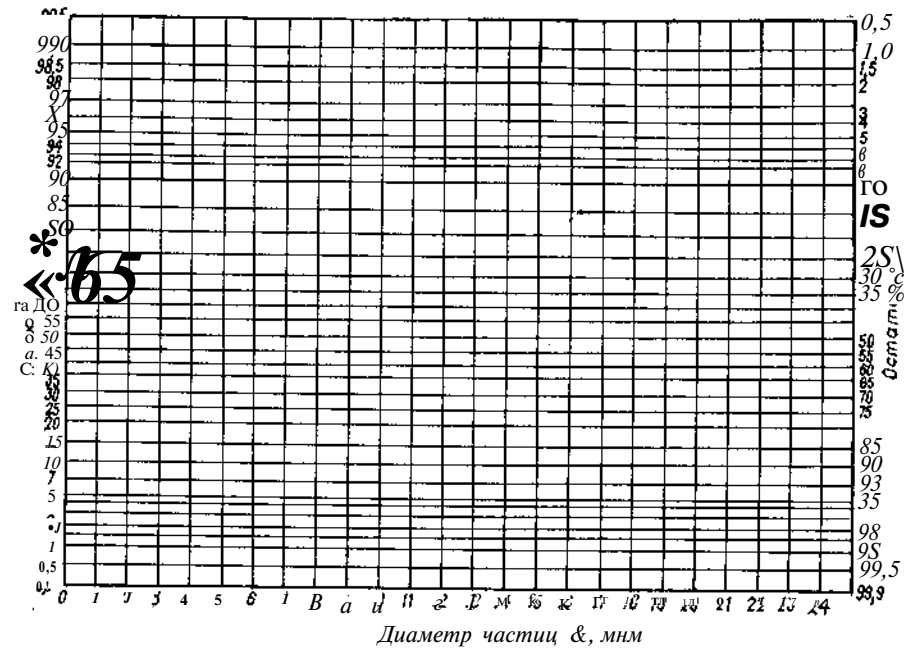
А. ЛОГАРИФИЧЕСКИ ВЕРОЯТНОСТНАЯ КООРДИНАТНАЯ СЕТКА



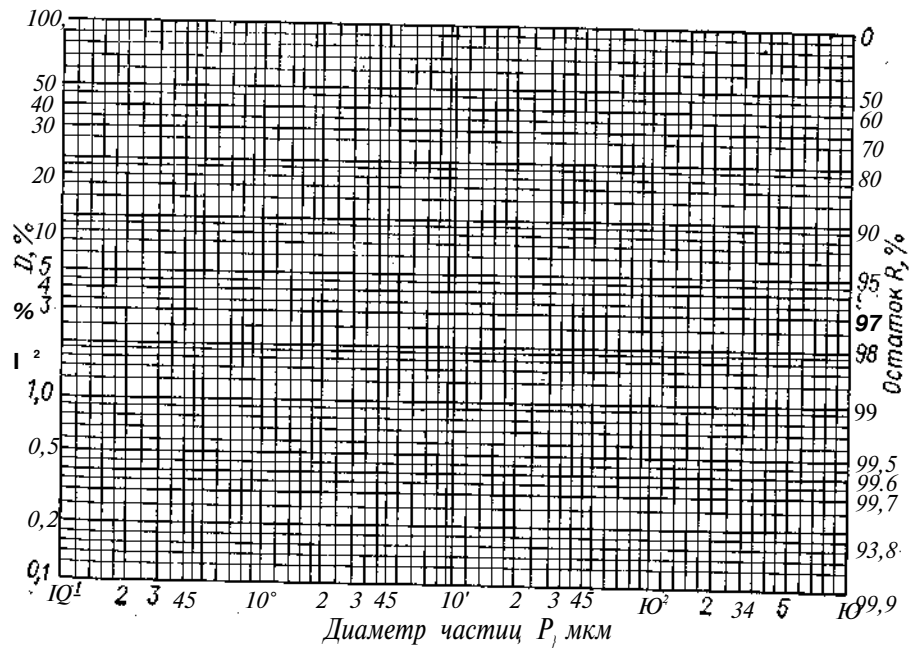
Б. ДВОЙНАЯ ЛОГАРИФИЧЕСКАЯ КООРДИНАТНАЯ СЕТКА



В. КООРДИНАТНАЯ СЕТКА РОМАШОВА



Г. ЛОГАРИФИЧЕСКАЯ КООРДИНАТНАЯ СЕТКА





Материал	Дисперсионная жидкость	Стабилизатор
Глинозем	Дистиллированная вода	Оксалат натрия
	То же	Силикат натрия 2%
	»	П. 0,003 моль/л
	»	Тринатрийфосфат
Доломит	»	Линолеат натрия 0,5%
	Четыреххлористый углерод	—
	Этиловый спирт	—
	Дистиллированная вода	П. 0,003 моль/л
Доломит обожженный	То же	Тринатрийфосфат
	»	Аммиак водный 25%-ный
Дрожжи кормовые	Ксилол	Олеиновая кислота 60 мг/л
	Изобутиловый спирт	—
Железный колчедан (пирит)	Этиленгликоль	—
Железо	Масло соевое и ацетон (1:1 по объему)	—
Земля формовочная	Дистиллированная вода	Тринатрийфосфат
	То же	Едкий натр
Зерно (пыль от перера- ботки)	Изобутиловый спирт	—
	Дистиллированная вода	П. 0,002 моль/л
	То же	П. 0,005 моль/л
	»	Кремнекислый натрий 0,2%
Известняк	»	Кремнекислый натрий 2% и лимоннокислый калий 0,1 моль/л
	Этиловый спирт абс.	—
	Керосин	—
	Циклогексанол	—
Известь обожженная	Циклогексанол	—
	Циклогексанол	—
Какао	Дистиллированная вода	—
	Ксилол	—
Кальция карбонат	Этиленгликоль	—
	Дистиллированная вода	—
Кальция оксид	То же	Оксалат натрия
	»	Тринатрийфосфат
Кварц	Этиловый спирт абс.	—
	То же	Линолеат натрия 1%
Керамзит	»	Тринатрийфосфат
	Изобутиловый спирт	—
Кокс	Дистиллированная вода	П. 0,002 моль/л
	То же	Тринатрийфосфат
Корунд	Глицерин	—
	Дистиллированная вода	П. 0,002 моль/л
Крахмал	То же	Аммиак водный 25%-ный
	Литопон	»
Магнезит	Этиловый спирт	»
	Дистиллированная вода	П. 0,002 моль/л
Магний	То же	Аммиак водный 25%-ный
	Дистиллированная вода	П. 0,002 моль/л
Марганца оксид	То же	П. 0,001—0,003 моль/л
	Бензин	—

Материал	Дисперсионная жидкость	Стабилизатор
Медь (порошок)	Ацетон	—
	Бутиловый спирт	—
Мел	Этиловый спирт	—
	Дистиллированная вода	П. 0,002 моль/л
	То же	—
	»	Силикат натрия 2%
Минеральные краски	»	Цитрат натрия 0,1 г/л
	Ацетон	—
	Дистиллированная вода	Тринатрийфосфат
	Изобутиловый спирт	—
Мука	Дистиллированная вода	П. 0,003 моль/л
	Наждак	—
Огарок (мартеновая пыль)	Этиловый и изобутиловый спирт	—
	Олово	—
Пемза	Бутиловый и изоамиловый спирт	—
	Дистиллированная вода	Тринатрийфосфат
Пыль отходящих газов цементных заводов	Циклогексанол	—
	Пыль строительно-дорожная	—
Свинцовые краски	Этиловый спирт абс.	—
	Керосин	—
Свинцовый сурик	Дистиллированная вода	П. 0,001—0,003 моль/л
	То же	П. 0,001—0,003 моль/л
Силикаты н. р. в.	Циклогексанол	—
	Этиленгликоль	—
Стекло	Дистиллированная вода	П. 0,001 моль/л
	То же	П. 0,005 моль/л
Стиральный порошок	»	—
	»	Тринатрийфосфат
Тальк	Циклогексанол	—
	Этиленгликоль и дистиллированная вода	—
Титана двуокись	Дистиллированная вода	П. 0,002 моль/л
	Циклогексанол	—
Титановые белила	Дистиллированная вода	П. 0,003
	Керосин	—
Торф	То же	—
	Торфная зола	—
Тяжелых металлов соединений	Дистиллированная вода	П. 0,002 моль/л
	Уголь активный	—
Уголь бурый (лигнит)	Изопропиловый спирт	—
	Уголь древесный	Циклогексанол и 10% этилового спирта
Уголь каменный	Изобутиловый спирт	—
	Дистиллированная вода	Линолеат натрия 1%
Уголь каменный (летучая зола)	Этиловый спирт	—
	Ацетон	—
Хромовые краски	Керосин	—
	Этиловый спирт абс.	—
Цемент	Керосин	—
	Дистиллированная вода	Тринатрийфосфат
Цемент (портланд)	То же	П. 0,001—0,002 моль/л
	Керосин	—
	Бензол	—
	Этиловый спирт абс.	Хлорид кальция 0,002 моль/л









**ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ПЕРЕЧЕНЬ ПРИБОРОВ, ОБОРУДОВАНИЯ,  
ХИМИЧЕСКОЙ ПОСУДЫ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ**

Наименование; тип, марка; техническая документация	Необходимое количество
Секундомер механический (ГОСТ 5072—79)	2
Набор термометров для измерения температуры от 0 до 600 °С	4
Термопары хромель-копелевые (ГОСТ 6616—74) длиной 1, 2, 4 м с необходимыми компенсационными проводами, милливольтметрами	2
Весы аналитические ВЛР-200/0,1	3
Весы лабораторные технические 1-го класса (ТУ 25-06-385-68)	1
Набор гирь аналитических Г-2-210 (ГОСТ 7328—73)	3
Набор денсиметров для определения плотности жидкости с пределом измерения 9,65—2 г/см <sup>3</sup> (ГОСТ 1300-74)	2
Реометр лабораторный РДС со сменными диафрагмами на 5—40 л/мин (ГОСТ 9932—75Е)	2
Ротаметры РС-3 (ГОСТ 13045—67)	4
Тахометр стробоскопический СТ-5 (ТУ 25-04-1112-69)	2
Пневмометрические трубки длиной 0,5; 1,5; 3 м	6
Микроанометр ММН	2
Манометр воздушный ОБМ 1-100 (ГОСТ 8625—77)	2
Манометры U-образные жидкостные (ГОСТ 9933—75Е) со шкалой делением 100, 300, 500 и 1000 мм	8
Вакуумметр (ГОСТ 8625—77)	1
Барометр-анероид БАММ-1 (ТУ 25-04-1618—72)	2
Психрометр с двумя термометрами	2
Гигрометр волосной	2
Вискозиметр ВПЖ-1 (ГОСТ 10028—67)	1
Седиментограф жидкостной	2
Установка лабораторная для разделения формовочных песков на фракции, модель 029	1
Набор сит, модель 026 (ГОСТ 3584—73)	2
Стержень латунный (диаметр 2—3 мм, длина 5—10 мм, латунь по ГОСТ 2060—73)	20
Кубик резиновый со стороной 3—5 мм (резина по ГОСТ 17133-71)	20
Пипеточный прибор с подъемной пипеткой ПП-1	2
Анализатор ротационный РАД-1	2
Распылитель эжекторного типа	2
Струйный сепаратор (импактор)	2
Прибор ПСХ-2	1
Прибор Товарова Т-1	1
Газоанализатор	1
ГПК-3М	1
ВТИ-2 (ГОСТ 7018-75)	1
Колориметр-нефелометр фотоэлектрический ФЭК-56 (ГОСТ 12083-78)	1
Устройство для определения разрывной прочности пылевых слоев	1
Устройство для определения смачиваемости пыли (пленочная флотация)	1

Продолжение

Абразивметр центробежный	1
Тераомметр ЕК-6-3 или ЕК-14-7	1
Измерительная ячейка <sup>1</sup> для определения УЭС пыли в лаборатории	1
Измеритель сопротивления пыли ИСП-1	1
Микроамперметр	
М-265 (ГОСТ 8711-78)	2
М-1201 (ГОСТ 8711—78) с пределом измерений 0,3—750 мА	2
Заборная трубка	2
Патрон с обогревом для тканевого фильтра	4
Циклончик ВТИ для отделения грубых фракций пыли при отборе проб	2
Потенциометр КСП-4	2
Термостат ТС-16А	2
Сушильный шкаф с регулируемым нагревом до 150 °С	3
Камера с регулируемым обогревом до 350 °С	1
Центрифуга лабораторная стационарная ЦЛС-3	1
Виброуплотнитель	1
Ультразвуковая установка УЗДН-1	2
Побудители тяги:	3
ротационная воздуходувка РВ-45	
аспиратор ЭА-30	
эжектор	
Насос вакуумный механический (ГОСТ 14707—77)	1
Источник питания постоянного тока Б 5-50	1
Источник высокого напряжения ВС-23	1
Источник высокого выпрямленного напряжения ВС-20-10	1
Трансформатор лабораторный ЛАТР	1
Трансформатор котельного типа со вторичным напряжением 12 В, мощностью 300 Вт	1
Тумблер ТП 1-2	5
Провод экранированный МГСЛЭ (ГОСТ 10349—75)	10 м
Кабель высоковольтный РК-75-7-22 (ТУ КП-100-101—60)	10 м
Эксикатор диаметром 230 мм (ГОСТ 6371—73)	16
Пикнометры ПТТ на 25 и 50 см <sup>3</sup>	8
Цилиндры мерные стеклянные (ГОСТ 1770—74)	
на 50—100 см <sup>3</sup>	4
на 500 см <sup>3</sup>	4
на 100Э см <sup>3</sup>	4
Цилиндр для ареометров (ГОСТ 9545—73)	5
Стаканчик для взвешивания (бюкс) на 50 см <sup>3</sup> (ГОСТ 10394—72)	40
Колба для фильтрования под вакуумом (ТУ 25-11-434-69)	2
Стакан химический на 50—100 см <sup>3</sup> (ГОСТ 10028—67)	20
Пипетки на 5, 10, 15, 20 см <sup>3</sup> (ГОСТ 1770—74)	8
Воронка стеклянная диаметром 5, 7, 9 мм	8
Сосуд стеклянный диаметром 200 и высотой 70 мм	2
Воронка Шотта № 3 (ГОСТ 9775—69)	5
Чашка Петри	4
Термостатирующий сосуд диаметром 12—15 см, высотой 80 см	5
Переходы, тройники, соединительные трубки разных размеров	20
Совок или шпатель для засыпки пыли	4
Пинцет медицинский (ГОСТ 21241—77)	4

Линейка (ГОСТ 427-75) 2  
 Шланг резиновый диаметром 6 мм с грушей 4  
 Шланг резиновый диаметром 6, 9, 12 мм 20 м  
 Зажимы винтовые, краны 2- и 3-ходовые 12

Продолжение

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. ПАСПОРТА ПЫЛЕЙ

Принятые обозначения

$t_r$  — температура газа перед системой пылеулавливания, °C  
 $u_r$  — скорость газа в газоходе, м/с  
 $Z$  — запыленность газового потока, г/м<sup>3</sup>  
 $f$  — влагосодержание газа, г/м<sup>3</sup> сухого газа;  
 $v$  — диаметр частиц пыли, мкм  
 $g$  — содержание частиц диаметром более 6, % (масс.)  
 $O_j$  — скорость витания частиц пыли в воздухе при 20 °C, см/С  
 $6_{50}$  — медианный диаметр, мкм  
 $\sigma$  — стандартное отклонение  
 $S$  — удельная поверхность, см<sup>2</sup>/г  
 $P_y$  — плотность материала частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_{н.н.}$  — насыпная плотность в неуплотненном состоянии, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_{т.т.}$  — насыпная плотность при максимальном уплотнении, кг/м<sup>3</sup>  
 $a_{ст}$  — статистический угол естественного откоса (угла обрушения), град.  
 $a_d$  — динамический угол естественного откоса, град.  
 $P$  — разрывная прочность (слипаемость) слоя пыли, Па  
 $K$  — коэффициент абразивности (в пересчете на сталь Ст3), м<sup>2</sup>/кг  
 $УЭС$  — удельное электрическое сопротивление слоя пыли, Ом·м  
 п.п.п. — потери при прокаливании  
 $Q_{н.н.}$  — низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг  
 ЛР — зольность топлива, %  
 деФ — влажность топлива, %  
 SP — общее содержание серы в топливе, %

1. Обожженный доломит

Пылеобразующий агрегат — печь обжига доломита (производительность 10 т/ч).

Место и способ отбора пробы — известково-доломитный цех металлургического завода. Проба отобрана из газохода перед электрофильтром методом внутренней фильтрации.

Дата ... Условия в газоходе:  $t_r = 250^\circ\text{C}$ ;  $v_r = 14$  м/с;  $Z = 87$  г/м<sup>3</sup>;  $\sigma = 109$  г/м.

Дисперсный состав

Метод анализа — ротационная сепарация в промышленных условиях.

6, мкм	2,5	4,0	6,3	10	16	25	40	63
g, % (масс.)	95	92	89	80	69	50	26	10
$v_{50}$ , см/с	0,05	0,14	0,35	0,89	2,3	5,0	14	35

$6_{50} = 50$  мкм;  $S = 3400$  см<sup>2</sup>/г

Механические свойства

$\rho_t = 2960$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{н.н.} = 980$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_y = 1220$  кг/м<sup>3</sup>;  $a_{ст} = 57^\circ$ ;  $a_d = 36^\circ$ ;  
 $P = 116$  Па;  $K = 4,28 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/кг

УЭС слоя пыли при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	100	150	200	250
УЭС, Ом · м	3-Ю <sup>3</sup>	3,1-17 <sup>7</sup>	2,5-10 <sup>9</sup>	2,1 · 10 <sup>10</sup>	1-Ю <sup>10</sup>	9,1 · 10 <sup>9</sup>

Химический состав

Компоненты	п.п.п.	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	
Содержание, % (масс.)		12,2	3,4	1,8	0,7	39	30,5	0,2	0,5	2,2

Равновесная влажность пыли  $\Phi_n$  при различной относительной влажности воздуха  $\Phi_a$

$\Phi_a, \%$	Ю	20	40	60	80	95
$\Phi_n, \%$	0,06	0,11	0,18	0,44	1,1	2,1

Смачиваемость 99% — Метод анализа — пленочная флотация.

Примечание: сырье — доломит Шелковского месторождения.

2. Летучая зола угля марки БСШ

Пылеобразующий агрегат — котел БКЗ 210-140-Ф5 (температура в топке 1330 °C).

Место и способ отбора пробы — ТЭЦ. Проба отобрана из газохода перед электрофильтром методом внешней фильтрации.

Дата ... Условия в газоходе:  $t_r = 172^\circ\text{C}$ ;  $Z = 4,24$  г/м<sup>3</sup>; содержание в газе, % (об.): RO<sub>2</sub> = 14,6, O<sub>2</sub> = 4,1.

Дисперсный состав

Метод анализа — ротационная сепарация в промышленных условиях.

6, мкм	2,5	4,0	6,3	10	16	25	40
g, % (масс.)	98	96	90	79	63	40	14
$v_{50}$ , см/с	0,04	0,1	0,3	0,7	1,9	4,5	11,6

$6_{50} = 22$  мкм;  $a = 2,74$ ;  $S = 2000$  см<sup>2</sup>/г

Механические свойства

$\rho_t = 2400$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{н.н.} = 1090$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_y = 1260$  кг/м<sup>3</sup>;  $a_{ст} = 52^\circ$ ;  $a_d = 38^\circ$ ;  
 $P = 48$  Па;  $K = 3,18 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/кг

УЭС слоя пыли при различных температурах

$t, ^\circ\text{C}$	20	50	100	150	200	250
УЭС, Ом · м	1-Ю <sup>8</sup>	1,8 · 10 <sup>8</sup>	6-Ю <sup>8</sup>	2,8 · 10 <sup>9</sup>	3,5 · 10 <sup>9</sup>	1,2 · 10 <sup>9</sup>

Химический состав

Компоненты	п.п.п.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	
Содержание, % (масс.)		2,2	51,5	19	5,9	13,3	1,75	1,0	3,6	1,15	0,65

Равновесная влажность пыли  $\Phi_n$  при различной относительной влажности воздуха  $\Phi_a$

$\Phi_a, \%$	Ю	20	40	60	80	95
$\Phi_n, \%$	0,17	0,2	0,28	0,42	0,46	0,87

Смачиваемость 82%.

Примечание: данные по топливу:  $Q_{н.н.} = 13,1$  МДж/кг,  $A^p = 9,5\%$ ,  $G^p = 40\%$

3. Угольная пыль

Пылеобразующий агрегат — барабанная сушилка.

Место и способ отбора пробы — горно-обогатительная фабрика. Проба отобрана из бункера циклона.

Дата ... Условия в газоходу перед циклоном:  $t_r = 60 \text{--} 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $Z = 1 \text{--} 30 \text{ г/м}^3$ ;  $\rho = 200 \text{--} 280 \text{ г/м}^3$ .  
 Состав газа, % (об.):  $\text{RO}_2 - 4$ ;  $\text{H}_2\text{O} - 20$ ;  $\text{O}_2 - 16$ ;  $\text{N}_2$  — остальное.

**Дисперсный состав**

Метод анализа — ситовой

6, мкм	50	100	200	400	630
g, % (масс.)	82	68	48	32	8

**Механические свойства**

$\rho_s = 1970 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{s,y} = 695 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_y = 900 \text{ кг/м}^3$ ;  $\alpha_{ct} = 61^\circ$ ;  $\alpha_d = 44^\circ$ ;  
 $P = 50 \text{ Па}$ .

**УЭС слоя пыли при 20 °C**

2,9-Ю<sup>3</sup> Ом-м

**Химический состав**

Компоненты	п.п.п.	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	RO	CaO
Содержание, % (масс.)	71	17,2	7,4	1,1	1,9	0,6

Равновесная влажность пыли  $\phi_n$  при различной относительной влажности воздуха  $\phi_a$

$\phi_n$ , %	Ю	20	40	60	80	95
$\phi_a$ , %	0,4	0,7	1,4	2,1	3,1	4,7

Смачиваемость 36%- Метод анализа — пленочная флотация

Примечание: сушке подвергается уголь Карагандинского бассейна  
 $Q_{H_2}^P = 20 \text{ МДж/кг}$ ,  $L^P = 30,0 \%$ ,  $SP = 0,83 \%$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 7. ПОКАЗАТЕЛИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ВЗРЫВАЕМОСТИ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Таблица 1. Температура воспламенения дисперсных смесей**

Вещество твердой фазы	Размер частиц, мкм	Температура, °C			
		самовоспламенения		зажигания	
		порошка в слое	аэро-взвеси	порошка в слое	аэро-взвеси
Кремний	$d < 74$	790	—	—	770
Магний	$\phi_{50} = 58$	510	350	320	—
Алюминий (99%)	$\phi_{50} = 9$	320	680	220	670
Железо восстановленное (98,5%)	$\phi_{50} = 35$	220	310	300	300
Цирконий	$rf = 3$	190	20	180	—

Примечание:  $d$  и  $\phi_{50}$  — соответственно средний квадратичный и медианный диаметры.

**Таблица 2. Характеристики взрываемости пылей органических материалов**

Наименование	Содержание массы частиц < 74 мкм, %	Влажность, %	Зольность, %	Температура самовоспламенения, °C	Пб, х	Литературный источник
Пыль пшеницы:						
из аспирационных систем	36	6,2	2,6	715	12,6	50
из пылевых камер фильтров	—	10,5	17,5	734	22,7	50
Молоко сухое	32	9,3	2,6	—	30,2	50
Древесная мука	97	3,8	5,6	875	7,6	50
74—100 мкм	—	6,4	1,5	—	12,6—25	50
Стиральный порошок «Новость»	40	3,0	58,3	790	37,8	50
Пыль резиновая (шлифовальная) 850 мкм	1	—	41,3	1000	10,1	51
Тульский уголь (пыль из вентилиционной камеры)	66	0,7	67,5	1000	37,5	50
Подмосковный уголь (отложения пыли на оборудовании)	100	10,4	31,9	946	114	50
Черемховский уголь (полукоксая пыль)	54	4,0	9,7	1100	500	50
Донбасский уголь (осевшая пыль)	—	1,2-2,6	16,3-22,4	—	50	47

**Таблица 3. Характеристики взрываемости аэрозвесей порошков неорганических материалов [40]**

Материал	Размер частиц, мкм	Температура воспламенения, °C	$\phi_{H_2}$ и $\phi_{O_2}$	Максимальное давление при взрыве, МПа	Скорость нарастания давления, максимальная, кПа/с	Минимальная энергия зажигания, мДж	Предельное объемное содержание кислорода в азоте, %
Алюминиевая пудра ПАП-2	< 20	540	45	780	19 700	0,047	6,5
Алюминий сферический АСД	< 50	780	50	650	8 300	0,047	6,0
Алюминиевомагний-вый сплав	< 50	530	2	600	—	0,047	3,0
Бор	< 44	470	100	630	17 000	60	—
Бронзовая пудра	< 53	370	1000	300	9 000	—	—

Продолжение

Материал	Размер частиц, мкм	Температура воспламенения, °И	ρ, г/м³	Максимальное давление при взрыве, кПа	Скорость нарастания давления, максимальная, кПа/с	Минимальная энергия зажигания, мДж	Предельное объемное взрывозапасное содержание кислорода в азоте,
Ванадий	< 74	860	150	620	—	280	15,0
Железо восстановленное порошок, отожженный в водороде при 700 °С	< 50	270*	76	280	2 840	6,8	12,0
Железо распыленное чистое	< 50	270*	79	270	2 640	—	13,0
Кремний	< 74	770	100	575	8 300	21	11
Магний	< 74	450	10	660	—	0,025	0*
Марганец	< 44	400	90	390	3 700	180	—
Сера	< 74	205	10,7	360	20 000	—	—
Титан	< 40	330	25	500	—	10	0
Торий	7	270	75	350	—	5	2
Феррованадий	< 74	440	1300	—	—	400	17**
Ферромарганец	< 50	495*	76	320	5 000	—	7,8
Ферросилиций (Si - 75%)	< 50	860	150	350	3 500	280	15
Ферротитан	< 50	550*	90	420	8 000	—	10
Цирконий	3-6	20	40	450	—	5	3*

\* В аргоне.

\*\* В СО<sub>2</sub>.

з\* Температура самовоспламенения отложений.

в аргоне

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Авдеев Н. Я.* Расчет гранулометрических характеристик полидисперсных систем. Ростов-на-Дону: Ростовское книжное изд-во, 1966.
2. *Алексеевский А. И.* Количественный анализ. М.: Химия, 1968.
3. *Андрянов Е. И., Зимон А. Д., Янковский С. С.* — Зав. лаб., 1972, т. 38, № 3, с. 376.
4. *Андрянов Е. И., Зимон А. Д., Янковский С. С.* — Колл. журн., 1970, т. 32, № 6, с. 801.
5. *Бакланов Г. М.* Снижение запыленности на цементных заводах. Киев: Будивельник, 1965.
6. *Балабанов Е. М.* Дисперсные системы в электрическом поле коронного разряда. Автореф. докт. дисс. М.: ФИАН, 1964.
7. *Баранов П. А., Строганова З. И.* — В кн. трудов ВИАУ, 1955, вып. 17, с. 38—42.
8. *Батунер Л. М., Позин М. Е.* Математические методы в химической технике. Л.: Химия, 1971.
9. *Богатырев М. Ф., Тонконогий А. В.* — Цветные металлы, 1974, № 11, с. 47—51.
10. *Братчиков В. Н.* — Теплоэнергетика, 1971, № 3, с. 20—22.
11. *Булгакова Н. Т., Зеликсон Д. Л.* — Пром. и сан. очистка газов, 1979, № 3, с. 19—20.
12. Бюллетень научно-технической информации ВНИИ металлургической теплотехники. № 4, М.: Металлургия, 1957.
13. *Вайсман Б. А.* — В кн.: Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. Сб. 9. Алма-Ата: Наука, 1973, с. 33—38.
14. *Вдовенко М. И.* Минералогическая часть энергетических углей. Алма-Ата: Наука, 1978.
15. *Вдовенко М. И., Бояхунов А. Я., Чурсина Н. Я.* Загрязнение и износ поверхностей нагрева парогенераторов. Алма-Ата: Наука, 1978.
16. *Велецкий Р. К., Григина Н. Н.* Измерение параметров пылегазовых потоков в черной металлургии. М.: Металлургия, 1979.
17. *Гордон Г. М., Пейсахов И. Л.* Контроль пылеулавливающих установок, М.: Металлургия, 1979.
18. *Гордон Г. М., Пейсахов И. Л.* Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. М.: Металлургия, 1977.
19. *Горячев И. К.* Фильтровальные материалы для очистки газов, М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1980.
20. *Езерский М. Л., Письменная Г. М.* — Хим. фарм. журн., 1972, № 9, с. 50—54.
21. *Г. Ермилов И. В.* — Пром. и сан. очистка газов, 1977, № 1, с. 5—7.
22. *Ермилов И. В.* — В кн.: Доклады II советско-американского симпозиума по технологии очистки газов от твердых частиц. Т. 1. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1977.
23. *Зимон А. Д.* Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1976.
24. *Зимон А. Д., Андрянов Е. А.* Аутогезия сыпучих материалов. М.: Металлургия, 1978.
25. Измерения в промышленности. Справочник. М.: Металлургия, 1980.
26. Инструкция по определению запыленности газов в производственных условиях, М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1980.
27. *Кизим И. А., Решидов И. К.* — В сб.: Промышленная очистка газов и аэродинамика пылеулавливающих аппаратов. Ярославль: Верхне-Волжское книжное изд-во, 1975, с. 72—76.
28. *Киреев В. А.* Краткий курс физической химии, М.: Госхимиздат, 1963.
29. Контрольные сита сверхтонких фракций. Проспект НП Бад. Блукенбург, ГДР.

30. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1974.
31. Коузов П. А., Крылова Л. П., Семенов Ю. В. — В кн.: Комплексные проблемы охраны труда. Сб. научных работ институтов охраны труда ВЦСПС. М.: Профиздат, 1979, с. 41—46.
32. Кравец Д. Р., Китайник Э. А., Шанин М. П. — Пром. и сан. очистка газов, 1980, № 1, с. 23.
33. Краткая химическая энциклопедия. М: Советская энциклопедия, 1961.
34. Кузнецов И. Е., Троицкая Т. М. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятий. М: Химия, 1979.
35. Лебедев Г. К., Янковский С. С., Булгакова Н. Г., Градус Л. Я. — Пром. и сан. очистка газов, 1979, № 5, с. 18—19.
36. Липец М. Я. — Зав. лаб., 1945, № 5, с. 45—48.
37. Мелкумян В. Е. Измерение и контроль влажности материалов. М.: Изд-во стандартов, 1970.
38. Методика испытания котельных установок. М.: Энергия, 1964.
39. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. М.: Химия, 1979.
40. Недин В. В., Нейков О. Д., Алексеев А. Г. — В кн.: Предупреждение внезапных взрывов газодисперсных систем. Киев: Наукова Думка, 1971, с. 7—25.
41. Недин В. В., Нейков О. Д., Алексеев А. Г., Кривцов В. А. Взрывоопасность металлических порошков. Киев: Наукова Думка, 1971.
42. Нормативный метод расчета электрофильтров. РТМ-26-14-2—80.
43. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. М.: Недра, 1977.
44. Охрана природы. Атмосфера. Электрофильтры. Способ определения удельного электрического сопротивления. РТМ 26-14-07—77.
45. Павловский Е. И. — Пром. и сан. очистка газов, 1976, № 4, с. 48.
46. Пестов Н. Е. Физико-химические свойства зернистых и порошкообразных химических продуктов. М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1947.
47. Петрухин П. М., Нецелляев М. И., Качан В. Н., Сергеев В. С. Предупреждение взрывов пыли в угольных шахтах. М.: Недра, 1974.
48. Петрянов И. В. и др. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. М.: Знание, 1968.
49. Плотинский И. Ш. — В кн.: Сборник материалов по пылеулавливанию в цветной металлургии. М.: Metallurgizdat, 1957.
50. Пожарная опасность веществ и материалов. Справочник/Под ред. И. В. Рябова. М.: Стройиздат, 1966.
51. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности. Справочник/Под ред. И. В. Рябова. М.: Химия, 1970.
52. Пыль промышленная. Лабораторные методы исследования физико-химических свойств. РТМ 26-14-10—77.
53. Рабинович Ф. М. Кондуктометрический метод дисперсного анализа. Л.: Химия, 1970.
54. Ребиндер П. А. Поверхностно-активные вещества. М.: Знание, Серия IX, 1961.
55. Ромашов Г. И. Основные принципы и методы определения дисперсного состава промышленных пылей. Л.: ЛИОТ, 1935.
56. Русаков А. А., Урбах И. И., Асостасиади А. П. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике. М.: Энергия, 1969.
57. Русаков А. А., Янковский С. С. Импакторы для дисперсионного анализа промышленных пылей. М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1970, с. 52.
58. Скрябин Г. М. — В кн.: Сборник докладов межобластного семинара по очистке газов. Ярославль: Верхне-Волжское книжное изд-во, 1972, с. 3—6.
59. Скрябин Г. М. — Пром. и сан. очистка газов, 1976, № 4, с. 47.
60. Скрябина Л. Я. — Пром. и сан. очистка газов, 1976, № 4, с. 49.
61. Скрябина Л. Я.; Коузов П. Л. — В кн.: Очистка от пыли удаляемого и приточного воздуха производственных помещений. Л.: ЛДНТП, 1975.
62. Скрябина Л. Я., Рожкова А. А. — Пром. и сан. очистка газов, 1977, № 6, с. 22—24.
63. Скрябина Л. Я. Атлас промышленных пылей. Ч. I—III. ЦИНТИХимнефтемаш, 1980—1982.
64. Справочник химика. Т. III. Л.: Химия, 1964.
65. Товаров В. В. — Зав. лаб., 1953, № 5, с. 620.
66. Топольская И. М., Самсонов В. Т. — В кн.: Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. М., 1971, вып. 73, с. 34—40.
67. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М.: Химия, 1967.
68. Физико-химические свойства пыли промышленности нерудных строительных материалов. Справочник. Новороссийск, 1974.
69. Ходаков Г. С. Основные методы дисперсионного анализа порошков. М., Стройиздат, 1968.
70. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению и эксплуатации. Ярославль: Верхне-Волжское книжное изд-во, 1971.
71. Юрова М. А., Федорова К. П. — В кн.: Вопросы гигиены труда, профпатологии и промышленной токсикологии. Т. 5. Свердловск, Свердловский ин-т гигиены труда и профпатологии, 1959.
72. Янковский С. С., Булгакова Н. Г., Абросимов Ю. В. — Пром. и сан. очистка газов, 1978, № 3, с. 21—22.
73. Янковский С. С., Лагутенко В. А., Поляков В. А., Абросимов Ю. В. — Пром. и сан. очистка газов, 1977, № 1, с. 19.
74. Feinheitbestimmung von technischen Stauben. UDI — Richtlinien, Dusseldorf, 1962.
75. Jones T. M., Pilpel N. — i. Pharm. a. Pharmacol., 1965, v. 17, p. 440—448.
76. Probenahme von Rohstoffen und Massen. — DIN; 51062, 1952.
77. Quitter V. — Staubkartei. Magdeburg, Betrieb «Edgar Andre», 1970.
78. Walker A. B. — J. of the Air Pollution Control Association 1976, v. 15, №6, p. 256-260.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
Глава 1. Основные понятия и определения. Отбор проб пыли для анализа . . . . .	6
1.1. Основные понятия и определения . . . . .	6
1.2. Отбор проб пыли из газового потока . . . . .	7
Общие положения . . . . .	7
Выбор участка газотока и разбивка его сечения . . . . .	9
Конструкция устройств для отбора проб . . . . .	11
Подготовка к отбору пробы . . . . .	15
Отбор пробы . . . . .	19
1.3. Отбор проб порошкообразного материала или уловленной пыли . . . . .	21
1.4. Подготовка пробы пыли к анализу . . . . .	22
Глава 2. Определение плотности пыли . . . . .	24
2.1. Общие сведения . . . . .	24
2.2. Определение пикнометрическим способом . . . . .	25
2.3. Определение манометрическим способом . . . . .	27
2.4. Определение насыпной плотности . . . . .	29
Глава 3. Определение дисперсного состава пыли . . . . .	31
3.1. Основные понятия и определения . . . . .	31
3.2. Оформление результатов анализа . . . . .	32
3.3. Формулы для описания дисперсного состава пыли . . . . .	33
3.4. Ситовой анализ . . . . .	35
3.5. Седиментометрические методы . . . . .	37
Классификация и основные положения . . . . .	37
Анализ пыли подъемной пипеткой ПП-ПЛИОТ . . . . .	42
Анализ пыли жидкостным седиментографом НИИОГАЗ . . . . .	47
Анализ высокодисперсной пыли при помощи стационарной лабораторной центрифуги . . . . .	51
3.6. Методы воздушной сепарации . . . . .	51
Анализ пыли ротационным анализатором дисперсности РАД-1 5& . . . . .	5&
Анализ пыли струйным сепаратором . . . . .	63
Глава 4. Определение удельной поверхности пыли . . . . .	68
4.1. Общие сведения . . . . .	68
4.2. Определение удельной поверхности методом воздухопроницаемости слоя при давлении близком к атмосферному . . . . .	69
Основные положения . . . . .	69
Определение удельной поверхности прибором ПСХ-2 . . . . .	70
Определение удельной поверхности прибором Товарава . . . . .	71
Глава 5. Определение показателей слипаемости и сыпучести пыли . . . . .	74
5.1. Слипаемость пыли . . . . .	74
Основные положения . . . . .	74
Определение разрывной прочности слоя пыли методом разъемного цилиндра . . . . .	76
5.2. Сыпучесть пыли . . . . .	78
Основные положения . . . . .	78
Определение статического угла естественного откоса . . . . .	79
Определение динамического угла естественного откоса . . . . .	80
Глава 6. Гигроскопичность и смачиваемость пыли . . . . .	82
6.1. Гигроскопические свойства пыли . . . . .	82
Общие сведения . . . . .	82
Определение гигроскопической влаги пыли высушиванием . . . . .	83
Определение равновесной влажности пыли (изотерм сорбции) . . . . .	84
6.2. Смачиваемость пыли . . . . .	87
Общие сведения . . . . .	87
Определение смачиваемости пыли методом пленочной флотации . . . . .	88
Определение смачиваемости пыли методом капиллярного впитывания . . . . .	90
Глава 7. Абразивность пыли . . . . .	91
7.1. Общие сведения и расчетные зависимости . . . . .	91
7.2. Определение коэффициента абразивности пыли . . . . .	93
Глава 8. Удельное электрическое сопротивление пыли . . . . .	95
8.1. Влияние электрической проводимости слоя пыли на работу электрофильтра . . . . .	95
8.2. Удельное электрическое сопротивление пыли . . . . .	97
8.3. Методы определения удельного электрического сопротивления пыли . . . . .	98
Определение удельного электрического сопротивления пыли в промышленных условиях . . . . .	98
Определение удельного электрического сопротивления слоя пыли в лабораторных условиях . . . . .	102
Глава 9. Горючесть и взрываемость пыли . . . . .	106
9.1. Основные понятия и определения . . . . .	106
9.2. Определение характеристик воспламеняемости порошков . . . . .	108
9.3. Определение характеристик взрываемости <sup>TM</sup> пыли . . . . .	110



Приложение 1. Координатные сетки, применяемые для построения графиков дисперсного состава пыли	118
А. Логарифмически вероятностная координатная сетка	118
Б. Двойная логарифмическая координатная сетка	119
В. Координатная сетка Ромашова	119
Г. Логарифмическая координатная сетка	120
Приложение 2. Значения $t$ и интеграла $F(O)$	121
Приложение 3. Дисперсионные моменты и кривых распределения	124
Приложение 4. Таблицы	
Приложение 5. Перечень оборудования, химической посуды, приборов для определения физико-химических свойств промышленных пылей	130
Приложение 6. Паспорта пылей	132
Приложение 7. Показатели воспламенения и взрываемости некоторых материалов	134
Использованная литература	136

Петр Аркадьевич Коузов  
Людмила Яновна Скрыбина

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ

Редактор Н. Р. Либерман  
Техн. редактор Д. Д. Некрасова  
Обложка художника В. Б. Мартусевича  
Корректор Т. Л. Климова

ИБ № 1116

Сдано в набор 28.09.82. Подписано в печать 29.12.82. М-31184.  
Формат бумаги 60X90/16. Бумага тип. № 2.  
Литературная гарнитура. Высокая печать.  
Усл.-печ. л. 9,0. Усл. кр.-отт. 9,25. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 10 000 экз.  
Зак. 381. Цена 55 коп. Изд. № 1862.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия»,  
Ленинградское отделение.  
191186, г. Ленинград, Д-186, Невский пр., 28

Ленинградская типография № 2  
головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени  
Ленинградского объединения «Техническая книга»  
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29

## ИЗДАТЕЛЬСТВО „ХИМИЯ“

*ИМЕЕТСЯ В ПРОДАЖЕ*

**КОУЗОВ П. А., МАЛЬГИН А. Д., СКРЯБИН Г. М.** *Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности.* Л., 1982. 256 с. 1 р. 30 к.

Впервые в отечественной литературе обобщены материалы, относящиеся к производствам минеральных удобрений, серной кислоты, кормовых дрожжей и белково-витаминных концентратов, моющих средств, лаков и красок, технического углерода, шин, резино- и асбестотехнических изделий и к каталитическому крекингу нефти.

Излагаются теоретические основы процессов пылеулавливания и методы расчета пылеочистных аппаратов. Описаны принципы действия и конструкции рекомендуемых пылеуловителей. Приведены правила эксплуатации и техники безопасности.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занятых проектированием, наладкой и эксплуатацией пылеулавливающего оборудования не только в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, но и в смежных областях; может также служить учебным пособием для студентов вузов и учащихся техникумов.

**ЗАХАРОВ Л. Н.** *Начала техники лабораторных работ.* Л., 1981. 192 с. 50 к.

Книга является практическим руководством по технике лабораторных работ в общей органической химии. Изложены рациональные приемы приготовления растворов, взвешивания, перемешивания, фильтрования и других работ; описаны методы очистки веществ, сборка наиболее распространенного оборудования. Большое внимание уделено вопросам техники безопасности.

Книга предназначена для препаратов и лаборантов производственных и исследовательских лабораторий, полезна учащимся ПТУ и техникумов, а также студентам младших курсов вузов.

*Книгу можно приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу. В случае отсутствия книги в магазинах заказ можно направлять по адресам: 198147, Ленинград, Московский пр., 54, отдел «Книга — почтой» магазина № 21 «Книги по химии» или 103050, Москва, ул. Медведева, 1, отдел «Книга — почтой» магазина № 8 «Техническая книга».*

*Заказ будет выслан наложенным платежом.*