

В. И. ЛОГИНОВ

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ
И ОБЕССОЛИВАНИЕ
НЕФТЕЙ

В.И. ЛОГИНОВ

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ
И ОБЕССОЛИВАНИЕ
НЕФТЕЙ



МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»
1979

Логинов В. И.

Обезвоживание и обессоливание нефтей. — М.: Химия, 1979 г. — 216 с., ил.

Книга посвящена теории и практике оптимизации действующих и проектируемых технологических процессов и аппаратов для обезвоживания и обессоливания нефтей. Даны методы построения статических и динамических моделей этих процессов в целом и их отдельных звеньев. Приведены методы оценки резервных возможностей действующих установок и способы выявления их слабых звеньев. Значительное место в книге уделено моделированию кинетики процессов укрупнения эмульсий.

Книга предназначена для инженерно-технических работников предприятий, проектных организаций и научных институтов нефтеперерабатывающей промышленности.

216 с., 88 рис., 24 табл., 159 библиографических ссылок.

Л 31406-093
050(01)-79 93.79.2803020100

© Издательство «Химия», 1979 г.

Предисловие	5
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ	7
Эмульсии и их образование	7
Минерализация пластовых вод и неорганические вещества в нефти	8
Реологические свойства эмульсий	12
Электрические свойства эмульсий	18
Поведение отдельных капель эмульсии во внешнем электрическом поле	19
Глава 2. СПОСОБЫ И АППАРАТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ	24
Основы процесса разделения эмульсий	24
Термохимические отстойные аппараты	28
Подача эмульсии в отстойники через слой дренажной воды	31
Промежуточный слой в отстойнике	32
Электродегидраторы	37
Выбор и поддержание напряженности электрического поля в электродегидраторах	41
Глава 3. ПРОЦЕСС ОБЕССОЛИВАНИЯ НЕФТЕЙ	45
Принципиальная схема процесса. Коэффициенты его усиления	45
Потенциальные возможности процесса обессоливания	46
Определение минимального расхода промывочной воды	51
Сравнение теоретических и экспериментальных результатов	55
Глава 4. РАЗРУШЕНИЕ ЭМУЛЬСИЙ ПРИ ПОМОЩИ ДЕЭМУЛЬГАТОРОВ	60
Природа деэмульгаторов	60
Механизм транспорта деэмульгатора	63
Конвективная диффузия деэмульгатора	65
Наведенная турбулентная диффузия деэмульгатора	68
Кинетическая модель разрушения бронирующих оболочек	71
Глава 5. ПРОЦЕССЫ ДРОБЛЕНИЯ И КОАЛЕСЦЕНЦИЯ КАПЕЛЬ В ЭМУЛЬСИЯХ	77
Образование мелкодисперсной составляющей эмульсии	77
Кинетическое уравнение как динамическая модель поведения дисперсной среды	81
Конвективный механизм сближения капель	84
Диффузионный механизм сближения капель	89
Существующие методы решения кинетического уравнения. Точные решения	95
Начальная асимптотика	99
Численные и параметрические методы	99
Непараметрический метод	103
Дальняя асимптотика. Автомодельные решения	105

Глава 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УКРУПНЕНИЯ И СМЕШЕНИЯ В ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ ПРИ ПОДГОТОВКЕ НЕФТЕЙ 109

Постановка задачи и аппроксимация ядер коалесценции	109
Вычисление моментов решения кинетического уравнения. Анализ результатов	112
Моменты автомоделного решения	116
Точность определения моментов решения и порядок интерполяционной схемы для доопределяющих уравнений	118
Определение моментов решения кинетического уравнения коалесценции в турбулентном потоке	120
Моделирование процесса смешения	122

Глава 7. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ОТСТОЙНЫХ АППАРАТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ 124

Понятие передаточной функции и коэффициента усиления отстойного аппарата	124
Передаточные функции для отстойных аппаратов с вертикальным потоком сырья	127
Передаточные функции для отстойных аппаратов с торцевым вводом сырья и вводом через щелевые распределительные головки	130
Влияние гидродинамического режима в отстойных аппаратах на устойчивость их работы	132
Учет влияния промежуточного слоя и стесненных условий осаждения на передаточную функцию отстойных аппаратов	135
Определение остаточной воды в подготовленной нефти	137

Глава 8. ОСНОВЫ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕССОЛИВАНИЯ НЕФТЕЙ 143

Оценка эффективности работы установок обессоливания по данным нормальной эксплуатации	143
Определение степени разрушения бронирующих оболочек	147
Подбор и применение деэмульгатора	153
Определение качества работы смесительных устройств	156
Принципиальная схема подачи промывочной воды для обессоливания и выбор температурного режима	160

Глава 9. ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ 164

Измерение влагосодержания. Прямые методы	164
Косвенные методы измерения влагосодержания	167
Методы определения солесодержания в нефтях	169
Интегральный метод обработки кривых седиментационного анализа	172

ПРИЛОЖЕНИЕ 176

1. Общие сведения из теории турбулентного движения	176
2. Движение отдельных капель эмульсии под действием турбулентных пульсаций	180
3. Общие сведения о диффузионных процессах в дисперсных средах.	185
4. Взаимодействие капель в электрическом поле	191
<i>Литература</i>	206
Предметный указатель	211

ПРЕДИСЛОВИЕ

Согласно действующим ГОСТ, нефть считается кондиционной для поставки ее на нефтеперерабатывающие заводы, если в ней содержится не более 0,1% воды и не более 40 мг/л хлорных солей*. На заводе нефть подвергается дополнительному обессоливанию, так как по существующим нормам нефтеперерабатывающей промышленности нефть должна подаваться на установки первичной переработки с содержанием солей не более 5 мг/л. Необходимость столь глубокого обессоливания объясняется следующими причинами.

1. При первичной перегонке нефти остаточные соли вызывают сильную коррозию технологической аппаратуры, а следовательно, резкое уменьшение срока службы установок и сокращение длительности межремонтных пробогов.

2. Мазут, в котором остается значительная часть солей, содержащихся в сырой нефти, обладает также сильными коррозионными свойствами, что приводит к преждевременному выходу из строя топочной аппаратуры электростанций и турбинных двигателей.

3. Соли мышьяка, остающиеся в первичных нефтепродуктах, которые служат сырьем для каталитических процессов, являются одной из основных причин отравления дорогостоящих катализаторов.

Имеются и другие немаловажные причины необходимости глубокого обезвоживания и обессоливания нефти.

В книге описаны основы процессов подготовки нефти, изложена теория и практика моделирования этих процессов и методы их оптимизации, приводятся методы расчета процессов коалесценции в эмульсиях, которые пока еще не получили достаточного освещения в литературе.

В связи с универсальностью методов моделирования и оптимизации массообменных процессов в дисперсных средах часть теоретических и экспериментальных результатов, разработанных применительно к обезвоживанию и обессоливанию нефтей, может быть использована и при исследовании других технологических процессов.

Автор не ставил перед собой цели охватить все особенности разработки и оптимизации процессов подготовки нефтей. Изложить доста-

* Помимо этих двух существуют и другие показатели качества, которые здесь не рассматриваются.

точно строго, с точки зрения теории, основы моделирования этих процессов и в то же время не отделить теорию от практики — вот основная задача, которую он хотел решить. К сожалению, далеко не все затрагиваемые в книге вопросы удалось изложить с одинаковой степенью строгости и полноты. Причина этого — сложность рассматриваемых технологических процессов и недостаточная изученность физических основ поведения коалесцирующих дисперсных сред, к которым относятся водонефтяные эмульсии.

С целью упрощения изложения основного материала часть разделов книги, содержащих громоздкие выкладки, а также разделы, носящие вспомогательный характер, вынесены из основного текста в приложение.

Четвертый раздел приложения написан совместно с Е. Я. Лапигой, оказавшим большую помощь автору при обсуждении и получении отдельных результатов работы в процессе подготовки книги к изданию, за что автор выражает ему глубокую благодарность. Автор весьма признателен также В. М. Ентову, В. А. Каминскому, Э. Г. Синайскому, Н. М. Байкову, Л. И. Голомштоку, Г. А. Халуше и многим другим, с которыми он начинал работу по исследованию процессов подготовки нефтей и дискуссии с которыми оказали существенное влияние на формирование его взглядов в этой области.

Автор заранее благодарен за любые замечания, которые будут способствовать совершенствованию книги.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

ЭМУЛЬСИИ И ИХ ОБРАЗОВАНИЕ

Дисперсная система, образованная взаимонерастворимыми жидкостями, называется эмульсией*.

Эмульсии являются грубодисперсными системами с размерами частиц примерно от 10^{-1} мкм и выше, которые можно визуально наблюдать при помощи оптического микроскопа. Подобные системы широко распространены в природе и технике; примерами могут служить молоко, молочный сок растений, битумы, водонефтяные эмульсии, пластичные смазки, охлаждающие жидкости и многие другие вещества.

Наиболее распространены в природе и употребимы в технике эмульсии, образованные водой и какой-либо органической жидкостью. Если вода образует сплошную фазу, то эмульсию называют прямой, или эмульсией типа «масло в воде», если вода является дисперсной фазой, то эмульсию называют обратной, или эмульсией типа «вода в масле».

Эмульсии образуются в результате двух конкурирующих процессов: дробления и коалесценции (укрупнения) капель дисперсной фазы. В зависимости от соотношения скоростей этих процессов эмульсия может становиться либо все более мелкодисперсной, либо будет укрупняться. При равенстве скоростей дробления и коалесценции капля эмульсия будет находиться в состоянии динамического равновесия.

По своей природе эмульсии являются термодинамически неустойчивыми системами. Это приводит к тому, что в состоянии покоя капли укрупняются и эмульсия постепенно расслаивается. Чем быстрее происходит этот процесс, тем менее устойчива эмульсия.

Устойчивость эмульсий существенно зависит от наличия в них веществ, называемых эмульгаторами. Эти вещества, адсорбируясь на границе раздела фаз, снижают межфазное поверхностное натяжение, а следовательно, уменьшают суммарную свободную энергию системы и повышают ее устойчивость.

В настоящее время известны десятки подобных веществ, содержащихся в нефтях. Большая их часть принадлежит к классу поверхностно-активных веществ (ПАВ). К нему обычно относят [3] все вещества, обладающие способностью уменьшать межфазное поверхностное натяжение, в молекулярном строении которых можно выделить элементы, обладающие гидрофильными и гидрофобными

* Дисперсная система, образованная жидкостью и твердыми частицами, называется суспензией. Если же частицы взвешены в газе, то такая система называется аэрозолем.

свойствами. Подобными компонентами нефти являются различные органические кислоты, нафтены, смолы и др.

В процессе образования и стабилизации водонефтяных эмульсий наряду с поверхностно-активными веществами существенную роль играют тонкодисперсные нерастворимые порошки находящиеся в нефти в коллоидном состоянии: асфальтены, микрорекристаллы парафина и различного рода механические примеси. Эти вещества образуют на каплях эмульсии механически прочные оболочки, препятствующие их коалесценции [4—6].

Стабилизация эмульсий является динамическим процессом, который определяется закономерностями конкурирующей адсорбции на каплях эмульсии различных эмульгирующих веществ. Вначале этот процесс идет достаточно быстро, а затем, по мере заполнения свободной поверхности капель, на которой могут адсорбироваться эмульгирующие вещества, постепенно затухает и скорость его стремится к нулю. За это время структуры и составы бронирующих оболочек стабилизируются. Время и процесс выхода на это устойчивое состояние бронирующих оболочек эмульсии называют соответственно временем и процессом «старения» эмульсии [4—6]. Время старения эмульсий зависит от многих факторов и для большинства нефтей СССР изменяется от 2—3 до десятков часов [4, 7]. Очевидно, что во время старения повышается и устойчивость эмульсий к расслоению, достигая максимального значения для «застарелых» эмульсий. Время их расслоения при комнатной температуре существенно зависит от количества и качества присутствующих в них эмульгирующих веществ. Чаще всего оно исчисляется часами, реже — сутками, хотя встречаются и такие эмульсии, которые не расслаиваются годами.

МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ПЛАСТОВЫХ ВОД И НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА В НЕФТИ

Пластовые воды, добываемые с нефтью и образующие с ней дисперсную систему, содержат, как правило, значительное количество растворенных минеральных солей. По химическому составу [5, 9] пластовые воды делят на хлоркальциевые, состоящие в основном из смеси растворов хлоридов натрия, магния и кальция, и щелочные. Последние в свою очередь можно разделить на хлориднощелочные и хлоридно-сульфатнощелочные.

Общая минерализация пластовых вод измеряется в единицах массы растворенного вещества на единицу объема воды и может изменяться в сотни раз. Так, в Ставропольском крае встречаются пластовые воды, содержащие менее 1 г/л растворенного вещества, а на отдельных месторождениях Татарии содержание их достигает 300 г/л.

Помимо солей, образующих истинные растворы, в пластовой воде содержатся растворенные газы, химические соединения, образующие неустойчивые коллоидные растворы (золи), такие, как SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 ; твердые неорганические вещества, нерастворимые в воде и находящиеся во взвешенном состоянии (суспензии и механические примеси).

Результаты многочисленных исследований минерального состава пластовых вод показывают, что основную долю растворенных веществ составляют хлориды натрия, магния и кальция. Кроме них (в зависимости от месторождения) могут присутствовать иодистые и бромистые соли щелочных и щелочноземельных металлов, сульфиды натрия, железа, кальция, соли ванадия, мышьяка, германия и др. Но в отличие от хлоридов, содержание которых исчисляется процентами и десятками процентов от общего количества растворенного вещества, содержание остальных солей измеряется сотыми, тысячными и еще меньшими долями процентов. В связи с этим минерализацию пластовой воды часто измеряют по содержанию ионов хлора в единице объема с последующим пересчетом на эквивалент натриевых солей.

Помимо измерения минерализации свободной пластовой воды при подготовке нефти к переработке измеряют содержание солей в единице объема нефти. Сама нефть не содержит хлорных солей. Они попадают в нее вместе с эмульгированной водой. И хотя отдельные исследователи обнаруживали в безводной нефти так называемые кристаллические соли, это не опровергает сделанного утверждения и может быть объяснено. Количество кристаллических солей обычно незначительно и изменяется в пределах от нескольких миллиграмм до 10—15 мг/л нефти. Подобные ситуации возможны в двух случаях: либо при добыче нефть проходит соляные отложения и кристаллы солей попадают в нее как механические примеси, либо первоначально в нефти содержится мало мелкодисперсной и сильно минерализованной пластовой воды, которая затем растворяется в нефти, а соли остаются в виде микрорекристаллов.

Абсолютное содержание хлоридов в обводненной нефти не дает представления о степени минерализации пластовых вод. Поэтому одновременно с солями в нефти определяют и ее обводненность. Последнюю принято измерять в %.

Содержание солей в 1 л нефти при ее обводненности 1%, численно равно количеству солей, растворенных в 10 см³ эмульгированной воды, удобно использовать для сравнения нефтей по минерализации пластовых вод, которая может изменяться в довольно широких пределах. Ниже приведены данные о содержании хлоридов (в мг/л) в нефтях различных месторождений СССР при их обводненности 1% [5]:

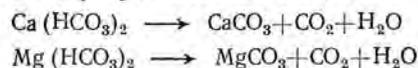
Ромашкинская	1500—2500	Озексуатская	600—800
Арланская	2300—2500	Мангышлакская	1000—1100
Туймазинская (де- вовская)	2200—2500	Усть-Балык- ская	800—1100
Бавлинская	2000—2300	Мегионская	800—1100
Южно-Пермская (чернушинская)	1000—1200	Гнединцевская	800—1200
Мухановская	2000—2200	Глинско-Росбы- лиевская	1500—2000
Введенская	1600—1800	Кагановская	1750—2100
Шкаповская	2200—2500	Комсомольская	800—1000
Серноводская	2000—2500	Кашкарская	1200—1800
Бугурусланская	2000—2500	Артемовская	70—125
Кутертепская	1000—1200	Бузиновская	75

Ниже приведены основные составляющие растворенного вещества в пластовых водах [6] девонских отложений и рифовых массивов Башкирии, а также в пластовой воде сарматских отложений Дагестана:

Компоненты, мг/л	Пластовые воды		
	девон	рифовые массивы;	сарматские отложения
NaCl	130—180	210—250	57,5
KCl	—	—	1,17
CaCl ₂	70—130	17—35	1,17
MgCl ₂	15—20	12—25	0,95
BaCl ₂	—	—	0,56
SrCl ₂	—	—	0,011
Br	1,1—2,2	0,7—0,8	0,20
I	—	0,02—0,03	0,012
Ba	—	—	0,046
B ₂ O ₃	—	0,4—0,7	—

Большой справочный материал по минерализации пластовых вод нефтяных месторождений собран в монографии Г. М. Сухарева [9].

Помимо хлоридов пластовые воды могут содержать значительное количество бикарбонатов кальция и магния, которые часто называют солями временной жесткости. Это название обусловлено следующим. В результате нагревания воды, смешения ее со щелочной водой и других причин эти соли могут разлагаться по схеме:



с выделением двуокси углерода и образованием нерастворимого карбонатного осадка. При движении по газонефтеобводным коллекторам или по транспортным трубопроводам в процессах обезвоживания и обессоливания нефти карбонаты отлагаются на стенках трубопроводов, постепенно уменьшая их проходное сечение [6]. Возможность появления нерастворимого осадка следует учитывать при организации процессов сбора, транспортирования и подготовки нефти и воды.

Неорганические вещества находятся не только в пластовой воде. Некоторые из них могут растворяться в нефти или образовывать с ней комплексные соединения. К ним относятся различные соединения серы, ванадия, никеля, фосфора и др.

Сера содержится в значительной части добываемых нефтей. Ее количество в нефти определяется конкретным месторождением и может изменяться в пределах от нуля до 5—7%. Основная часть серы обычно связана с асфальто-смолистыми компонентами нефти. Кроме того, она может быть в нефти в виде коллоидной серы, сероводорода, меркаптанов, алифатических, нафтеновых и ароматических сульфидов и т. д. В настоящее время в нефтях насчитывается около 90 серосодержащих веществ. Доля сернистых нефтей в мировой добыче нефти постоянно возрастает. Так, если до 1960 г. нефти, содержащие более 1% серы, составляли 37%, то к 1975 г. их стало 45%.

Содержание никеля и ванадия может достигать соответственно 0,01 и 0,04% масс. на нефть. Эти элементы обычно образуют комплексные

Таблица 1.1*

Элементы	Ярян-ская	Шумов-ская	Павлов-ская Турней-ского яруса	Белозер-ская	Изба-скент-ская	Южно-Аламы-шкская	Атов-ская	Одоп-тин-ская
Na 10 ⁻³	3,8	6,7	3,5	22,0	—	—	—	0,38
Fe 10 ⁻³	3,3	1,5	3,9	1,3	6,4	0,5	4,8	1,5
Mg 10 ⁻⁴	9,2	16,0	2,9	0,92	69,0	0,86	4,0	3,8
Ca 10 ⁻³	1,5	1,9	0,77	17	41,0	0,33	1,7	0,4
V 10 ⁻³	0,75	1,6	6,3	2,0	0,07	0,11	0,38	0,4
Ni 10 ⁻³	1,6	3,3	3,0	0,5	0,65	0,12	0,8	0,7
Si 10 ⁻⁴	4,4	6,7	10,0	2,2	19,0	2,0	32,0	5,4
Al 10 ⁻⁴	2,6	4,9	8,8	2,2	0,8	0,8	2,2	4,8
Zn 10 ⁻⁴	—	—	3,9	1,0	—	—	7,2	0,8
Co 10 ⁻⁴	1,4	3,2	1,2	0,43	2,3	0,17	0,3	0,35
Sr 10 ⁻⁶	—	—	3,5	0,3	1500	10,0	10,0	3,0
Pb 10 ⁻⁴	—	—	1,0	0,28	—	—	0,66	0,5
Sn 10 ⁻⁴	—	—	5,3	0,012	—	—	0,18	—
In 10 ⁻³	—	—	5,0	0,05	—	—	—	0,07
Mn 10 ⁻⁵	6,0	1,7	2,6	1,4	17	1,0	1,2	0,24
Cu 10 ⁻⁵	6,8	14,0	12,0	3,6	17	6,4	19	18
Ti 10 ⁻⁵	2,6	6,1	2,0	2,1	—	—	2,0	0,1
Ba 10 ⁻⁵	—	—	—	—	—	—	0,2	0—0,7
Cr 10 ⁻⁵	3,0	3,8	95,0	0,22	38,0	2,6	0,2	1,2
Ag 10 ⁻⁷	—	—	9,8	9,7	—	—	100	—

* Пустое место в таблице означает отсутствие данных; прочерк указывает, что данного элемента в нефти не обнаружено.

соединения с порфиринами. Наибольшее содержание порфиринов и ванадия характерно для сернистых нефтей.

Для примера в табл. 1.1 приведены количественные соотношения (в % масс.) между различными включениями элементов, содержащихся в нефтях, взятые для нефтей восточных районов СССР.

В процессах образования эмульсий большую роль играют содержащиеся в нефти различные смолы, асфальтены и кислоты, являющиеся хорошими эмульгаторами и стабилизаторами. Химическое строение смол и асфальтенов исследовано еще не полностью. Молекулярная масса нефтяных смол изменяется от 500 до 1000. Все они содержат углерод, водород, кислород и почти все — азот и серу. Содержание нефтяных смол — от одного до нескольких десятков массовых процентов.

Содержание асфальтенов в нефтях незначительно и обычно не превышает 2% масс., хотя в отдельных случаях может достигать 5—6% масс. По элементному составу асфальтены мало отличаются от смол. В них обычно несколько меньше водорода и больше гетероатомов. Молекулярная масса асфальтенов 1000—6000, а размер их частиц — от 50 до 100 А.

В нефтях может содержаться значительное количество кислот. Основные кислоты нафтеновые. Их содержание иногда достигает 3% (нафталанская лечебная нефть). Меньше содержится ароматических, нафтено-ароматических и жирных кислот [8].

Реология — наука о деформациях и течениях материалов под действием внешних сил. Ее методы могут быть использованы для изучения структуры и свойств эмульсий. Слабо концентрированные эмульсии ведут себя подобно простым жидкостям. С увеличением концентрации эмульсии частицы дисперсной фазы начинают взаимодействовать друг с другом, флокулируют, могут образовывать пространственные структуры и агрегаты. Это приводит к изменению вязкоэластичных свойств эмульсий. Однако реологические свойства эмульсий определяются не только их концентрацией. В работе [2] приводятся следующие основные составляющие эмульсии и связанные с ними факторы, которые могут влиять на ее реологическое поведение.

Дисперсная фаза: объемная доля, гидродинамическое взаимодействие между каплями, флокуляция; вязкость, деформация капель при сдвиге; распределение капель по размерам, методика приготовления эмульсии, межфазное натяжение, поведение капель при сдвиге, взаимодействие с непрерывной фазой, взаимодействие капель; химический состав.

Непрерывная фаза: вязкость и другие реологические свойства; химический состав, полярность, величина рН, потенциальная энергия взаимодействия между каплями; концентрация электролита (если среда полярна).

Эмульгирующий агент: химический состав, потенциальная энергия взаимодействия между каплями; концентрация и растворимость сплошной и дисперсной фаз, тип эмульсии, инверсия эмульсии, солюбилизация жидких фаз в мицеллах; толщина пленки, адсорбированной на каплях, и ее реологические свойства, деформация капель при сдвиге; циркуляция жидкости внутри капель; электровязкостный эффект.

Дополнительные стабилизирующие агенты: пигменты, гидроколлоиды; влияние на реологические свойства жидких фаз и межфазной пограничной области.

Поскольку влияние всех этих факторов не является аддитивным, т. е. эффект от суммарного их воздействия не равен сумме эффектов от каждого из них, изучение реологических свойств представляет большие трудности.

В настоящее время реология эмульсий изучена еще недостаточно полно для того, чтобы можно было бы говорить о теории, учитывающей все вышеперечисленные факторы, несмотря на то, что этому вопросу посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ. Большая их часть посвящена исследованию зависимости вязкостных свойств эмульсий и суспензий от концентрации дисперсной фазы. Одна из первых работ в этой области принадлежит Эйнштейну (1906 г.), который при исследовании вязкости разбавленных суспензий, содержащих жесткие сферические частицы с суммарной концентрацией W , получил следующее соотношение

$$\mu_a = \mu_c (1 + 2,5W) \quad (1.1)$$

где μ_c и μ_a — динамические вязкости соответственно сплошной фазы и эмульсии.

В дальнейшем это соотношение было несколько уточнено Кинчем за счет учета членов более высокого порядка по концентрации дисперсной фазы

$$\mu_a = \mu_c (1 + 2,5W + 7,5W^2) \quad (1.2)$$

К наиболее поздним в этой области относятся результаты, полученные Барнеа и Мизрахи [11]. На основе анализа имеющихся решений стокового обтекания частиц они предложили следующую формулу для вычисления эффективной вязкости среды, содержащей жесткие сферы

$$\mu_a = \mu_c \left[\frac{5W}{3(1-W)} \right] \quad (1.3)$$

Довольно полный обзор моделей для вязкостных свойств эмульсий и суспензий имеется в книге Дж. Хаппеля и Г. Бреннера [10].

Для оценки расхождения расчетных значений μ_a по указанным выше формулам на рис. 1.1 приведены рассчитанные по ним графики зависимости относительной вязкости μ_a/μ_c от W .

Во всех соотношениях, существующих для определения эффективной вязкости эмульсий, не учитывается распределение капель по размерам. Это обусловлено не отсутствием зависимости между указанными величинами, а трудностью получения не только теоретических, но и экспериментальных результатов [2].

Помимо макрореологических эффектов, определяемых эффективной вязкостью эмульсий, качество подготовки нефтей существенно связано со скоростью осаждения диспергированных капель. Эта скорость зависит от концентрации эмульсии, распределения капель по размерам, свойств их поверхностных оболочек и др. Поскольку в водонефтяных эмульсиях капли всегда покрыты оболочкой из поверхностно-активных веществ, препятствующих циркуляции в них жидкости, при расчетах скорости осаждения эти капли можно рассматривать как жесткие сферы. Исключение составят только капли больших размеров.

При малой концентрации эмульсии скорость осаждения одиночной капли радиуса R определяется законом Стокса

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho_d - \rho_c}{\rho_c \nu_c} g R^2 \quad (1.4)$$

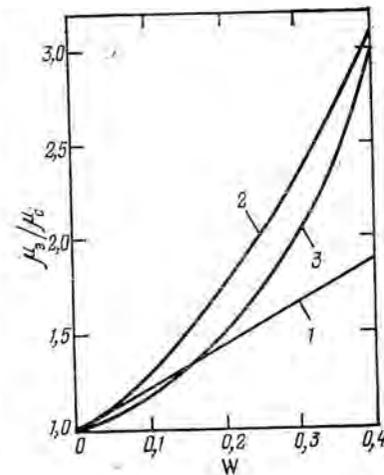


Рис. 1.1. Зависимости относительной вязкости от концентрации дисперсной фазы, рассчитанные по моделям: 1 — Эйнштейна; 2 — Кинчема; 3 — Барнеа и Мизрахи.

где ρ_d и ρ_c — плотности дисперсной и сплошной фазы; v_c — кинематическая вязкость сплошной среды; g — ускорение силы тяжести.

При возрастании концентрации дисперсной фазы скорости осаждения эмульгированных частиц начинают уменьшаться за счет их гидродинамического взаимодействия друг с другом*. Начинают реализовываться условия так называемого стесненного осаждения, закономерности которого для полидисперсных эмульсий еще недостаточно изучены. Имеющиеся результаты являются либо полуэмпирическими, либо получены для наиболее простых моделей осаждения, в которых используется предположение о монодисперсности оседающих частиц. Одна из первых работ по моделированию стесненного осаждения частиц была сделана Карманом. Он предложил модель для расчета скорости осаждения в высококонцентрированных дисперсных системах ($W > 0,2$). Для систем с меньшей концентрацией ($W < 0,2$) Бринкманом [15] были получены результаты, хорошо согласующиеся с опытными данными. Заслуживает внимания также ячеечная модель [16], в которой система диспергированных частиц представлена в виде правильной структуры, а взаимное влияние частиц учитывается граничными условиями, заданными на поверхности эффективных жидких сфер, охватывающих каждую частицу.

Наиболее теоретически обоснованы закономерности стесненного осаждения в работе Тэма [17]. Он рассматривает статистически однородную структуру частиц и считает, что возмущение потока, вызываемое одной частицей, можно заменить силой, равной по величине и обратной по направлению силе, с которой поток действует на частицу. Эта эффективная сила прикладывается к центру частицы. Сопротивление, испытываемое частицей, пропорционально скорости невозмущенного потока в центре частицы, которая складывается из скорости жидкости в отсутствие частиц и скорости жидкости, обуславливаемой влиянием всех остальных частиц. Считая обтекание частиц стоковым, Тэм получил следующее соотношение для определения скорости осаждения сферической частицы в монодисперсной эмульсии v_s в зависимости от концентрации дисперсной фазы

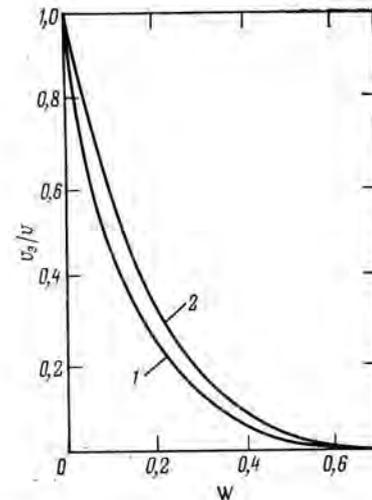
$$\frac{v_s}{v} = \frac{4 + 3W + 3\sqrt{8W - 3W^2}}{(2 - 3W)^2} \quad (1.5)$$

где v — скорость свободного стокового оседания частицы. Зависимость v_s/v от W , соответствующая уравнению (1.5), приведена на рис. 1.2. Значения скорости, рассчитанные по уравнению (1.5), хорошо согласуются с экспериментальными данными [17].

В этой же работе Тэм получает поправку для учета полидисперсности эмульсии. Однако она получена не совсем корректно и можно показать [19], что для полидисперсных эмульсий с широким фракционным составом возможны большие погрешности.

* Исключением является случай осаждения совокупности частиц, движение которых можно рассматривать как единое целое. Скорость оседания такого облака может существенно превышать скорость оседания изолированной частицы [13].

Рис. 1.2. Зависимости относительной скорости стесненного осаждения сферических частиц от концентрации дисперсной фазы, рассчитанные по моделям:
1 — Тэма для монодисперсной эмульсии; 2 — Мо-
да и Уитмера при $\beta=4,8$.



Помимо теоретических моделей, для определения скорости стесненного осаждения частиц на практике часто используют различные полуэмпирические модели, которые хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Так, Мод и Уитмер [10] на основе анализа большого количества экспериментального материала пришли к выводу, что скорость стесненного осаждения частиц должна хорошо аппроксимироваться законом

$$\frac{v_s}{v} = (1 - W)^\beta \quad (1.6)$$

Показатель степени β зависит от поверхностных свойств и формы оседающих частиц, а также от дисперсности; по оценке авторов он должен изменяться в пределах 4,5—6. Для сферических жестких частиц $\beta=4,8$. Соотношение, аналогичное (1.6), было получено в работе [19] на основе теоретических соображений. Зависимость v_s/v от W , рассчитанная по (1.6) при $\beta=4,8$, приведена на рис. 1.2.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭМУЛЬСИЙ

Нефть является диэлектриком, проводимость которого в зависимости от индивидуальных свойств и примесей изменяется в пределах 10^{-6} — 10^{-13} (Ом·м) $^{-1}$ [5]. Диэлектрическая проницаемость (ДП) нефти — более стабильная характеристика. Она изменяется в пределах 1,9—2,8. Электрическая проводимость и ДП эмульсий существенно зависят от концентрации дисперсной фазы и являются функциями частоты и напряженности внешнего электрического поля. Эти две основные электрические характеристики эмульсий довольно подробно изучались теоретически и экспериментально. Обзор общих результатов, полученных при их исследовании, можно найти в работе Ханан [2], а результатов конкретных исследований водонефтяных эмульсий — в работах [21—26].

Первый теоретический расчет ДП (ϵ_s) модельной дисперсии из сферических частиц с ДП ϵ_d , помещенных в узлах кубической решетки, которая погружена в сплошную фазу с ДП ϵ_c , был сделан Рэлеем еще в 1892 г. Он показал, что ДП в этом случае будет определяться соотношением

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_c \left[1 + \frac{3W}{\frac{\varepsilon_d + 2\varepsilon_c}{\varepsilon_d - \varepsilon_c} - W - 1,65 \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_c}{\varepsilon_d + 4/3} W^{10/3}} \right] \quad (1.7)$$

Продолжая эти исследования, Винер (в 1912 г.) для случая разбавленных суспензий получил следующее уравнение

$$\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_c}{2\varepsilon_c + \varepsilon_3} = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_c}{\varepsilon_d + 2\varepsilon_c} W \quad (1.8)$$

Для водонефтяных эмульсий всегда выполняется условие $\varepsilon_d \gg \varepsilon_c^*$. Решая (1.8) относительно ε_3 и учитывая это условие, получим

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_c \frac{1 + 2W}{1 - W} \quad (1.9)$$

В 1935 г. Бруггеман, считая, что уравнение Эйнштейна справедливо для бесконечно малого приращения дисперсной фазы, предложил рассмотреть дифференциальную модель для скорости изменения ε_3 от W . В результате интегрирования выведенного им уравнения он получил:

$$\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_d}{\varepsilon_c - \varepsilon_d} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_3} \right)^{1/3} = 1 - W \quad (1.10)$$

Это кубическое относительно ε уравнение можно решить в общем случае. Если же выполняются условия $\varepsilon_3 \gg \varepsilon_c$ и $\varepsilon_d \gg \varepsilon_3$, то оно упрощается и его можно привести к виду

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_c}{(1 - W)^3} \quad (1.11)$$

В 1952 г. Бетчер [2] предложил рассматривать дисперсную среду как плотно упакованную систему двух сортов сфер, отличающихся диэлектрическими проницаемостями ε_c и ε_d . На основе этой модели он получил следующее уравнение для определения ε_3 :

$$\frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_c}{3\varepsilon_3} = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_c}{\varepsilon_d + 2\varepsilon_3} W \quad (1.12)$$

Откуда

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_c}{4} \left[2 + 3 \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c} W - \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c} + \sqrt{\left(2 + 3 \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c} W - \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c} \right)^2 + 8 \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_c}} \right] \quad (1.13)$$

Вслед за Бетчером (в 1953 г.) Кубо и Накамура [2] на основании дифференциальной модели для приращения ДП дисперсии при увеличении концентрации дисперсной фазы получили уравнение

$$\frac{3\varepsilon_d}{(2+b)\varepsilon_d + 1 - b} \ln \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_3}{\varepsilon_d - \varepsilon_c} - \frac{(2+b)\varepsilon_d - 2(1-b)}{[(2+b)\varepsilon_d + 1 - b](2+b)} \times \ln \frac{(2+b)\varepsilon_3 + 1 - b}{(2+b)\varepsilon_c + 1 - b} = \ln(1 - W) \quad (1.14)$$

* Для воды $\varepsilon_d \approx 80$, а для нефти $\varepsilon_c \approx 2,5$.

где $b = 1 - \frac{4\pi}{9\sqrt{3}} = 0,19387$

Для случая $\varepsilon_d \gg \varepsilon_c$ его можно упростить и записать в виде

$$\left(1 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_d} \right)^3 = (1 - W)^{2+b} \frac{\varepsilon_3 + \alpha}{\varepsilon_c + \alpha}, \quad \alpha = \frac{1 - b}{2 + b} = 0,3674 \quad (1.15)$$

Если выполняется дополнительное условие $\varepsilon_d \gg \varepsilon_3$, то (1.14) можно еще более упростить. В результате получим

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_c + \alpha}{(1 - W)^{2+b}} - \alpha \quad (1.16)$$

Для сравнения расчетных результатов ДП по различным моделям на рис. 1.3 приведены зависимости $\varepsilon_3/\varepsilon_c$ от W , рассчитанные по формулам (1.9), (1.11), (1.13) и (1.16). При вычислении (1.13) и (1.16) предполагалось, что $\varepsilon_c = 2,5$, а $\varepsilon_d = 80$.

В соответствии с уравнениями электромагнитного поля электрическая проводимость среды κ аналогична ее диэлектрической проницаемости ε [28]. Поэтому соотношения, полученные для расчета ДП дисперсий, можно применить и для расчета их электропроводности путем соответственной замены ε_3 , ε_c и ε_d на κ_3 , κ_c и κ_d . Результирующие уравнения можно упростить для случая водонефтяных эмульсий, для которых $\kappa_d \gg \kappa_c$. Так, аналогами уравнений (1.9) и (1.11) для ДП эмульсии будут следующие уравнения для ее электропроводности

$$\kappa_3 = \kappa_c \frac{1 + 2W}{1 - W} \quad (1.17)$$

$$\kappa_3 = \kappa_c \frac{1}{(1 - W)^3} \quad (1.18)$$

Если дисперсная система находится в переменном электрическом поле, то она характеризуется комплексными величинами ДП и проводимости, которые можно записать в виде

$$\varepsilon_3^* = \varepsilon_3' + j\varepsilon_3'' \quad (1.19)$$

$$\varepsilon_3^* = \kappa_3' + j\kappa_3'' \quad (1.20)$$

Мнимая составляющая комплексной ДП ответственна за энергию переменного электрического поля, диссипируемую в диэлектрике [2, 27, 28]. Мерой

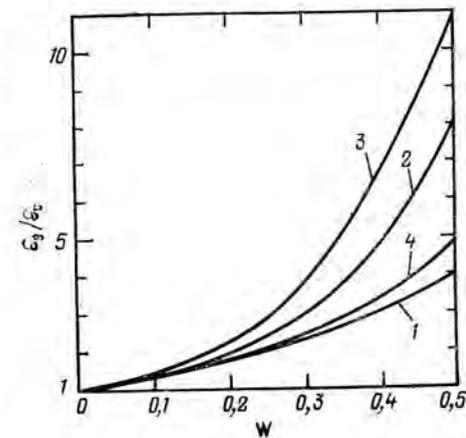


Рис. 1.3. Зависимости относительной величины ДП дисперсной среды от концентрации дисперсной фазы, рассчитанные по моделям: 1 — Винера; 2 — Бруггемана; 3 — Бетчера; 4 — Кубо и Накамура.

диссипации энергии служит отношение мнимой составляющей ДП к ее действительной части, называемое тангенсом угла потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_3''}{\varepsilon_3'} \quad \text{или} \quad \delta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\varepsilon_3''}{\varepsilon_3'} \right) \quad (1.21)$$

Используемый на практике коэффициент потери мощности $\cos \varphi$ связан с углом потерь равенством

$$\cos \varphi = \sin \delta = \frac{\varepsilon_3'}{\sqrt{(\varepsilon_3')^2 + (\varepsilon_3'')^2}} \quad (1.22)$$

Первые расчетные соотношения для определения комплексных значений ДП и проводимости дисперсной среды были получены Винером в 1914 г. Он показал, что для слабоконцентрированной модельной эмульсии с равномерно распределенными сферическими частицами

$$\varepsilon_3' = \varepsilon_c \frac{1+2W}{1+W} \left\{ 1 + \frac{2W}{(1-W)[1+(\omega\tau)^2]} \right\}, \quad \varepsilon_3'' = -\frac{\kappa_3}{\omega\varepsilon_0} \quad (1.23)$$

$$\tau = \frac{\varepsilon_d \varepsilon_0}{\kappa_d}, \quad \varepsilon_0 = 8,8541 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/М}$$

$$\kappa_3' = \kappa_c \frac{1+2W}{1-W} \left\{ 1 + \frac{2W\varepsilon_c \kappa_d (\omega\tau)^2}{(1+W)\kappa_c \varepsilon_d [1+(\omega\tau)^2]} \right\}, \quad \kappa_3'' = \omega\varepsilon_0 \varepsilon_3' \quad (1.24)$$

Величина τ имеет размерность времени и называется временем релаксации. Ее физический смысл удобно пояснить на следующем примере. Если диэлектрик, характеризующийся временем релаксации τ , поместить в постоянное электрическое поле, напряженность которого скачком увеличить от нуля до E , то его поляризация произойдет не мгновенно, а будет нарастать по закону

$$P = kE(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1.25)$$

где k — некоторая постоянная характеристика диэлектрика. Отсюда сразу видно смысл τ как постоянной времени. Порядок величины τ для водонефтяных эмульсий можно оценить; подставляя в ее определение $\varepsilon_d = 80$ и $\kappa_d \geq 10^{-4}$ *, получим $\tau \leq 7 \cdot 10^{-6}$ с. Это означает, что вплоть до мегагерцовых частот явлением запаздывания поляризации в водонефтяных эмульсиях можно пренебречь и рассматривать поведение эмульсий в переменных полях как в квазипостоянных.

Из (1.23) и (1.24) видно, что при $\omega = 0$ величины ε_3' и κ_3' определяются соотношениями типа Винера [см. (1.9) и (1.16)]. С ростом ω величина ε_3' убывает, а κ_3' возрастает, стремясь к предельным значениям

$$\varepsilon_3^{(\infty)} = \varepsilon_c \frac{1+2W}{1+W} \quad (1.26)$$

$$\kappa_3^{(\infty)} = \kappa_c \frac{1+2W}{1-W} \left[1 + \frac{2W\varepsilon_c \kappa_d}{(1+W)\varepsilon_d \kappa_c} \right] \quad (1.27)$$

* Электрическая проводимость пластовой воды изменяется в пределах $10^{-4} - 10^{-1}$ (Ом·м)⁻¹.

Обозначим через $\varepsilon_3^{(0)}$ и $\kappa_3^{(0)}$ значения ε_3' и κ_3' при $\omega = 0$ и рассмотрим отношения

$$\frac{\varepsilon_3^{(\infty)}}{\varepsilon_3^{(0)}} = \frac{1-W}{1+W}, \quad \frac{\kappa_3^{(\infty)}}{\kappa_3^{(0)}} = 1 + \frac{2W\varepsilon_c \kappa_d}{(1+W)\varepsilon_d \kappa_c} \quad (1.28)$$

которые показывают максимальные относительные изменения ДП эмульсии и ее проводимости от частоты. Из (1.28) видно, что если максимальное отношение для ДП зависит только от концентрации дисперсной фазы, то отношение проводимостей существенно зависит от отношения κ_d/κ_c , которое может изменяться в довольно широких пределах. Отношение $\varepsilon_c/\varepsilon_d$, как отмечалось ранее, для водонефтяных эмульсий практически постоянно. Поскольку κ_d определяется минерализацией пластовой воды, зависимость (1.28) может быть положена в основу принципа измерения соленосодержания в нефти.

На случай концентрированных эмульсий теория Винера была распространена в 1960 г. Т. Ханан. Результаты, которые он получил, изложены в работе [2].

В сильных электрических полях водонефтяную эмульсию уже нельзя рассматривать как однородную систему, состоящую из сферических проводящих частиц. Они начинают взаимодействовать друг с другом, коалесцировать, образовывать проводящие цепочки, которые могут вызывать кратковременное или длительное замыкание электродов. Физика этих процессов довольно сложна и пока не имеет удовлетворительного математического описания. Отдельные вопросы, связанные с влиянием флокулирования на ДП эмульсий, можно найти в работах И. Ю. Клугмана.

ПОВЕДЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ КАПЕЛЬ ЭМУЛЬСИИ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Внешнее электрическое поле широко используется в процессах обезвоживания и обессоливания нефтей для интенсификации коалесценции отдельных капель. Рассмотрим на примере поведения пары капель механизм их взаимодействия. Будем считать, что капли не деформируются, что эквивалентно замене их двумя жесткими сферами. За счет растворенных минеральных солей капли можно считать проводниками; в поле они поляризуются и начинают взаимодействовать друг с другом (рис. 1.4). Сила их взаимного притяжения пропорциональна диэлектрической проницаемости нефти ε_c , квадрату напряженности электрического поля E и существенно зависит от расстояния между каплями и их радиусов R_1 и R_2 . Общее выражение для силы взаимного притяжения двух незаряженных частиц, действующей вдоль линии, соединяющей их центры, можно записать в виде

$$F = \varepsilon_c E^2 R_1^2 F_1 \quad (1.29)$$

где F_1 — множитель, зависящий от отношения размеров капель $k = R_1/R_2$ и отношения расстояния между их поверхностями δ к радиу-

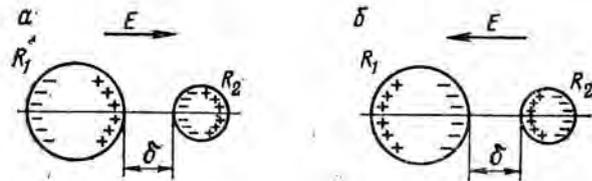


Рис. 1.4. Поляризация капель в однородном электрическом поле напряженностью E с разной полярностью (а и б).

су меньшей капли. Аналитическое выражение для F_1 довольно сложно (см. Приложение, раздел 4), а его значения при различных значениях k представлены на рис. 1.5. При малых относительных расстояниях между каплями F_1 растет как функция $(R_2/\delta)^{0.85}$, а при больших расстояниях как функция $(R_2/\delta)^{0.4}$, что соответствует диполь-дипольному взаимодействию капель, которое обычно и приводится в литературе при обсуждении силы взаимодействия капель в электрическом поле.

Таким образом, чем ближе подходят капли друг к другу, тем сильнее они притягиваются, что и объясняет механизм ускорения процесса коалесценции. (Подробно вопросы взаимодействия капель и их коалесценции в поле рассматриваются в последующих главах и в Приложении).

Пусть электрическое поле будет переменным. В некоторый момент времени оно меняет свою полярность на противоположную. При этом поляризация капель также сместится на обратную (см. рис. 1.4, б). Сила притяжения между ними останется прежней, так как она не зависит от направления поля, а зависит только от квадрата его величины [см. (1.29)]. Если поле изменяется с некоторой частотой (рис. 1.6, а), то сила притяжения капель станет изменяться с двойной частотой (рис. 1.6, б). Такое соответствие будет соблюдаться до тех пор, пока скорость процессов пере-

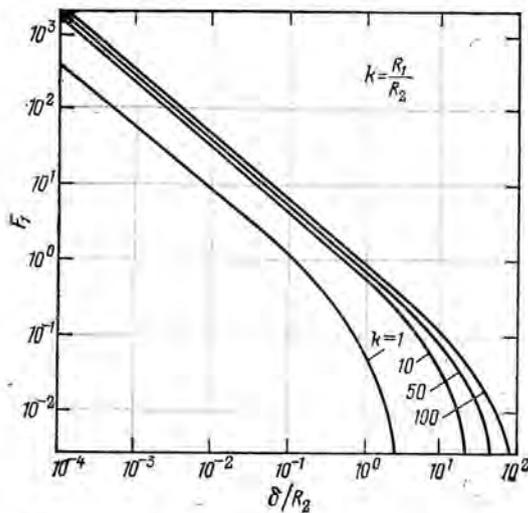
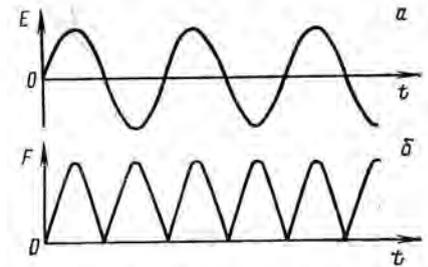


Рис. 1.5. Зависимость множителя F_1 в формуле (1.29) от относительных размеров капель k и относительного расстояния между их поверхностями δ/R_2 .

Рис. 1.6. Изменение во времени напряженности поля (а) и силы взаимодействия между каплями (б) в переменном электрическом поле.



поляризации капель, определяемых подвижностью ионов растворимых в воде солей и размерами капель, будет значительно больше скорости изменения поля. При увеличении частоты можно, очевидно, достигнуть такой области, где это условие нарушится; при этом сила взаимодействия капель уменьшится. Выше было показано, что критические частоты имеют порядок мегагерц. Поэтому для электрических полей промышленной частоты влиянием частоты на силу взаимодействия капель можно пренебречь.

В процессе коалесценции в электрическом поле могут возникать ситуации, приводящие к появлению на каплях электрических зарядов. Силовое взаимодействие заряженных капель рассмотрено в Приложении, раздел 4.

Помимо однородных электрических полей промышленной частоты в некоторых конструкциях аппаратов по подготовке нефти применяются неоднородные электрические поля постоянного напряжения. Механизм взаимодействия капель в постоянном поле такой же, как и в переменном электрическом поле промышленной частоты, однако интегральный эффект этого взаимодействия будет больше. Введем интегральную характеристику силового взаимодействия, которую определим как

$$\gamma = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt$$

Подставляя сюда $F(t)$ из (1.29), получим для постоянного поля $\gamma_{\text{п}} = F$, а для переменного поля с таким же амплитудным напряжением $\gamma_{\sim} = \frac{1}{2} \gamma_{\text{п}}$. Это различие в величинах γ и является одним из факторов, объясняющих повышение эффективности процессов коалесценции в постоянных электрических полях.

Эффект, обусловленный неоднородностью электрического поля, можно оценить, если рассматривать каплю как проводящий шар, эквивалентный диполю с электрическим моментом

$$M = 4\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} ER^3 \quad (1.30)$$

Поскольку электрический момент связан с зарядом поляризации $Q_{\text{п}}$ равенством $M = 2Q_{\text{п}}R$, то

$$Q_{\text{п}} = 2\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} ER^2 \quad (1.31)$$

Сила, действующая на шар в неоднородном поле E , с учетом (1.31), запишется в виде

$$F = 2\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} R^3 \text{grad } E^2 \quad (1.32)$$

Если капля несет свободный заряд Q , то на нее поле действует с силой

$$F_k = QE \quad (1.33)$$

Заряд капля может получить: при соприкосновении с одним из электродов (индукционная зарядка); за счет направленного движения ионов, которое может возникать при большом градиенте напряженности вблизи электродов; за счет диффузионного механизма [30, 31] и т. д. Максимальный заряд, который может получить проводящая сферическая капля, будет равен

$$Q_m = \beta\pi\epsilon_0 ER^2 \quad (1.34)$$

где β — числовой параметр, зависящий от механизма зарядки. Так, для индукционной зарядки $\beta=3$, для механизма направленного движения ионов $\beta=12$ [30]. Для сравнения сил, действующих на каплю в электрическом поле за счет его неоднородности и за счет свободного заряда на каплях, рассмотрим их отношение с учетом (1.34)

$$\frac{F_E}{F_k} = \frac{4}{\beta} \cdot \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} R \text{grad } E \quad (1.35)$$

Числовая оценка этого отношения при градиентах электрического поля порядка 1 кВ/см² показывает, что оно существенно меньше единицы. Однако из этого нельзя сделать вывод о том, что влиянием неоднородности поля на скорость движения капель можно пренебречь. Силы F_E и F_k перпендикулярны друг другу и взаимно независимы по своему действию. Если F_k действует вдоль силовых линий поля и способствует перемещению частиц от одного электрода к другому, то F_E перпендикулярна силовым линиям и способствует собиранию частиц в область поля с повышенной напряженностью. На рис. 1.7 показаны силовые линии электрического поля между двумя электродами, образованными двумя проводниками, перпендикулярными к плоскости рисунка, и направление действия сил F_E и F_k на отрицательно заряженные пробные частицы. Повышение локальной концентрации капель в областях с повышенной напряженностью поля и одновременное увеличение их под-

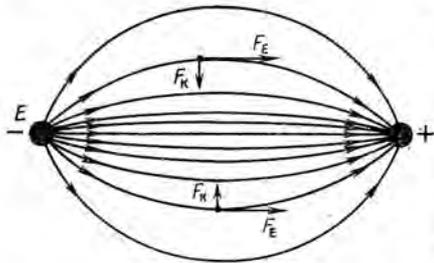


Рис. 1.7. Силовые линии электрического поля между двумя электродами и направление действия сил F_E и F_k на отрицательно заряженную пробную частицу.

вижности за счет свободных зарядов способствуют ускорению процесса коалесценции.

До сих пор при рассмотрении взаимодействия пары капель в электрическом поле предполагалось, что окружающая их нефть является идеальным диэлектриком с бесконечным пробивным напряжением и нулевой проводимостью. В действительности же это не так. Электропроводность нефтей изменяется в широких пределах и перекрывает диапазон от 10^{-13} до 10^{-6} (Ом·м)⁻¹ при комнатной температуре. При повышении температуры электропроводность нефти возрастает.

Пробивное напряжение для нефти также имеет предел. Все это может несколько видоизменить картину взаимодействия капель эмульсии в поле. Так, известно, что при сближении капель во внешнем электрическом поле среднее напряжение поля между их ближайшими точками возрастает (см. Приложение, раздел 4) и может превысить пробивное напряжение разделяющей капли пленки нефти. Это приводит к электрическому пробоею между каплями, потенциалы на них выравниваются и силовое взаимодействие прекращается. В постоянном поле капли после пробоя начнут расходиться, а в переменном — удаляться и приближаться на расстояние, при котором происходит пробой. С прекращением силового взаимодействия между каплями ослабевает и процесс их коалесценции.

Повышение электропроводности нефти также снижает эффективность ее обработки в электрическом поле, так как ускоряет процесс стекания электрических зарядов с капель и тем самым снижает величину их силового взаимодействия [32].

СПОСОБЫ И АППАРАТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИЙ

Во всех известных до настоящего времени промышленных процессах обезвоживания и обессоливания нефтей основным оборудованием является аппарат для разделения водонефтяной эмульсии. Разделение происходит путем отстаивания эмульгированной воды. Попадая в нижнюю часть аппарата, капли переходят в сплошной слой воды, так называемую дренажную воду, которую выводят из аппарата. В процессе осаждения на границе раздела фаз нефть—вода капля как бы останавливается и в зависимости от ее размеров, величины межфазного натяжения и чистоты межфазной поверхности может в течение длительного времени (от секунд до десятков минут) «жить» на этой границе до момента коалесценции со сплошной фазой [33, 34]. При таком замедлении движения капель они накапливаются выше границы раздела фаз, образуя эмульсионный промежуточный слой, концентрация воды в котором может быть значительно выше концентрации исходной эмульсии.

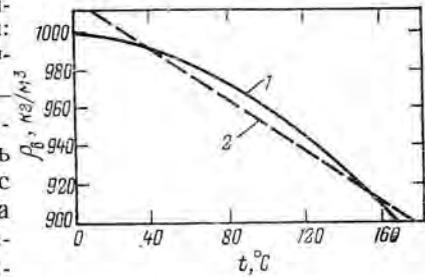
Рассмотрим принципиальные возможности конструктивного и технологического совершенствования и интенсификации процесса разделения эмульсии в подобном аппарате. Пусть в отстойной части аппарата соблюдается ламинарный закон движения жидкости и капли воды оседают по закону Стокса. Из формулы (1.4) видно, что ускорить процесс осаждения можно либо путем увеличения разности плотностей нефти и воды, либо уменьшением вязкости нефти, либо путем увеличения размеров капель. Первые два параметра тесно связаны с температурой процесса разделения эмульсии. На рис. 2.1 и 2.2 показаны зависимости от температуры плотностей дистиллированной воды* и различных нефтей. Из рис. 2.2 видно, что для нефтей эти зависимости практически линейны и в диапазоне изменения температур от 0 до 100 °С их можно аппроксимировать уравнением

$$\rho_n(t) = \rho_n(20) - \alpha(t - 20) \quad (2.1)$$

Коэффициент α изменяется в узких пределах. В первом приближении его можно считать постоянным и равным $7 \cdot 10^{-1}$ кг/(К·м³).

* Законы изменения плотностей минерализованной и дистиллированной воды в зависимости от температуры практически совпадают.

Рис. 2.1. Зависимость плотности дистиллированной воды от температуры: 1 — плотность воды $\rho_B(t)$; 2 — аппроксимирующая зависимость.



На рис. 2.1 показана аппроксимирующая линейная зависимость (обозначенная пунктиром) с коэффициентом угла наклона $7 \cdot 10^{-1}$ кг/(К·м³), т. е. равным величине α в уравнении (2.1). В диапазоне от 20 до 150 °С значения истинной и аппроксимирующей зависимостей различаются только в третьем десятичном знаке. Следовательно, разность плотностей воды и нефти будет изменяться в этом диапазоне температур тоже только в третьем знаке. Учитывая эту оценку, зависимость $(\rho_B - \rho_n)$ от температуры можно считать несущественной и исключить из управляющих факторов.

Иначе обстоит дело с вязкостью, которая является монотонно убывающей функцией температуры и может изменяться в десятки раз по сравнению с ее значением при нормальной температуре. Вязкостные свойства нефтей, в отличие от более простых смесей, трудно предсказать теоретически. Обычно их определяют экспериментально или берут из справочной литературы по нефтям (см. например, [35]). Для иллюстрации на рис. 2.3 приведены зависимости от температуры кинематических вязкостей для некоторых нефтей СССР [5].

Отбросим предположение о ламинарном режиме в зоне отстоя и рассмотрим общий случай отстоя при конвективном или турбулентном перемешивании. Интенсивность этого перемешивания не влияет на скорость относительного оседания капель в жидкости, в то время как качество отстоя эмульсии при таком перемешивании значительно ухудшится. Другими словами, процесс отстоя существенно зависит от гидродинамического режима отстойника, который в свою очередь определяется вязкостными свойствами нефти и конструктивными особенностями аппарата.

В процессе подогрева нефти, ее транспортировании и последующего отстоя капли воды могут приближаться друг к другу вследствие разности скоростей осаждения, либо за счет диффузионных механизмов. При благоприятных условиях сблизившиеся капли могут коалесцировать, что приводит к укрупнению капель и увеличению скорости

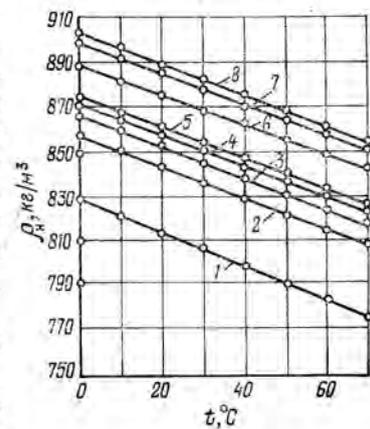


Рис. 2.2. Зависимость плотности различных нефтей от температуры.

Нефти: 1 — кулешовская; 2 — мухановская; 3 — бавлинская; 4 — кинельская; 5 — ромашкинская; 6 — бугуруславская; 7 — туймазинская; 8 — арланно-чишмагушская.

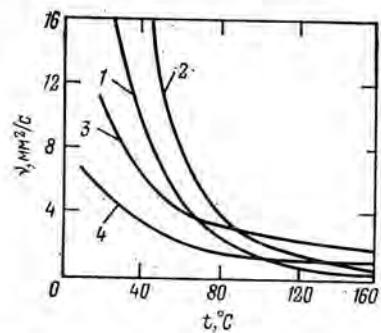


Рис. 2.3. Зависимость вязкостей нефтей от температуры.

Нефти: 1 — ромашкинская; 2 — арланская угленосная; 3 — туймазинская; 4 — шкаповская.

их оседания. Необходимым условием для коалесценции сближившихся капель является отсутствие на них оболочек из эмульгирующих веществ, препятствующих этому процессу. В современной техноло-

гии подготовки нефтей оболочки разрушают специальными химическими реагентами — деэмульгаторами и путем нагревания нефти. Механизм действия деэмульгаторов подробно обсуждается в гл. 4. Здесь мы укажем лишь на то, что повышение температуры приводит к увеличению эффективности работы деэмульгатора — к сокращению его расхода и уменьшению длительности срабатывания. Это обусловлено, с одной стороны, изменением активности и диффузионной подвижности деэмульгатора, с другой — ослаблением адсорбционных и механических свойств эмульгирующих веществ. Так, парафины, являющиеся хорошими эмульгаторами при низких температурах, когда они находятся в кристаллическом состоянии, с повышением температуры начинают плавиться и теряют свои эмульгирующие свойства.

Коалесценция в процессе разделения эмульсий необходима. Именно она обуславливает переход оседающих капель через границу раздела фаз. Чем слабее коалесценция, тем больше высота эмульгированного промежуточного слоя. Начиная с некоторого ее значения, верхняя часть этого слоя начнет захватываться потоком и выноситься из аппарата вместе с товарной нефтью, что приведет к «срыву» процесса обезвоживания.

Таким образом, скорость процесса разделения водонефтяных эмульсий в отстойнике определяется осаждением взвешенных капель и их коалесценцией. На скорости этих процессов влияют температура подогрева разделяемой эмульсии и добавляемые в нефть реагенты — деэмульгаторы. К управляющим параметрам можно отнести и химические вещества, называемые флокулянтами [36, 37]. Они так же, как и деэмульгаторы, способствуют коагуляции (или флокуляции) диспергированных капель, т. е. объединению их в группы, что в свою очередь приводит к ускорению процесса коалесценции. На скорость процесса коалесценции можно влиять и другими способами: применением электрических полей [4—6], коалесцирующих фильтров [38], ультразвука [39, 40], магнитных полей [41] и др. Однако из всех этих способов при подготовке нефти применяют в основном только электрические поля и реже — коалесцирующие фильтры.

Механизм действия коалесцирующих фильтров следующий. Водонефтяная эмульсия проходит через слой материала с развитой поверхностью (гранулированного или волокнистого), который хорошо смачи-

вается водой; капли эмульсии могут коалесцировать на этой поверхности, укрупняться и переходить в сплошную фазу.

В процессе работы фильтры загрязняются — они забиваются механическими примесями, смолистыми веществами и др., и эффективность их работы снижается. Поэтому при выборе фильтра нужно учитывать его стоимость, простоту регенерации (или замены) возможность утилизации отработанных элементов.

Разделим все основные факторы, определяющие процесс обезвоживания нефтей, на две группы и назовем их условно группами технологических и конструктивных управляющих параметров. Схема такого разделения представлена на рис. 2.4. Подобное группирование условно и не претендует на однозначность или полноту. Однако его введение позволяет несколько упростить дальнейшее рассмотрение и анализ технологических аппаратов.

Все современные высокопроизводительные процессы обезвоживания и обессоливания нефтей сопровождаются обязательным подогревом нефти с применением высокоэффективных деэмульгаторов. Если в аппаратах для разделения эмульсии электрическое поле или коалесцирующие фильтры не применяют, такие аппараты принято называть термохимическими отстойниками, или дегидраторами, а весь процесс — термохимическим обезвоживанием или обессоливанием. Если же внутри аппарата для разделения эмульсии встроены электроды, создающие электрическое поле, назначение которого ускорять процесс коалесценции, то такие аппараты называют электродегидратора-

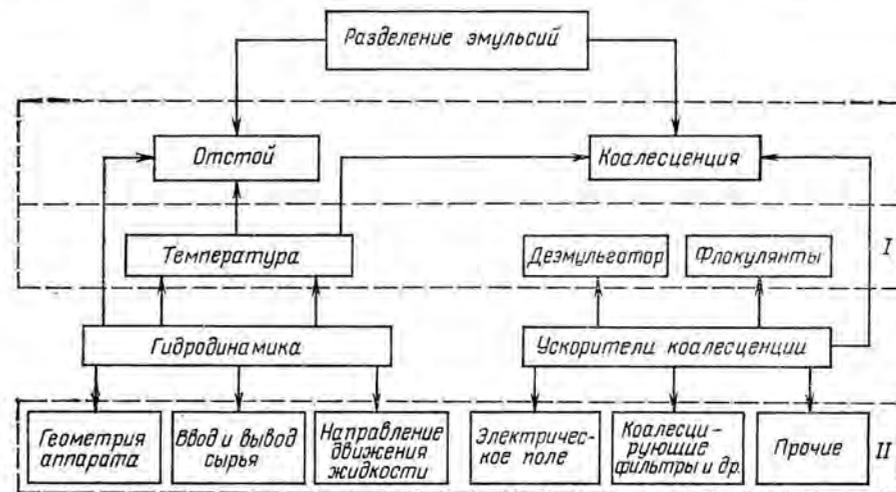


Рис. 2.4. Основные управляющие факторы, определяющие процесс разделения водонефтяной эмульсии:

I—группа технологических управляющих параметров; II—группа конструктивных управляющих параметров.

ми, а процессы, в которых их используют, — электрообезвоживанием или электрообессоливанием. Термохимические отстойники, оборудованные коалесцирующими фильтрами, называют отстойниками с фильтрами, или отстойниками с фильтрующей набивкой. Применяют их сравнительно редко, так как смена фильтров и их дальнейшая утилизация затруднена. Электрическое поле и коалесцирующие фильтры одновременно обычно не употребляют.

ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ОТСТОЙНЫЕ АППАРАТЫ

Для термохимического разделения эмульсий используют большое число различных конструкций и модификаций отстойных аппаратов, которые отличаются друг от друга геометрией емкостей, где производится отстой, конструкциями вводных и выводных устройств, а также некоторыми особенностями организации гидродинамического режима внутри отстойника. По геометрии емкостей отстойники делят на вертикальные, шаровые и горизонтальные. К наиболее старым конструкциям относятся вертикальные отстойники. В отечественной промышленности их практически уже не используют.

Шаровые аппараты строили на основе шаровых емкостей объемом 600 м³. Сейчас их серийно не производят, хотя в промышленности они встречаются еще довольно часто.

Горизонтальные отстойники считаются наиболее перспективными; их производят на основе цилиндрических емкостей различных объемов (50, 80, 100, 160, 200 м³). Наиболее распространены двухсоткубовые емкости с отношением длины к диаметру равным примерно шести. Расчетную или фактическую производительность дегидрататора удобно выражать в единицах его объема в единицу времени. Подобная единица измерения производительности существенно облегчает сравнение эффективности работы аппаратов различных конструкций и объемов.

В современных отстойниках, независимо от устройств ввода и вывода эмульсии (которые часто называют маточниками), стараются обеспечить ее равномерное распределение по сечению аппарата. Это достигается различными конструктивными приемами. Основные из них: ввод или вывод распределены по сечению аппарата (рис. 2.5), ввод или вывод локализованы в небольшом объеме. Основы расчета, а также методы расчета распределительных устройств первого типа можно найти в работах [42—44].

В большей части промышленных аппаратов конструктивные модификации выводных устройств мало отличаются от выводных устройств, изображенных на рис. 2.5. Для большей равномерности отбора жидкости по сечению аппарата отверстия в отборном распределительном устройстве рекомендуется располагать на верхней стороне труб.

Распределители для ввода эмульсии в аппараты, в отличие от отборных устройств, могут сильно различаться, хотя и построены на основе устройства, представленного на рис. 2.5. В основном это обуслов-

лено существенной зависимостью их конструкции от подачи эмульсии под слой дренажной воды либо в нефтяную фазу. Рассмотрим эти два случая отдельно.

Пусть распределительное устройство располагается под слоем дренажной воды. Нефть, содержащая воду в капельном состоянии, выходит струями из отверстий распределительного устройства в окружающую воду. В результате различных возмущений струя дробится на капли, которые свободно всплывают к поверхности раздела фаз и, коалесцируя на ней, объединяются со сплошной фазой. Каплеобразование при истечении одной несмешивающейся жидкости в другую описано в работах [24—26]. Для ускорения разрушения струи отверстия в маточниках иногда делают в нижней или боковой их части.

Конструкция трубчатого распределителя, очевидно, может обеспечить хорошее распределение сырья только вдоль труб. Для более равномерного распределения сырья по сечению аппарата надо трубчатые элементы устанавливать чаще, что не всегда удобно. Этот недостаток устраняется в конструкции распределителя, представленной на рис. 2.6. Новым элементом здесь являются открытые снизу короба с отверстиями на «крыше», устанавливаемые на некотором расстоянии друг от друга на две основные распределительные трубы. Отверстия в распределительных трубах располагаются прямо под коробами. Нефть вытекает в короба, вытесняет часть воды и, растекаясь по длине короба, образует сплошной слой. За счет разности плотностей нефть самотеком проходит через отверстия в «крыше», образует капли и всплывает вверх. В этой конструкции реализуется как бы двойное последовательное распределение нефти по сечению аппарата:

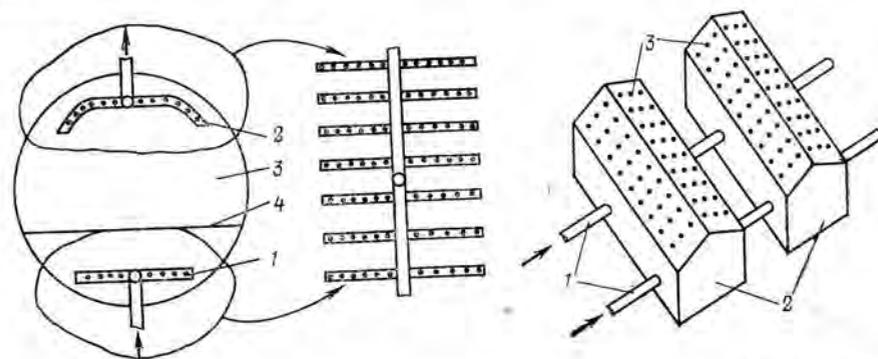


Рис. 2.5. Принципиальная схема конструктивного решения ввода и вывода нефти, распределенных по сечению отстойника:
1 — вводное распределительное устройство; 2 — выводное распределительное устройство;
3 — зона отстоя; 4 — граница раздела фаз.

Рис. 2.6. Конструкция вводного устройства, располагаемого под слоем дренажной воды:
1 — распределительные трубы для подачи сырья; 2 — распределительные короба; 3 — перфорация.

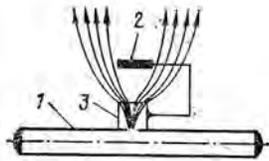


Рис. 2.7. Отбойник для гашения затопленной струи и увеличения ее сечения:
 1 — сырая распределительная труба; 2 — отбойник; 3 — трубчатая насадка.

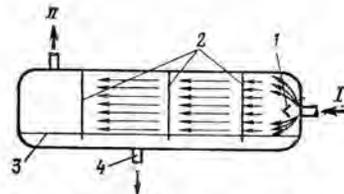


Рис. 2.8. Отстойник с торцевым вводом сырья и гидравлическими успокоителями.
 1 — отбойный козырек; 2 — перфорированные перегородки; 3 — граница раздела фаз; 4 — дренаж. I — сырая нефть; II — товарная нефть.

вдоль аппарата — по перфорированным трубам, в коробах по его ширине. Эта основная конструкция может иметь различные модификации.

Если сырую нефть вводить непосредственно в нефтяную фазу, то выходя из отверстий распределительного устройства, она образует затопленные струи, протяженность которых зависит от начальной скорости истечения, диаметра отверстий и вязкости нефти [47]. Эти струи в области распределительного устройства могут создавать зону турбулентного перемешивания, которая в отдельных случаях нежелательна. Для сокращения длины струй применяют различного типа отбойники. Одна из конструкций отбойника [48] показана на рис. 2.7.

Если распределительное устройство монтируется в непосредственной близости от стенки аппарата, то отверстия в таком устройстве делают со стороны стенки, которая в этом случае также выполняет роль отбойника.

Помимо устройств, обеспечивающих равномерное распределение сырья по объему, иногда применяют устройства, создающие сильно турбулентную зону в области ввода путем подачи сырья через щелевые распределительные головки (см. рис. 7.5, с. 131), а также через торцевые вводы, оборудованные отбойными козырьками (рис. 2.8). В последнем случае для лучшего распределения эмульсии по сечению аппарата поперек потока устанавливают перфорированные перегородки. Влияние таких перегородок на качество процесса разделения эмульсии обсуждается в работах [49, 50].

В зависимости от расположения вводного и выводного распределительных устройств в отстойниках устанавливается некоторое преобладающее направление потока жидкости, по которому их делят на аппараты с горизонтальным и с вертикальным (или восходящим) потоком сырья.

Термохимические отстойники иногда изготовляют в едином блоке с подогревателем и дополнительным устройством, предназначенным для отделения попутного газа [38, 51].

В литературе [4—6, 38] при обосновании эффективности работы отстойников с нижним вводом сырья большое внимание уделяется эффекту «промывки» эмульсии через слой дренажной воды. Проанализируем этот процесс с целью выяснения физических явлений, лежащих в его основе.

Термин «промывка» эмульсии широко распространен в отечественной литературе, посвященной процессам подготовки нефти, и означает подачу сырой нефти через распределительное устройство под слой дренажной воды. Считается, что подобная процедура способствует повышению эффективности работы отстойных аппаратов. Весь процесс промывки можно разделить на следующие стадии:

выход эмульгированной нефти через распределительное устройство в слой дренажной воды;

подъем нефти к границе раздела фаз;

прохождение нефти через границу раздела фаз;

прохождение эмульсии сырой нефти через промежуточный слой.

Проведем качественный анализ этих стадий. При выходе нефти через отверстия распределительного устройства, расположенного под слоем дренажной воды, формируются затопленные струи. На некотором расстоянии от точки выхода струи начинают дробиться и образуются отдельные капли, которые всплывают к границе раздела фаз. При ее достижении капли коалесцируют со сплошной фазой, высвобождая содержащуюся в них эмульгированную воду. Мелкие капли воды увлекаются потоком нефти вверх. Проходя через поровое пространство промежуточного слоя, они могут коалесцировать с более крупными каплями, в результате чего могут менять направление движения и возвращаться к границе раздела фаз. Очевидно, вероятность подобных актов коалесценции пропорциональна высоте промежуточного слоя и определяется законами коалесценции в условиях стесненного движения капель.

При обсуждении механизма промывки эмульсии через слой дренажной воды некоторые авторы приходят к выводу, что промывка способствует интенсивному выходу эмульгированной воды из нефти при ее подъеме через слой дренажной воды и при прохождении границы раздела фаз. Это явление было проверено путем исследования процесса промывки в лабораторных условиях [52].

Опыты проводили на эмульсиях воды в трансформаторном масле и в нефти. Радиус основной доли эмульгированных капель был 20—50 мкм. Слой воды, через которую шла промывка, был высотой 0,7 м. Всплывающие капли сплошной среды имели радиус 1—3 мм. Для фиксации выделения эмульгированной воды в нее добавляли раствор поваренной соли или анилиновый краситель синего цвета. Количество воды, переходящее в сплошную фазу, определяли либо по изменению ее солёности, либо по изменению прозрачности, измеряемой электрофотокалориметром. В каждом опыте через слой дренажной воды про-

пускали около 350 см³ эмульсии. В верхней части прибора ее отбирали, а из оставшейся части дренажной воды готовили среднюю пробу для анализа.

Результаты опытов показали, что при содержании воды в эмульсии до 10%, количество воды, выходящее в сплошную фазу, не превышает 3% от общего количества дисперсной фазы. Добавление деэмульгатора в слой дренажной воды не влияет на результаты опытов. При увеличении высоты слоя промывочной воды до 1,5 м количество выделявшейся воды не изменялось.

Опыты с красителем показывают, что коалесценция капель сплошной фазы, содержащих воду, на границе раздела фаз также не сопровождается заметным выделением воды в промывочный слой.

Полученные результаты указывают на то, что при подъеме капель сплошной фазы через слой дренажной воды и при их последующем прохождении через границу раздела фаз дисперсная фаза в слой дренажной воды практически не выделяется. Следовательно, имеющиеся в литературе представления о механизме промывки ошибочны, а сам термин не соответствует тому процессу, который под ним подразумевают.

Эффект, наблюдавшийся некоторыми авторами при исследовании влияния толщины слоя воды на качество обезвоживания вероятно, можно объяснить только улучшением равномерности распределения эмульсии по сечению отстойника. Это будет тем более заметно, чем хуже изготовлено распределительное устройство. Слой воды гасит и разбивает затопленные струи и способствует более равномерному распределению эмульсии по сечению аппарата.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ СЛОЙ В ОТСТОЙНИКЕ

Промежуточный эмульсионный слой, расположенный выше границы раздела фаз, существует в любом отстойнике и выполняет важные технологические функции. Через этот слой проходит вся отстаивающаяся вода; он способствует процессу коалесценции на границе раздела фаз; в самом слое может идти межкапельная коалесценция, на нем может фильтроваться мелкодисперсная составляющая эмульсии, когда сырье вводят через этот слой. В отстойном аппарате промежуточный слой является, пожалуй, наиболее сложным звеном. Он существует только в условиях динамического равновесия совокупности процессов, способствующих его образованию и разрушению, обладает пространственно-неоднородной структурой, обусловленной различной концентрацией, вязкостью и дисперсным составом образующих его частиц. В настоящее время нет адекватных моделей для описания поведения подобных гидродинамических систем, хотя и имеется большое количество исследований, посвященных различным их частным случаям [53].

Проведем качественный анализ процесса образования и «жизни» промежуточного слоя в отстойном аппарате. Для упрощения рассуждений рассмотрим аппарат, работающий в непрерывном стационар-

ном режиме, у которого сырье вводится выше промежуточного слоя. Пусть через аппарат вначале прокачивается сухая нефть, которую в некоторый момент времени заменили на обводненную. Попадая в отстойник, эмульгированные капли воды начинают оседать и концентрироваться на границе раздела фаз нефть—вода. Это накопление происходит из-за того, что скорость отдельной капли при приближении к границе раздела резко замедляется, так как ей приходится выдавливать пленку сплошной фазы, отделяющую ее от границы раздела. Время, отсчитываемое от начала замедления до момента коалесценции капли, называется временем ее жизни на межфазной поверхности. Оно зависит от размеров капли, вязкости сплошной среды, разности плотностей фаз и самое главное для рассматриваемого случая — от чистоты межфазной поверхности. Даже небольшие загрязнения могут увеличить время жизни капли от секунд до минут и даже десятков минут [54]. Поэтому в отстойнике первые капли не могут быстро преодолеть межфазную границу раздела. На них оседают другие капли и начинают формироваться промежуточный слой.

По мере увеличения толщины промежуточного слоя растет его давление на нижние капли, что способствует более быстрому выдавливанию вязкой прослойки отделяющей их от дренажной воды, а следовательно, и более быстрой коалесценции. Слой будет нарастать до тех пор, пока количество воды, поступающее в его верхнюю часть в единицу времени, не сравняется с количеством воды, коалесцирующим на межфазной поверхности. Высота слоя зависит от количества дисперсной и сплошной фаз, проходящих через него, от дисперсного состава эмульсии сырой нефти, условий отстоя и межкапельной коалесценции в слое, а также от степени чистоты межфазной поверхности. В зависимости от изменения этих факторов высота слоя будет увеличиваться или уменьшаться. Наиболее медленно во времени может изменяться чистота межфазной поверхности. Препятствующие коалесценции различного рода поверхностно-активные вещества могут накапливаться на ней довольно медленно. Также медленно будет нарастать и высота промежуточного слоя. Эти внутренние процессы в отстойнике начнут влиять на качество обезвоживания только тогда, когда промежуточный слой вырастет настолько, что начнет захватываться и выноситься вместе с товарной нефтью. Подобные явления на практике наблюдаются при обезвоживании высокопарафинистых нефтей при пониженных температурах.

В работе [55] приводятся результаты экспериментального исследо-

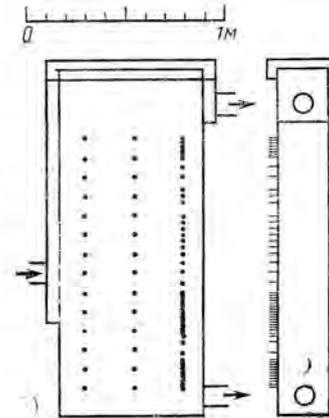


Рис. 2.9. Схема лабораторного отстойника.

вания структуры промежуточного слоя в отстойнике (рис. 2.9). Исследовались только высокослойные отстойники (высота промежуточного слоя более 15 см). Сырье вводили в зону промежуточного слоя. Дисперсную среду приготавливали смешением разбавленной морской воды с техническим бутанолом. Основными регулируемыми параметрами в опытах были: концентрация дисперсной фазы (22—66%); производительность отстойника по сырью [11,5—16,6 м³/(ч·м²)]. Температуру поддерживали на уровне 16 или 22 °С. Было установлено, что промежуточный слой можно условно разделить на две части: 1) слой с плотной упаковкой дисперсной фазы («плотный» слой), расположенный вблизи границы раздела фаз; он составляет 10—20% общей высоты промежуточного слоя; 2) «выравнивающий концентрационный» слой, к которому относится оставшаяся часть промежуточного слоя и который характеризуется небольшим и почти линейным градиентом концентрации; на верхней границе концентрация в промежуточном слое достаточно резко уменьшается до нуля. Результаты опытов представлены на рис. 2.10, 2.11, а соответствующие им численные значения приведены в табл. 2.1 и 2.2.

На рис. 2.10 приведены характерные графики для величин концентрации дисперсной фазы в промежуточном слое на расстоянии h от границы раздела фаз. Аналогичные зависимости приведены на рис. 2.11 в безразмерных координатах, где H — полная высота промежуточного слоя.

Из приведенных данных видно, что концентрация дисперсной фазы в выравнивающем концентрационном слое близка к ее концентрации в исходной эмульсии.

На основании результатов опытов авторы [55] приходят к выводу, что основное влияние на ускорение процесса коалесценции нижних капель промежуточного слоя с водной фазой оказывает не весь слой,

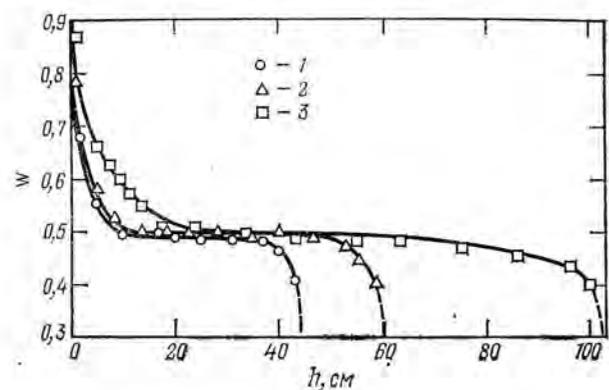


Рис. 2.10. Структура дисперсного слоя при различных удельных нагрузках (эмульсия м/в; $T=16$ °С; $W=0,5$).

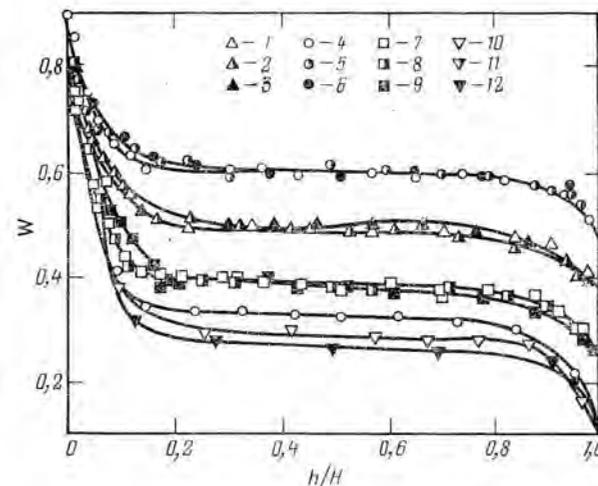


Рис. 2.11. Структура дисперсного слоя при различных режимных условиях (эмульсия в/м. $T=16$ °С).

а только его нижняя часть с повышенной концентрацией дисперсной фазы.

При дальнейшем исследовании с помощью трассерной техники эти же авторы [55] показали, что концентрационный слой служит фильтрующим элементом для мелкодисперсной составляющей эмульсии. Замедляя скорость выноса мелких капель, этот слой увеличивает вероятность их коалесценции с более крупными каплями. Следует отметить, что если в сплошную или дисперсную фазу попадает даже незначительное количество загрязнений, межкапельная коалесценция в промежуточном слое резко сокращается [53].

Основная масса коалесцирующего слоя состоит из мелких капель воды размерами, близкими к критическому*. Эти капли попадают в отстойник вместе с сырьем и могут образовываться при ступенчатой межкапельной коалесценции. Любые методы, способствующие укрупнению капель критического размера в коалесцирующем слое или уменьшению их количества в исходной эмульсии, должны приводить к повышению производительности отстойника.

Промежуточный слой, помимо рассмотренных его функций, за счет

* Капли больше критического размера оседают, а меньше — могут быть вынесены из отстойника восходящим потоком.

Таблица 2.1

Номер кривой	Q/A , м ³ /(ч·м ²)	H , см
1	11,5	44,0
2	12,5	60,5
3	13,7	103,0

Таблица 2.2

Номер кривой	W	H , см	Q/A , м ³ /(ч·м ²)	Номер кривой	W	H , см	Q/A , м ³ /(ч·м ²)
1	0,498	44,0	11,5	7	0,40	66,0	12,6
2	0,503	103,0	13,7	8	0,40	81,0	13,5
3	0,505	60,5	12,5	9	0,394	102	14,7
4	0,595	72,5	12,7	10	0,337	54,0	14,1
5	0,604	102,5	16,6	11	0,285	31,0	14,35
6	0,607	37,0	—	12	0,283	25,0	12,6

своей структуры, очевидно, еще должен способствовать равномерному распределению восходящего потока сырья по горизонтальному сечению аппарата.

Если сырье будет подаваться в отстойник не выше границы раздела фаз, а под слой дренажной воды, то при прохождении капель эмульсии снизу через границу раздела фаз будет происходить барботаж нижней части промежуточного слоя с плотной структурой и его «разбухание». Структура концентрационной части слоя не изменится, так как условия существования для нее остаются прежними. Общая высота промежуточного слоя при этом будет возрастать.

При исследовании промежуточных слоев в отстойниках с горизонтальным потоком сырья [53] было замечено, что они имеют форму близкую к клинообразной. Широкая сторона клина обращена в сторону ввода. Скорость утончения клина по его длине зависит от скоростей межкапельной коалесценции в промежуточном слое и на поверхности раздела фаз.

Если предположить, что вертикальные слои жидкости в отстойнике движутся параллельно и друг с другом не перемешиваются, то форму промежуточного слоя можно получить из опытов по отстою эмульсии в режиме покоя. В работе [55] приведены зависимости высоты дисперсного слоя от времени отстаивания для исходной 50%-ной эмульсии морской воды с техническим бутанолом. Опыты проводили на отстойнике (см. рис. 2.9), зависимость высоты дисперсного слоя от отстаивания эмульсии представлена на рис. 2.12. Поскольку время отстаивания t с расстоянием l , которое проходит вертикальный слой жидкости от ввода в отстойник, связано равенством $l = v_{\text{н}} t$, то из рис. 2.12 легко получить зависимость высоты промежуточного слоя от расстояния до ввода в аппарат путем соответствующего изменения масштаба оси ординат.

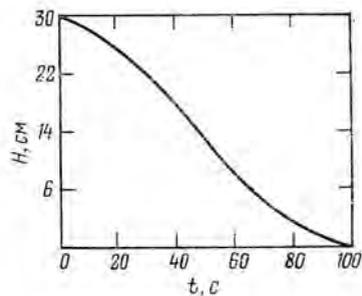


Рис. 2.12. Зависимость высоты дисперсного слоя от времени отстаивания (эмульсия в/м; $T = 16^\circ \text{C}$, $W = 0,5$).

В реальных условиях предполагаемое выше «поршневое движение» сырья в отстойниках будет нарушаться вследствие повышенной вязкости эмульсионного слоя, поэтому верхние слои жидкости в отстойнике будут двигаться быстрее нижних. Это приведет к уширению «клина» промежуточного слоя в его начальной части.

ЭЛЕКТРОДЕГИДРАТОРЫ

Аппараты для разделения водонефтяных эмульсий с применением электрических полей называются электродегидраторами. По типу используемого напряжения их делят на электродегидраторы, работающие на напряжении промышленной частоты и электростатические дегидраторы (или разделители), работающие на постоянном электрическом токе. В начале 50-х годов делались попытки создать высокочастотные электродегидраторы [56], однако практического применения они не нашли.

Электродегидратор отличается от термохимического отстойника наличием в зоне отстоя электродов, между которыми создается электрическое поле. Электродегидраторы создавались на основе отстойников всех типов: вертикальных, шаровых и горизонтальных. Во всех промышленных образцах электродегидраторов распределительные устройства располагаются так, чтобы обеспечить вертикально восходящий поток жидкости. Электроды, имеющие решетчатую конструкцию, через которую может свободно протекать жидкость, обычно располагаются поперек потока.

Крепят электроды на подвесных изоляторах; электричество к ним подводится через проходные изоляторы — бушинги, причем к каждому электроду — от отдельного повышающего трансформатора. Один конец высоковольтной обмотки подключается к электроду, а другой заземляется. Трансформаторы подсоединяются «встречно», т. е. в каж-

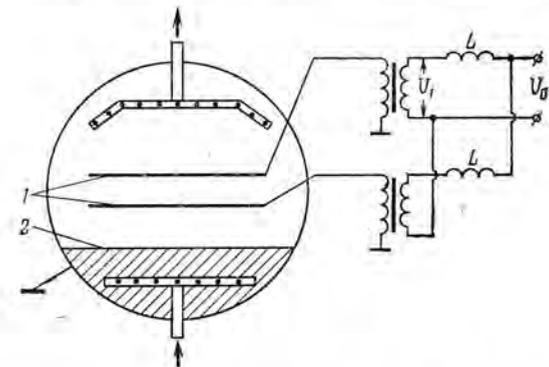


Рис. 2.13. Принципиальная схема включения высоковольтных трансформаторов и катушек реактивной мощности L :
1 — электроды; 2 — граница раздела фаз.

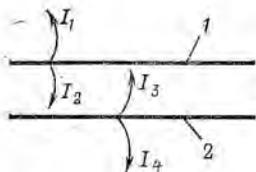


Рис. 2.14. Схема распределения токов в дегидрататоре с двумя плоскими электродами:
 $I_1, 2$ — верхний и нижний электроды; I_1, I_2 — токи от верхнего электрода к корпусу и нижнему электроду; I_3, I_4 — токи от нижнего электрода к верхнему электроду и к границе раздела фаз.

дый момент времени напряжение на высоковольтной стороне сдвинуто относительно друг друга на 180° . Такое включение позволяет создать разность напряжений между электродами численно равную сумме напряжений питающих трансформаторов без увеличения напряжений на проходных изоляторах. Это важный фактор, так как проходные изоляторы являются слабым конструктивным звеном и могут выходить из строя в результате электрического пробоя*. Чтобы пробой одного изолятора не приводил к отключению электрического поля во всем аппарате, а также для обеспечения подвода большей мощности электроды иногда делают секционированными, и каждая секция подключается к своему трансформатору.

Для предотвращения аварийных ситуаций при коротких замыканиях в высоковольтной цепи дегидрататора повышающие трансформаторы включают последовательно с ограничителями тока, в качестве которых обычно употребляют катушки реактивной мощности, часто называемые просто реакторами (рис. 2.13). Увеличение силы тока в первичной цепи приводит к возрастанию сопротивления реактора и к увеличению на нем падения напряжения, что в свою очередь обуславливает уменьшение напряжения V_1 на первичной обмотке повышающего трансформатора и уменьшение силы тока в первичной цепи.

На современных электродегидрататорах применяют повышающие трансформаторы мощностью несколько десятков киловатт и с напряжением на выходе в режиме холостого хода несколько десятков киловольт. В отечественной промышленности наиболее распространены трансформаторы мощностью 30—50 кВт и выходным напряжением 20—40 кВ.

Поскольку один конец высоковольтной обмотки заземлен (см. рис. 2.13), в электродегидрататоре электрическое поле существует не только в пространстве между электродами, но и между электродами и корпусом, электродами и слоем дренажной воды, т. е. электрическое поле существует во всем аппарате. Максимальная напряженность поля достигается в межэлектродном пространстве, и ее можно оценить как напряженность поля в плоском конденсаторе, образованном электродами. Меньшая напряженность поля реализуется между нижним электродом и слоем дренажной воды и еще меньшая — между верхним электродом и корпусом аппарата. Различие напряженностей электрического поля в верхней и нижней частях аппарата объясняется различием расстояний между электродами и проводящими поверхностями, между которыми оно создается.

* Это относится также к подвесным изоляторам.

Рис. 2.15. Схема соединения электродов в дегидрататоре для выравнивания нагрузки питающих трансформаторов:
 1 — граница раздела фаз; 2 — промежуточный слой; 3 — электроды; 4 — дренаж.

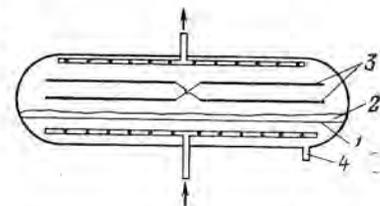


Схема распределения электрических токов в электродегидрататоре изображена на рис. 2.14. Сила тока, проходящая через элемент объема, прямо пропорциональна напряженности поля и проводимости среды. Поскольку, напряженность поля и проводимость среды под нижним электродом выше, чем в верхней части, ток I_4 может значительно превышать ток I_1 . Так как ток I_2 равен току I_3 , то мощность, отбираемая от трансформатора, питающего нижний электрод, больше мощности, отбираемой от второго трансформатора (см. рис. 2.14). При большой площади электродов разница мощностей может быть существенной. Для ее уменьшения иногда применяют перекрестную схему подключения электродов (рис. 2.15). При такой схеме один трансформатор подключается к половине нижнего и к половине верхнего электрода.

Так же, как и термохимические отстойники, электродегидрататоры могут объединяться конструктивно с блоками подогрева нефти и блоками газосепарации. Такой аппарат фирмы С-Е NATCO представлен на рис. 2.16.

В последнее время водонефтяные эмульсии все чаще разделяют в постоянном электрическом поле с помощью высокоэффективных элект-

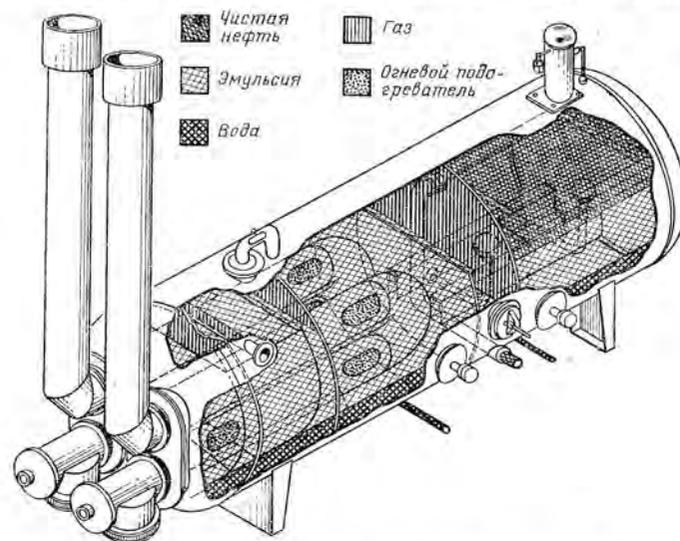


Рис. 2.16. Схема электродегидрататора для разделения нефти, газа и воды фирмы СЕ NATCO.

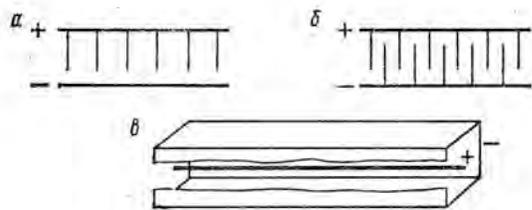


Рис. 2.17. Конструкции электродов, создающих неоднородное электрическое поле:
а, б — штырьевые электроды; в — камерный электрод.

ростатических разделителей. В частности их используют для глубокого обезвоживания дизельных и ракетных топлив. Остаточное содержание воды в подготовленном продукте удается довести до тысячных долей процента [57]. В электродегидрататорах, работающих на токе промышленной частоты, такого стабильного качества продукции получить не удается.

Однако, несмотря на высокую эффективность, широкое распространение электростатические обезвоживающие аппараты пока не получили из-за отсутствия надежных и дешевых высоковольтных источников постоянного тока.

Выше было показано, что повышению скорости процесса коалесценции капель в постоянном электрическом поле способствуют зарядка капель и повышение их концентрации в областях максимальной напряженности поля. В связи с этим поле в электростатических дегидрататорах делается существенно неоднородным. Это достигается путем использования электродов с большой кривизной поверхности (проволоки, штыри и др.) и их специального пространственного расположения. На рис. 2.17 приведены три подобные конструкции. В первой из них электрическое поле создается между плоскостью и системой расположенных над ней штырьевых электродов, во второй используются штырьевые электроды, разделенные на две группы. Третья конструкция называется камерным электродом — электрическое поле в ней создается между внешним корпусом и тонким электродом (см. рис. 2.17, в).

Наряду с электростатическими дегидрататорами с неоднородными полями используют электродегидрататоры с однородными полями. Сравнить их по эффективности работы довольно трудно, так как эффективность промышленных аппаратов определяется, очевидно, не только коалесценцией в поле, которая зависит от его напряженности, неоднородности и длительности пребывания в нем эмульсии, но и от конструктивных особенностей аппарата. Можно лишь утверждать, что неоднородность электрического поля не может ухудшить этот процесс, а для оценки его улучшения надо анализировать работу конкретного аппарата.

Электростатические дегидрататоры так же, как и электродегидрататоры, работающие на токе промышленной частоты, можно использовать в комплекте с подогревателем и газосепаратором.

ВЫБОР И ПОДДЕРЖАНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОДЕГИДРАТОРАХ

Различные авторы определяли оптимальную напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве. Для этого снимали графики зависимости скорости выпадения свободной воды при отстое эмульсии, пропущенной предварительно через электрическое поле, от напряженности поля. Зависимость скорости расслоения эмульсий от напряженности электрического поля всегда имеет экстремальный характер (рис. 2.18). Экстремум не острый, хотя и ярко выраженный, а его положение зависит от большого числа внешних факторов. Для большей части слабоконцентрированных эмульсий он находится в области 2,0—3,5 кВ/см. Возникновение экстремума обычно объясняют дроблением наиболее крупных капель эмульсии в электрическом поле большой напряженности. Другой и, на наш взгляд, более правдоподобной причиной возникновения экстремальной зависимости может быть ослабление силового взаимодействия капель эмульсии за счет электрического пробоя между ними в полях с напряженностью выше критической. Подобный механизм позволяет объяснить не только наличие экстремума на исследуемой зависимости, но и ослабление эффекта от воздействия электрического поля на эмульсию при повышении проводимости нефти.

С увеличением проводимости нефти (или обводненности эмульсии) возрастает и мощность, требуемая на поддержание заданного режима электрообработки. Для количественной оценки связи между напряженностью поля, проводимостью эмульсии и мощностью трансформаторов рассмотрим схему подключения напряжения к электродам, изображенную на рис. 2.19. Сопротивление нагрузки трансформатора представим в виде параллельно соединенной емкости C , образуемой электродами, и сопротивления R , определяемого проводимостью эмульсии в межэлектродном пространстве. Если площадь электродов S , расстояние между ними l , диэлектрическая проницаемость эмульсии ϵ , а ее проводимость κ , то величины C и R можно определить по формулам

$$R = \frac{l}{S\kappa}, \quad C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l}, \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \quad (2.2)$$

Пользуясь правилом пересчета нагрузки трансформатора в его первичную

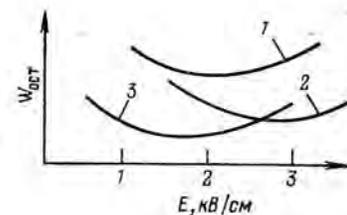


Рис. 2.18. Типовые зависимости изменения содержания остаточной воды от напряженности в межэлектродном пространстве:

1—3 — номера опытов.

цепь [57], заменим рассматриваемую цепь подключения электродов эквивалентной (см. рис. 2.19, б). Считая, что активное сопротивление реактора и трансформатора гораздо меньше активного сопротивления нагрузки, а индуктивное сопротивление реактора гораздо больше индуктивного сопротивления трансформатора при коротком замыкании, получим:

$$Z_L = jY_L, Y_L = \omega L, Z_H = X_H + jY_H$$

$$X_H = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{R}{1 + (\omega RC)^2}, Y_H = -\frac{1}{n^2} \frac{\omega R^2 C}{1 + (\omega RC)^2} \quad (2.3)$$

где L — индуктивность реактора, $n = \frac{U_2}{U_1}$ — коэффициент трансформации, ω — круговая частота питающего напряжения. При напряжении на входе U_0 на первичной обмотке будет напряжение U_1 и через нее будет течь ток I_1 .

$$I_1 = \frac{U_0}{|Z|}, U_1 = \frac{U_0 |Z_H|}{|Z|}$$

$$|Z| = \sqrt{X_H^2 + (Y_H + Y_L)^2}, |Z_H| = \sqrt{X_H^2 + Y_H^2} \quad (2.4)$$

Пусть N_T — номинальная мощность трансформатора, которая определяется как допустимая активная мощность в первичной цепи $N_T = \max(I_1 U_1)$. Из условия согласования выходного сопротивления генератора с нагрузкой получаем, что максимальная мощность на трансформаторе выделяется при выполнении равенства

$$|Z_L| = |Z_H| \quad (2.5)$$

Подставляя I_1 и U_1 из (2.4) в формулу для определения мощности и учитывая (2.5), получим следующее неравенство для определения индуктивного сопротивления реактора

$$|Z_L| \geq \frac{U_0^2}{2N_T} - Y_{H0} \quad (2.6)$$

Если Y_{H0} — максимальное значение реактивного (емкостного) сопротивления нагрузки, то минимально необходимое индуктивное сопротивление реактора будет определяться равенством

$$|Z_{L0}| = \frac{U_0^2}{2N_T} - Y_{H0} \quad (2.7)$$

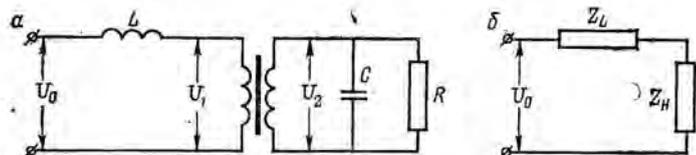
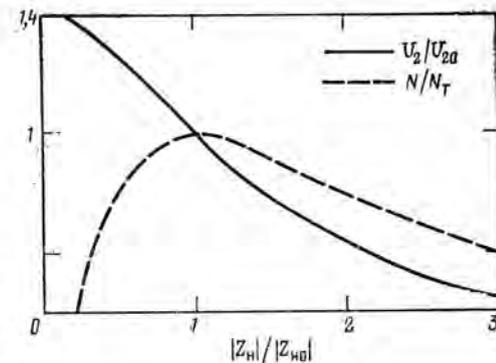


Рис. 2.19. Принципиальная (а) и эквивалентная (б) схемы для расчета затрат мощности в электродегидраторе.

Рис. 2.20. Зависимости напряжения на электродах и расходуемой мощности от сопротивления нагрузки трансформатора.



Подставляя (2.7) в (2.4), определяя U_1 и пересчитывая его во вторичную цепь трансформатора, получим, что напряжение на электродах в зависимости от величины Z_H будет меняться по закону

$$\frac{U_2}{U_0} = \frac{n}{\sqrt{1 + \left(\frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|}\right)^2 + 2 \frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|} \sin \varphi}}, \sin \varphi = \frac{Y_H}{|Z_H|} \quad (2.8)$$

Если при нагрузке $|Z_{H0}|$ задать требуемое напряжение на электродах U_{20} , то из (2.8) можно определить коэффициент трансформации

$$n = \frac{U_{20}}{U_0} \sqrt{2(1 + \sin \varphi_0)}, \sin \varphi_0 = \frac{Y_{H0}}{|Z_{H0}|} \quad (2.9)$$

При выбранных таким образом параметрах трансформатора напряжение на электродах и активная мощность на трансформаторе будут связаны с параметрами эмульсии равенством

$$\frac{U_2}{U_{20}} = \sqrt{\frac{2(1 + \sin \varphi_0)}{1 + \left(\frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|}\right)^2 + 2 \frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|} \sin \varphi}}$$

$$n^2 |Z_H| = \frac{l}{S \sqrt{\kappa^2 + (\omega \epsilon_0 \epsilon)^2}} \quad (2.10)$$

$$\frac{N}{N_T} = \frac{2 \left(\frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|} + \sin \varphi \right)}{1 + \left(\frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|} \right)^2 + 2 \frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|} \sin \varphi}, \sin \varphi = -\frac{\epsilon_0 \epsilon}{\sqrt{\kappa^2 + (\omega \epsilon_0 \epsilon)^2}}$$

Для мощных трансформаторов обычно справедливо условие $\sin \varphi_0 \approx 0$. При напряжении U_2 во вторичной цепи такого трансформатора будет течь ток

$$I_2 = \frac{U_2}{l} S \sqrt{\kappa^2 + (\epsilon_0 \epsilon \omega)^2} \quad (2.11)$$

Отсюда видно, что если $\kappa \gg \epsilon_0 \epsilon \omega$, емкостной составляющей в нагрузке трансформатора можно пренебречь. Для этого случая $\sin \varphi_0 = 0$,

$\sin \varphi = 0$, и (2.10) можно переписать в виде:

$$\frac{U_2}{U_{20}} = \frac{\sqrt{Z}}{\sqrt{1 + \left(\frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|}\right)^2}}, \quad \frac{N}{N_T} = \frac{2 \frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|}}{1 + \left(\frac{|Z_{L0}|}{|Z_H|}\right)^2}, \quad n^2 |Z_H| = \frac{l}{S\kappa} \quad (2.12)$$

Зависимости U_2/U_{20} и N/N_T от Z_{L0}/Z_H , рассчитанные по этим формулам, представлены на рис. 2.20.

При больших проводимостях эмульсии, задавая напряженность электрического поля E в межэлектродном пространстве, получим следующее равенство для определения номинальной мощности трансформатора

$$N_T = \frac{U_{20}^2}{R} = E^2 \kappa V = N_{T0} V \quad (2.13)$$

где N_{T0} — требуемая мощность для поддержания напряженности поля E в единице объема; V — полный объем электрического поля.

Так, если $\kappa = 10^{-6} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$ и требуется поддерживать напряженность поля $E = 1 \text{ кВ/см}$ в электродегидраторе с $V \approx 20 \text{ м}^3$, то из (2.12) получаем $N_{T0} = 10 \text{ кВт/м}^3$, $N_T = 200 \text{ кВт}$.

ПРОЦЕСС ОБЕССОЛИВАНИЯ НЕФТЕЙ

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА, КОЭФФИЦИЕНТЫ ЕГО УСИЛЕНИЯ

В настоящее время глубокое обессоливание нефтей везде проводят по единой принципиальной схеме (рис. 3.1). На установку обессоливания поступает сырая нефть с обводненностью $W_{вх}$ и содержащая $S_{вх}$ солей. Перед I ступенью нефть нагревают и добавляют к ней деэмульгатор и промывочную воду $W_{пр}^{(1)}$. После интенсивного перемешивания нефти с промывочной водой образовавшаяся эмульсия поступает в аппарат для отделения воды — электродегидратор. Вместе с водой из нефти удаляются соли. С выхода I ступени нефть с обводненностью $W_{вых}^{(1)}$ и содержащая $S_{вых}^{(1)}$ солей поступает на II ступень обессоливания. Перед II ступенью к нефти опять добавляют пресную промывочную воду $W_{пр}^{(2)}$, которую перемешивают с нефтью. После отделения воды из нефти на II ступени, товарную нефть, содержащую $W_{вых}^{(2)}$ воды и $S_{вых}^{(2)}$ солей, направляют на дальнейшую переработку.

В последнее время совершенствование процесса обессоливания идет по пути конструирования новых и улучшения старых технологических схем и аппаратов для отделения воды (электродегидраторов) [59—65], автоматизации и оптимизации обессоливающих установок [66—69], синтеза новых высокоэффективных деэмульгаторов [70—71] и оптимизации процесса обессоливания по управляемым технологическим параметрам, таким, как подача промывочной воды, температурный режим, дозировка и место подачи деэмульгатора и др. Большая часть проведенных исследований, оформленная в виде рекомендаций по улучшению качества обессоливания, уже реализована на промышленных установках или находится в стадии проектирования. Так, существуют обессоливающие установки, работающие в три и даже в четыре ступени. Созданы и работают установки, работающие при 140—160 °С (раньше процесс обессоливания проводили при температуре не выше 70—90 °С). Реализовано в металле и испытано в промышленных условиях большое число вариантов электродегидраторов: аппараты вертикального, шарового и горизонтального типа, аппараты с радиально-щелевыми и продольно-щелевыми распределительными головками; аппараты с вертикальным вводом сырья через распределительные устройства и слой промывочной воды; аппараты с различной конструктивной организацией и напряженностью электрического поля и др. В результате исследовательских работ в последние годы удалось существенно улучшить качество обессоливания нефти, хотя

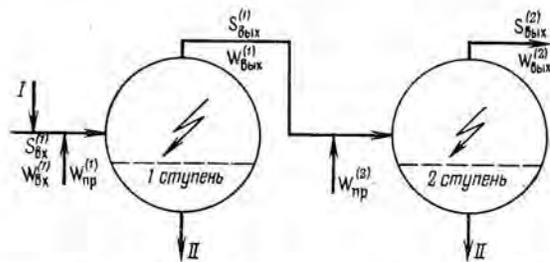


Рис. 3.1. Принципиальная схема двухступенчатого обессоливания нефтей:
I — дезсульфатор; II — дренажная вода.

оно в ряде случаев еще не полностью удовлетворяет требованиям потребителей.

В табл. 3.1 приведены результаты, которые были получены на обессоливающих установках ряда заводов страны. Как видно из таблицы, качество обессоливания на всех установках разное.

Представляет интерес выяснить причины неодинаковой эффективности работы установок — определить зависимость остаточного содержания солей в подготовленной нефти от содержания их в сырой нефти, от различных конструктивных факторов и технологических параметров процесса обессоливания. Это позволит наметить пути дальнейшего совершенствования установок обессоливания.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА ОБЕССОЛИВАНИЯ

Рассмотрим вначале одноступенчатую схему обессоливания, которая обеспечивает среднее остаточное содержание воды и солей в нефти

Таблица 3.1

Завод	Сырая нефть		Обессоленная нефть	
	соли, мг/л	вода, %	соли, мг/л	вода, %
Ново-Горьковский	1050	0,73	10—18	0,15—0,4
Рязанский	1300—1800	0,9—1,3	20—26	0,1—18
Орский	500	0,5	30	0,3
Волгоградский	800	0,7	10—20	сл.
Ухтинский	200	1,5—2	40	0,05
Саратовский	700	0,4	11—14	0,04
Уфимский им. XXII съезда КПСС	500—2000	0,5—1,5	18—30	0,1—0,3
Ново-Уфимский	100—800	0,1—1,3	5—15	0,08—0,15
Полоцкий	40—3600	0,2—2,0	4—35	0,02—0,2
Батумский	85—95	0,5—1,5	40—45	0,2—0,5
Киришский	500—1300	0,3—1,2	5—15	0,1—0,3
Сызранский	700—2500	0,2—2,0	32—40	0,1—0,2
Хабаровский	100—300	—	18—20	0,05—0,1
Омский	40—300	0,2—1,0	2—4	0,06—0,1
Красноводский	400—600	0,2—0,6	40—50	0,01—0,05

соответственно $W_{\text{вых}}^{(1)}$ и $S_{\text{вых}}^{(1)}$. Обозначая через C концентрацию солей в отдельных каплях водонефтяной эмульсии на выходе из аппарата, а через $p(C)$ плотность распределения этой концентрации, получим

$$S_{\text{вых}}^{(1)} = W_{\text{вых}}^{(1)} \int_0^{\infty} C p(C) dC = W_{\text{вых}}^{(1)} \bar{C} \quad (3.1)$$

Здесь \bar{C} — средняя концентрация солей. Верхние индексы показывают порядковый номер аппарата в технологической схеме.

Зависимость $S_{\text{вых}}^{(1)}$ от $W_{\text{вых}}^{(1)}$ хорошо видна из уравнения (3.1); поэтому исследуем зависимость $S_{\text{вых}}^{(1)}$ от распределения концентрации солей в отдельных каплях эмульсии. Средняя концентрация солей в остаточной воде зависит от качества смешения пластовой и промывочной воды. В процессе смешения за счет многократно повторяющихся актов коалесценции капель друг с другом и последующего их дробления концентрация солей в отдельных каплях эмульсии постепенно выравнивается. В предельном случае концентрация будет полностью выравнена, т. е. плотность распределения $p(C)$ станет дельта-функцией. Средняя концентрация солей \bar{C} в этом случае определяется равенством

$$\bar{C} = \frac{S_{\text{вх}} + S_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}} + W_{\text{пр}}^{(1)}} = \left(C_0 + \frac{C_{\text{пр}}^{(1)} W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}} \right)^{-1} \quad (3.2)$$

где $S_{\text{вх}}$ — содержание солей в сырой нефти; $S_{\text{пр}}^{(1)}$ — содержание солей в промывочной воде; $W_{\text{вх}}$ — содержание воды в сырой нефти; $W_{\text{пр}}^{(1)}$ — количество подаваемой промывочной воды; C_0 — средняя концентрация солей в пластовой воде; $C_{\text{пр}}^{(1)}$ — средняя концентрация солей в промывочной воде. В дальнейшем процесс смешения, приводящий к полному выравниванию концентрации солей в отдельных каплях эмульсии, будем называть полным смешением, а соответствующее ему значение содержания солей на выходе установки — потенциальной возможностью установки [72]. При полном смешении соотношение (3.1) можно записать в виде

$$S_{\text{вых}}^{(1)} = \left(C_0 + \frac{C_{\text{пр}}^{(1)} W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}} \right)^{-1} \cdot W_{\text{вых}}^{(1)} \quad (3.3)$$

Для случая, когда $S_{\text{вх}} \gg S_{\text{пр}}^{(1)}$, который обычно реализуется в практических условиях, соотношение (3.3) можно представить в виде

$$S_{\text{вых}}^{(1)} = C_0 W_{\text{вых}}^{(1)} \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}} \right) \quad (3.4)$$

Считая остаточные содержания солей и воды в нефти после I ступени параметрами сырья для II ступени, легко получить следующее

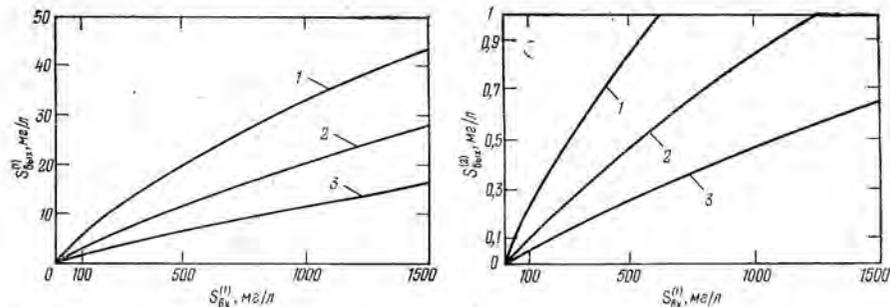


Рис. 3.2. Зависимость содержания солей в нефти на выходе I ступени от содержания солей в сырой нефти и расхода промывочной воды при $C_0=1000$ мг/л и $W_{\text{вых}}^{(1)} = 0,1\%$: 1— $W_{\text{пр}}^{(1)} = 2\%$; 2—4%; 3—8%.

Рис. 3.3. Зависимость содержания солей в нефти на выходе II ступени от содержания солей в сырой нефти и расхода промывочной воды при $C_0=1000$ мг/л; $W_{\text{вых}}^{(1)} = W_{\text{вых}}^{(2)} = 0,1\%$ $W_{\text{пр}}^{(1)} = W_{\text{пр}}^{(2)}$ и для кривых 1, 2, 3, равно соответственно 2, 3, 4%.

выражение для остаточного содержания солей в нефти после II ступени

$$S_{\text{вых}}^{(2)} = \left[\frac{C_0 + \frac{C_{\text{пр}}^{(1)} W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}}}{\left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}}\right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(2)}}\right)} + \frac{C_{\text{пр}}^{(2)}}{1 + \frac{W_{\text{вх}}^{(1)}}{W_{\text{пр}}^{(2)}}} \right] W_{\text{вых}}^{(2)} \quad (3.5)$$

Если содержанием солей в промывочной воде можно пренебречь, (3.5) можно записать в виде

$$S_{\text{вых}}^{(2)} = C_0 W_{\text{вых}}^{(2)} \left[\left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}}\right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(2)}}\right) \right]^{-1} \quad (3.6)$$

Из (3.4) и (3.6) видно, что предельное остаточное содержание солей в нефти прямо пропорционально средней концентрации солей в пластовой воде C_0 и остаточному количеству воды в нефти $W_{\text{вых}}^{(1)}$ (или $W_{\text{вых}}^{(2)}$). Средняя концентрация солей в пластовой воде нефтей СССР изменяется от нескольких сот миллиграмм на 1 л при однопроцентной обводненности (нефти Тюмени) до нескольких тысяч миллиграмм на 1 л (нефти Волго-Уральской области). Современные конструкции обессоливающих аппаратов при правильном введении процесса обеспечивают количество остаточной воды в нефти обычно не более 0,2%. Для наглядности на рис. 3.2 и 3.3 приведены зависимости предельных содержаний остаточных солей в нефти при одноступенчатом и двухступенчатом обессоливании, рассчитанные по соотношениям (3.4) и (3.6)

при $C_0=1000$ мг/л*, $W_{\text{вых}}^{(1)} = W_{\text{вых}}^{(2)} = 0,1\%$ и при различных значениях $W_{\text{пр}}^{(1)}$ и $W_{\text{пр}}^{(2)}$.

Сравнивая предельные значения остаточных солей в нефти, приводимых на графиках, с данными работы реальных обессоливающих установок (см. табл. 3.1), видим, что предельные величины во много раз меньше фактических остаточных солей, получаемых на установках. Поскольку при выводе предельных соотношений было использовано единственное предположение о полном смешении, получаем следующий вывод. Расхождение между теоретическими и фактическими данными объясняется только плохим качеством смешения пластовой и промывочной воды. Часть мелкодисперсной составляющей несмешавшейся соленой воды проходит через аппарат и обуславливает высокую среднюю концентрацию солей в остаточной воде.

Проанализируем чувствительность работы обессоливающих установок к качеству смешения. При неполном смешении плотность распределения концентрации солей в каплях остаточной воды в (3.1) будет некоторой неизвестной функцией. Наиболее интересным с практической точки зрения, пожалуй, является случай, когда распределение $p(C)$ является бимодальным и его максимумы ярко выражены и разнесены друг от друга. Это будет соответствовать модели, когда часть мелких капель соленой воды суммарным объемом Δ не смешивается с промывочной водой и будет обладать исходной концентрацией солей C_0 . Остальная вода полностью смешивается, концентрация солей в отдельных каплях выравнивается и может быть вычислена по формуле

$$C = C_0 \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}} - \Delta}\right)^{-1} \quad (3.7)$$

Такая модель для плотности распределения концентрации солей по отдельным каплям не должна сильно отличаться от встречающейся на практике, так как известно, что капли пластовой воды плохо коалесцируют с промывочной водой из-за бронирующих оболочек, образованных различными поверхностно-активными веществами, содержащимися в нефти.

Остаточное содержание солей в нефти при одноступенчатой схеме обессоливания для рассматриваемой модели неполного смешения можно записать в виде**

$$S_{\text{вых}}^{(1)} = C_0 \left[\frac{W_{\text{вых}}^{(1)}}{1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}} - \Delta}} + \Delta \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}} - \Delta}}\right) \right] \quad (3.8)$$

Если $W_{\text{вх}} \gg \Delta$, что для практики наиболее интересно, соотношение

* Здесь и в дальнейшем концентрация солей определяется для однопроцентной эмульсии.

** Это соотношение получено в предположении малой концентрации солей в промывочной воде.

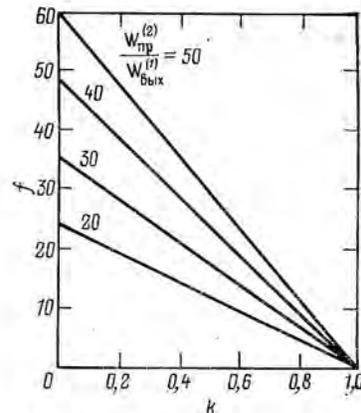
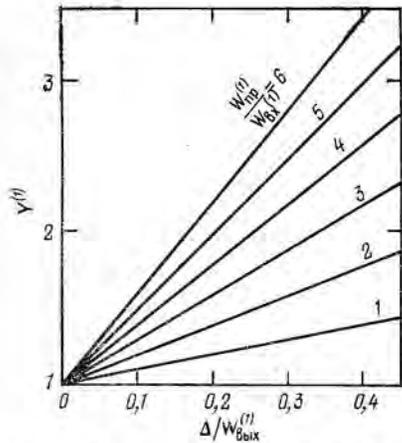


Рис. 3.4. Графики уравнения (3.12).

Рис. 3.5. Графики уравнения (3.13).

(4.7) можно переписать в виде

$$S_{\text{вых}}^{(1)} = C_0 W_{\text{вых}}^{(1)} \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)} \Delta}{W_{\text{вх}} W_{\text{вых}}^{(1)}} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}} \right)^{-1} \quad (3.9)$$

Рассмотрим теперь двухступенчатую схему обессоливания при неполном смешении перед ступенями. Пусть работа первого аппарата удовлетворяет соотношению (3.8), а при смешении перед II ступенью с промывочной водой идеально перемешивается вся эмульгированная вода со средней концентрацией солей, определяемой выражением (3.7), и часть несмешавшейся ранее воды объемом $k \cdot \Delta$. В этом случае остаточное содержание солей в нефти на выходе второго аппарата определится соотношением

$$S_{\text{вых}}^{(2)} = C_0 \left\{ \frac{1}{\left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}} - \Delta} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)} + k\Delta}{W_{\text{вых}}^{(1)} - \Delta} \right)} + \left[\frac{k}{\frac{W_{\text{вых}}^{(1)} - \Delta}{1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)} + k\Delta}{W_{\text{вых}}^{(1)} - \Delta}} \left(1 + \frac{k\Delta}{W_{\text{вых}}^{(2)}} \right) + \frac{1-k}{W_{\text{вых}}^{(2)}} \right] \cdot \Delta \right\} W_{\text{вых}}^{(2)} \quad (3.10)$$

Учитывая, что для реальных технологических схем всегда выполняется условие $W_{\text{вх}} \gg \Delta$ и $W_{\text{пр}}^{(2)} \gg \Delta$, соотношение (3.10) можно упростить

и привести к виду

$$S_{\text{вых}}^{(2)} = C_0 \left[\frac{W_{\text{вых}}^{(2)}}{\left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(1)}} \right)} + \Delta (1-k) \right] \quad (3.11)$$

Введем коэффициенты ухудшения эффективности работы обессоливающих установок за счет неполного смешения; определим их как отношение остаточных солей в нефти при неполном и полном смешении. Обозначая эти коэффициенты через $Y^{(1)}$ и $Y^{(2)}$ соответственно для одно- и двухступенчатой схем обессоливания, на основании (3.4), (3.9) и (3.6), (3.11) запишем их в виде

$$Y^{(1)} = 1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}} \cdot \frac{\Delta}{W_{\text{вых}}^{(1)}} \quad (3.12)$$

$$Y^{(2)} = 1 + \frac{\Delta}{W_{\text{вых}}^{(2)}} \left[(1-k) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}^{(1)}} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(1)}} \right) - 1 \right] \quad (3.13)$$

Для облегчения сравнения $Y^{(1)}$ и $Y^{(2)}$ уравнение (3.13) удобно записать через $Y^{(1)}$

$$Y^{(2)} = 1 + (Y^{(1)} - 1) \frac{W_{\text{вых}}^{(1)}}{W_{\text{вых}}^{(2)}} \cdot f \quad (3.14)$$

$$f = \frac{W_{\text{вх}}^{(1)}}{W_{\text{пр}}^{(1)}} \left[(1-k) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}^{(1)}} \right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(1)}} \right) - 1 \right]$$

Для иллюстрации возможных значений $Y^{(1)}$ и $Y^{(2)}$ в зависимости от величин определяющих их параметров, на рис. 3.4 и 3.5 представлена зависимость Y и f от $\Delta/W_{\text{вых}}^{(1)}$ и k . Из рисунков видно, что качество работы одноступенчатой установки вследствие плохого смешения может быть снижено в несколько раз, а качество работы двухступенчатой схемы — уже в десятки раз. Причина такого резкого увеличения по сравнению с $Y^{(1)}$ хорошо видна из соотношения (3.14)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО РАСХОДА ПРОМЫВОЧНОЙ ВОДЫ

Обессоливание нефтей на заводах является одним из самых «водоемких» процессов. В настоящее время на обессоливание может затрачиваться до 20% общезаводского расхода воды. Вследствие высокой стоимости очистки сточных вод, трудности их утилизации, а зачастую и недостатка пресной воды весьма актуальным является снижение расхода промывочной воды. Интерес к этому вопросу особенно возрос в последние годы в связи с проектированием новых заводов, работающих без сброса сточных вод [73—75]. Ниже (см. с. 52) определяются минимальные расходы промывочной воды при одноступен-

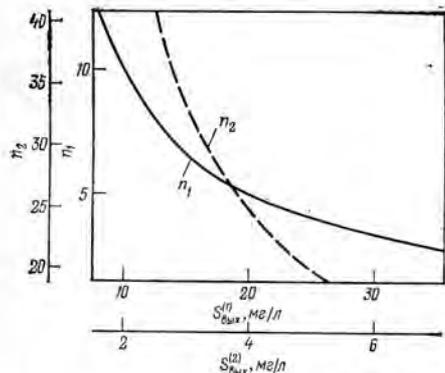


Рис. 3.6. Зависимость параметров n_1 и n_2 от требуемого качества обессоливания.

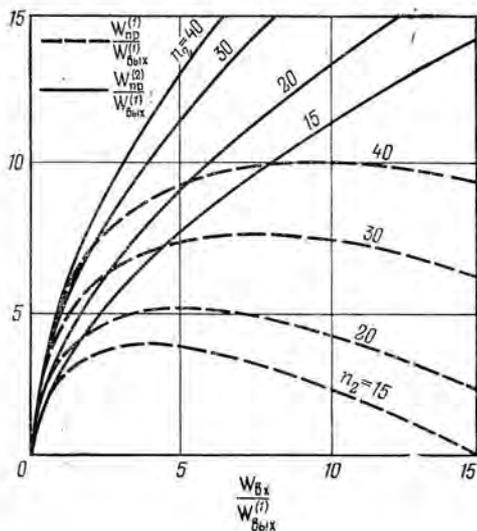
чатой схеме обессоливания и для раздельной и противоточной подачи промывочной воды в двухступенчатой схеме обессоливания.

Минимальный расход промывочной воды, необходимый для получения заданного остаточного содержания солей $S_{\text{вых}}^{(1)}$ в одноступенчатой схеме обессоливания, легко определить из (3.4).

$$W_{\text{пр}}^{(1)} = (n_1 - 1) W_{\text{вх}}, \quad \text{где } n_1 = \frac{C_0 W_{\text{вых}}^{(1)}}{S_{\text{вых}}^{(1)}} \quad (3.15)$$

Перед определением минимального расхода промывочной воды для двухступенчатой схемы обессоливания нужно выяснить условие стабилизации остаточного содержания солей в подготовленной нефти. Из (3.6) видно, что при $C_0 W_{\text{вых}}^{(2)} = \text{const}$ это условие можно сформулировать в виде равенства

$$\left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}}\right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вх}}}\right) = n_2 = \text{const}, \quad \text{где } n_2 = \frac{C_0 W_{\text{вых}}^{(2)}}{S_{\text{вых}}^{(2)}} \quad (3.16)$$



Рассмотрим случай, когда промывочная вода подается на I и на II ступень раздельно. Обозначая суммарную промывочную воду через $W_{\text{пр}}^{(1)}$, можно показать, что с учетом (3.16) задача определения минимального расхода промывочной воды эквивалентна задаче отыскания

Рис. 3.7. Зависимости минимального расхода промывочной воды по ступеням при раздельной ее подаче от параметров сырой нефти и требуемого качества ее обессоливания.

Рис. 3.8. Зависимости минимального расхода промывочной воды при противоточной ее подаче от параметров сырой нефти и требуемого качества обессоливания.

максимума следующего выражения

$$\max_{W_{\text{пр}}^{(1)}} \left[\left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}}\right) \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(1)} - W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}^{(1)}}\right) \right] \quad (3.17)$$

Максимальное значение (3.17) реализуется при

$$W_{\text{пр}}^{(1)} = 0,5 [W_{\text{пр}}^{(1)} + W_{\text{вх}}^{(1)} - W_{\text{вх}}] \quad (3.18)$$

Суммарный минимальный расход промывочной воды можно определить из (3.16). Подставляя (3.18) в (3.16) и определяя из этого соотношения $W_{\text{пр}}^{(1)}$, получим

$$\frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}^{(1)}} = 2 \sqrt{n_2 X} - X - 1, \quad X = \frac{W_{\text{вх}}}{W_{\text{вх}}^{(1)}} \quad (3.19)$$

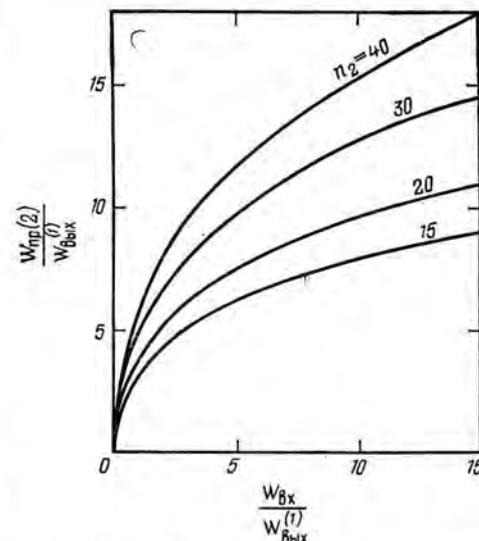
Подставляя (3.19) в (3.18), получим следующие соотношения для определения дозировки промывочной воды по ступеням

$$\frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}^{(1)}} = \sqrt{n_2 X} - X, \quad \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вх}}^{(1)}} = \sqrt{n_2 X} - 1 \quad (3.20)$$

Численные значения n_1 , n_2 , $W_{\text{пр}}^{(1)}/W_{\text{вх}}^{(1)}$ и $W_{\text{пр}}^{(2)}/W_{\text{вх}}^{(1)}$ в зависимости от требуемого качества обессоливания, параметров сырья и отстойных характеристик технологической аппаратуры приведены на рис. 3.6 и 3.7.

Прежде чем перейти к определению минимального количества промывочной воды при противоточной промывке, рассмотрим предельные соотношения, определяющие $S_{\text{вых}}^{(2)}$ в этой схеме. При такой подаче промывочной воды на I ступень количество содержащихся в ней солей будет равно

$$S_{\text{пр}}^{(1)} = \frac{S_{\text{вх}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}^{(1)} + W_{\text{пр}}^{(2)}} (W_{\text{пр}}^{(2)} - W_{\text{вх}}^{(2)}) \quad (3.21)$$



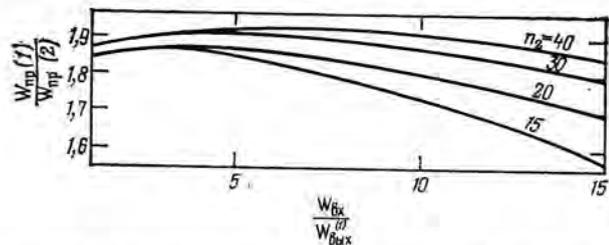


Рис. 3.9. Отношение суммарных расходов промывочной воды при раздельной и противоточной ее подаче по ступеням.

Подставляя (3.21) в (3.3) и находя отсюда $S_{\text{вых}}^{(1)}$, получим

$$S_{\text{вых}}^{(1)} = \frac{C_0 W_{\text{вых}}^{(1)}}{1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)} - W_{\text{вых}}^{(2)}}{W_{\text{вх}}} \cdot \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(1)} + W_{\text{пр}}^{(2)}} + \frac{W_{\text{вых}}^{(1)}}{W_{\text{вх}}}} \quad (3.22)$$

Рассматривая $S_{\text{вых}}^{(1)}$ и $W_{\text{вых}}^{(1)}$ как параметры сырья для II ступени, получим следующее соотношение для остаточного содержания солей в нефти после II ступени

$$S_{\text{вых}}^{(2)} = \frac{C_0 W_{\text{вых}}^{(2)}}{1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(1)}} + \frac{W_{\text{вых}}^{(1)} + W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вх}}} + \frac{W_{\text{пр}}^{(2)} - W_{\text{вых}}^{(2)}}{W_{\text{вх}}} \cdot \frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{пр}}^{(1)}}} \quad (3.23)$$

Из (3.23) можно определить минимальный расход промывочной воды, необходимой для обеспечения требуемого качества подготовки нефти по содержанию остаточных солей. Приравнивая знаменатель правой части соотношения (3.23) величине n_2 и определяя из этого равенства величину $W_{\text{пр}}^{(2)}$, получим

$$\frac{W_{\text{пр}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(1)}} = \frac{1}{2} [\sqrt{4[(n_2 - 1)X - 1] + (X + 1 - a)^2} - X + a - 1], \quad a = \frac{W_{\text{вых}}^{(2)}}{W_{\text{вых}}^{(1)}} \quad (3.24)$$

На рис. 3.8 показана зависимость $W_{\text{пр}}^{(2)}/W_{\text{вых}}^{(1)}$ от X при различных значениях n_2 и при $a=1$. Для сравнения общих расходов промывочной воды при раздельной ее подаче $W_{\text{пр}}^{(1)}$ и при противоточной подаче $W_{\text{пр}}^{(2)}$ составим следующее отношение

$$\frac{W_{\text{пр}}^{(1)}}{W_{\text{пр}}^{(2)}} = 2 \frac{\sqrt{4n_2 X} - X - 1}{\sqrt{4[(n_2 - 1)X - 1] + (X + 1 - a)^2} - X + a - 1} \quad (3.25)$$

Зависимость этого отношения от X при $a=1$ и различных значениях параметра n_2 показана на рис. 3.9.

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В 1969 г. было обследовано пятнадцать электрообессоливающих установок на семи заводах страны, перерабатывающих нефти Волго-Уральской области. Работу проводили с целью получения статистических оценок влияния на степень обессоливания технологических режимов процессов, качества поступающих нефтей, применения различных типов деэмульгаторов, конструктивных особенностей установок и др. Обследование проводили на основе данных, которые были взяты из режимных листов установок и вахтенных журналов. Для всех установок [76] получены зависимости остаточного содержания солей в нефти $S_{\text{вых}}$ от $S_{\text{вх}}$ при условии, что все технологические параметры поддерживались постоянными. Наиболее характерные из полученных зависимостей приведены на рис. 3.10 и 3.11. Данные с наименьшим содержанием солей в сырой нефти были получены на ЭЛОУ-5 Саратовского НПЗ и на ЭЛОУ-3 УНПЗ им. XXII съезда КПСС (см. рис. 3.11 и 3.12).

Из рисунков видно, что зависимости $S_{\text{вых}}$ от $S_{\text{вх}}$ на значительном интервале изменения $S_{\text{вх}}$ являются линейными. На ЭЛОУ-3 Уфимского НПЗ линейность этой зависимости удается проследить вплоть до $S_{\text{вх}}=60$ мг/л. Линейные участки зависимости $S_{\text{вых}}$ от $S_{\text{вх}}$ можно однозначно задать углом наклона прямой и величиной ординаты $S_{\text{вых}}$ на левом конце линейного участка, которую обозначим через γ , тангенс угла наклона прямой, численно равный отношению $S_{\text{вых}}/S_{\text{вх}}$,

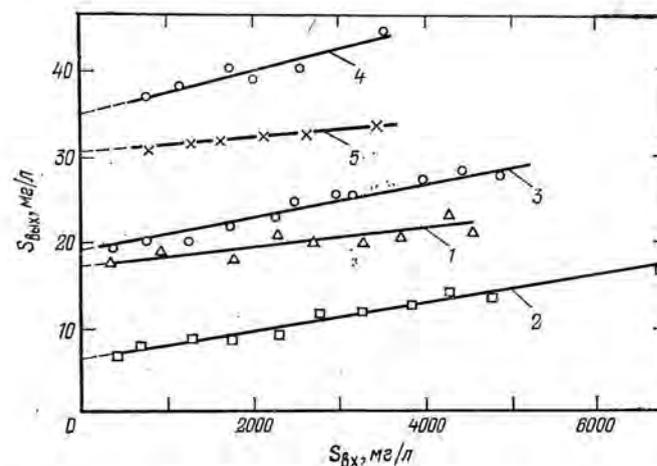


Рис. 3.10. Зависимости остаточного содержания солей в товарной нефти от содержания солей в сырой нефти на заводах: номера кривых соответствуют номерам в табл. 3.2.

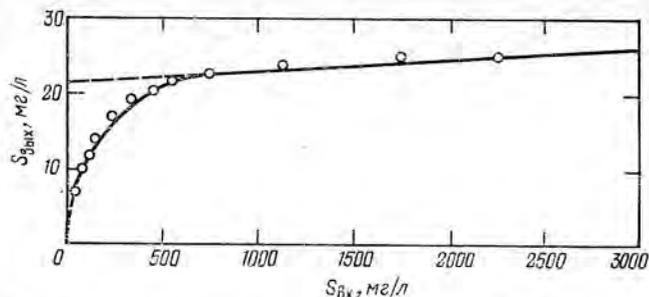


Рис. 3.11. Зависимость остаточного содержания солей в товарной нефти от содержания солей в сырой нефти для ЭЛОУ-5 Саратовского НПЗ.

можно рассматривать как коэффициент усиления установки по солям. Обратные величины коэффициентов усиления обследованных установок сведены в табл. 3.2. Там же указан тип деэмульгатора, на котором работала установка, и месторождение перерабатываемой нефти. Сравним полученные экспериментальные зависимости $S_{\text{вых}}$ от $S_{\text{вх}}$ с теоретическими, получаемыми из соотношения (3.11).

Величина Δ , как отмечалось раньше, определяется мелкодисперсной составляющей пластовой воды в сырой нефти, которая не смешивается с промывочной водой перед первой ступенью установки. При постоянном режиме перемешивания эта величина будет определяться количеством мелкодисперсной составляющей пластовой воды, поступающей на смесительное устройство, т. е. $\Delta = \Delta(W_{\text{вх}})$. Поскольку с ростом обводненности эмульсии доля мелкодисперсной составляющей в ней уменьшается за счет смещения динамического равновесия в системе в сторону более крупных частиц, в первом приближении можно воспользоваться для некоторого интервала изменений $W_{\text{вх}}$ линейной аппроксимацией зависимости $\Delta(W_{\text{вх}})$

$$\Delta = \Delta_0 + bW_{\text{вх}} \quad (3.26)$$

Величину Δ_0 можно рассматривать как некоторую постоянную составляющую несмешавшейся части пластовой воды, не зависящую от $W_{\text{вх}}$, а величина b является безразмерным коэффициентом пропорциональности.

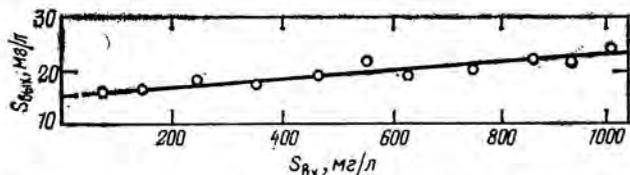


Рис. 3.12. Зависимость остаточного содержания солей в товарной нефти от содержания солей в сырой нефти для ЭЛОУ-3 Уфимского НПЗ им. XXII съезда КПСС.

Подставляя (3.26) в (3.11) и пренебрегая вторым слагаемым в квадратных скобках правой части (3.11), получим

$$S_{\text{вых}}^{(2)} = \left[\frac{W_{\text{вых}}^{(1)} W_{\text{вых}}^{(2)}}{(W_{\text{вх}} + W_{\text{пр}}^{(1)}) W_{\text{пр}}^{(2)}} + b(1-k) \right] S_{\text{вх}} + C_0 \Delta_0 (1-k) \quad (3.27)$$

Эта зависимость содержания остаточных солей в подготовленной нефти от содержания солей в сырой нефти является линейной, что совпадает с экспериментальными зависимостями, приведенными ранее. Коэффициент усиления по солям и параметр γ , характеризующие эффективность обессоливания на линейном участке, введенные ранее, как видно из (3.27), определяются соотношениями

$$S_{\text{вых}} = S_{\text{вх}} \left[\frac{W_{\text{вых}}^{(1)} W_{\text{вых}}^{(2)}}{(W_{\text{вх}} + W_{\text{пр}}^{(1)}) W_{\text{пр}}^{(2)}} + b(1-k) \right], \quad \gamma = C_0 (1-k) \Delta_0 \quad (3.28)$$

Отсюда видно, что величина γ (которая и определяет остаточное содержание солей в подготовленной нефти, так как $S_{\text{вых}}/S_{\text{вх}} \ll 1$) прямо пропорциональна концентрации солей в пластовой воде и произведению коэффициентов, характеризующих качество смешения перед первой и второй ступенями.

Для еще одного сравнения теоретических и экспериментальных результатов рассмотрим данные экспериментальной проварки, проведенной при смешении пластовой и промывочной воды в транспортном

Таблица 3.2

Завод	Номер графика на рис. 3.10	Номер установки, кИ	$\frac{S_{\text{вх}}}{S_{\text{вых}}}$	γ	Деэмульгатор	Нефть
Ново-Уфимский	1	1	900	17	НЧК	Смесь Туймазинская Арланская
		2	400	11		
		3	400	15		
Ново-Горьковский	2	1	600	6	Диссолван Сепарол	Ромашкинская
		2	300	6		
Ярославский	1	1	300	13	Прогалит	Туймазинская
Ново-Куйбышевский НПЗ	3	1	700	12	ОЖК	Смесь Туймазинская Туймазинская
		2	700	13		
		3	500	18		
Салаватский	4	1	I ст. 360	35	НЧК НПЗ	Арланская Арланская
		5	II ст. 1000	30		
УНПЗ им. XXII съезда КПСС	—	2	130	15	Диссолван	Туймазинская
Саратовский	—	3	1000	21	»	Смесь

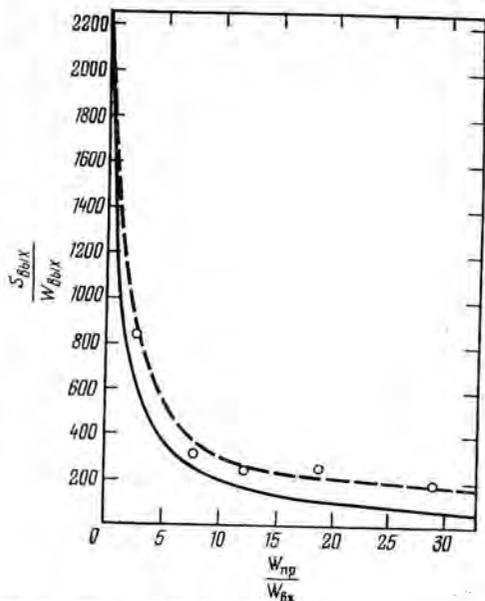


Рис. 3.13. Теоретическая и экспериментальная зависимость средней концентрации солей в диспергированной воде от отношения $W_{пр}/W_{вх}$.

трубопроводе [77]. Эксперимент проводили следующим образом. В Чишминском товарном парке (Татарская АССР) перед сырьевыми насосами, перекачивающими нефть по трубопроводу Чишма — Азнакаево, в транспортный поток предварительно подогретой нефти добавляли деэмульгатор и пресную воду. Трубопровод Чишма — Азнакаево имеет протяженность около 40 км. На Азна-

каевских головных сооружениях нефть поступала в резервуары емкостью 10 000 м³, в которых отстаивалась 8—12 ч, после чего замыряли остаточную воду и остаточные соли и резервуар ставился на откачку товарной нефти. За время проведения эксперимента основные технологические показатели процесса изменялись в следующих пределах:

Средняя производительность заполнения резервуаров, м/ч	400—600
Температура подгрева нефти на входе в трубопровод, °С	20—26
Подача пресной промывочной воды, %	2—5
Количество пластовой воды и нефти на входе в трубу, %	0,1—2
Подача деэмульгатора (дозировка), г/т нефти	25

Описанная схема моделирует одноступенчатое обессоливание: смешение происходит в путевом нефтепроводе, а вода отделяется в резервуаре. Поэтому предельное остаточное содержание солей в нефти при такой схеме обессоливания определяется соотношением (3.3). О полноте смешения пластовой и промывочной воды за время движения по трубопроводу можно судить по коэффициенту $Y^{(1)}$ [см. (3.12)]. Представление о качестве смешения можно получить, сравнивая средние концентрации солей в остаточной воде, полученные экспериментально и рассчитанные для случая полного перемешивания по соотношению

$$\frac{S_{вых}^{(1)}}{W_{вых}^{(1)}} = \frac{C_0}{1 + \frac{W_{пр}^{(1)}}{W_{вх}}} \quad (3.29)$$

На рис. 3.13 сплошная кривая рассчитана по (3.29) при $C_0 = 2340$ мг/л и обводненности 1,0%, что соответствует концентрации солей в пластовой воде для данного случая. На этом же рисунке нанесены экспериментальные точки, аппроксимированные пунктирной линией. Близкое расположение практической и теоретической кривых на рисунке свидетельствует о хорошем качестве смешения. Определим по экспериментальным данным средний коэффициент ухудшения качества работы обессоливающей установки $Y^{(1)}$, обусловленного неполным смешением (см. с. 51), который можно записать в виде

$$Y^{(1)} = \frac{S_{вых}^{(1)} (W_{пр}^{(1)} + W_{вх})}{S_{вх} W_{вых}^{(1)}} \quad (3.30)$$

Средние за время эксперимента значения величин, входящих в это соотношение, были следующие: $S_{вых}^{(1)} = 50$ мг/л; $W_{пр}^{(1)} = 4\%$; $W_{вых}^{(1)} = 0,15$; $W_{вх} = 0,5\%$; $S_{вх} = 1170$ мг/л. Этим значениям соответствует величина $Y^{(1)} = 1,3$, т. е. в этом случае качество обессоливания ухудшится за счет неполного смешения примерно на 30%. Поскольку величина несмешавшейся пластовой воды связана с $Y^{(1)}$ соотношением (см. 3.12)

$$\Delta = (Y^{(1)} - 1) \frac{W_{вх} W_{вых}^{(1)}}{W_{пр}^{(1)}} \quad (3.31)$$

для рассматриваемого случая получаем $\Delta = 0,005\%$, что составляет 1% от исходной пластовой воды. В 1 л нефти с такой обводненностью содержится 11,7 мг солей.

РАЗРУШЕНИЕ ЭМУЛЬСИЙ ПРИ ПОМОЩИ ДЕЭМУЛЬГАТОРОВ

ПРИРОДА ДЕЭМУЛЬГАТОРОВ

Деэмульгаторы, так же, как и эмульгаторы, рассмотренные в гл. 1, относятся к классу поверхностно-активных веществ (ПАВ). Четких границ у этого класса веществ нет. Термин ПАВ обычно применяют к веществам, молекулы которых содержат группы, одни из которых обладают гидрофобными, а другие — гидрофильными свойствами.

Часто весь класс ПАВ делят по молекулярной массе на низкомолекулярные и высокомолекулярные.

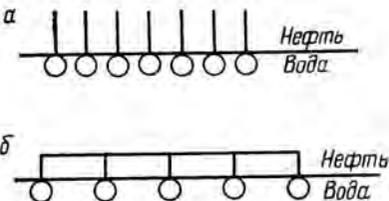
К низкомолекулярным ПАВ обычно относят соединения, молекулы которых можно как бы разделить на гидрофобную и гидрофильную части. Вещества с такими дифильными молекулами обладают большой адсорбционной способностью, и с их помощью могут быть получены достаточно устойчивые эмульсии. В зависимости от применения среди низкомолекулярных ПАВ выделяют моющие вещества, пенообразователи, эмульгаторы и др. По составу и характеру действия ПАВ делят на анионоактивные, катионоактивные и неионогенные.

Еще более сильными поверхностно-активными свойствами обладают высокомолекулярные ПАВ. К ним относят вещества, содержащие в молекуле более одной гидрофильной или одной гидрофобной группы, которые равномерно распределены по всей молекуле. Примерами таких ПАВ могут служить поливиниловые спирты, казеин, желатин, полиакриламид и др.

Низкомолекулярные и высокомолекулярные ПАВ по-разному заполняют межфазную поверхность, на которой они адсорбируются. Низкомолекулярные ПАВ на границе вода — органическая жидкость располагаются в виде частого кола (рис. 4.1, а) из вертикально поставленных молекул — гидрофильная «голова», обозначенная кружочком, находится в воде, а гидрофобный «хвост» — в органической жидкости. Для высокомолекулярных ПАВ нельзя предложить такую же простую геометрическую модель их расположения на межфазной границе, так как оно существенно зависит от концентрации ПАВ в адсорбционном слое. При малой концентрации ПАВ молекулы расположены горизонтально (рис. 4.1, б). При повышении концентрации ПАВ ориентация молекул, так же, как и у низкомолекулярных ПАВ, стремится к вертикальной [3, 78].

Деэмульгаторы водонефтяных эмульсий относятся к классу ПАВ, обладающих моющими свойствами. Еще на ранней стадии развития

Рис. 4.1. Схема расположения ПАВ на межфазной границе раздела:
а) низкомолекулярное ПАВ; б) — высокомолекулярное ПАВ.



деэмульгаторов было замечено, что вещества, стабилизирующие эмульсии типа «масло в воде», способны разрушать обратные эмульсии, т. е. являются деэмульгаторами эмульсий типа «вода в масле». Эта закономерность, объясняемая различными уровнями снижения свободной поверхности энергии в эмульсиях разных типов, служила руководством для создания и подбора деэмульгаторов на первых этапах развития техники обезвоживания и обессоливания нефтей. Дальнейшее развитие теории и практики деэмульгирования показало, что законы действия деэмульгаторов гораздо сложнее, чем представлялись вначале, и их нельзя объяснить только уменьшением свободной энергии на межфазной поверхности [3].

В принципе любое органическое вещество, обладающее моющими свойствами, может с той или иной эффективностью использоваться в качестве деэмульгатора. Однако постоянное совершенствование и интенсификация техники и технологии процессов обезвоживания и обессоливания нефтей требовало разработки теории и практики синтеза и подбора к конкретным условиям применения веществ, обладающих максимально возможной эффективностью деэмульгирования.

Первыми промышленными деэмульгаторами были смеси жирных кислот с неорганическими солями. Их сменили смеси нефтяных сульфокислот и их аммониевых солей. Позднее в деэмульгирующие смеси стали добавлять другие вещества: касторовое масло, глицерин, высокомолекулярные жирные кислоты и т. п. Такие добавки позволили создать вещества, обладающие гораздо большей эффективностью деэмульгирования, чем используемые ранее в практике анионоактивные сульфонаты и масла. Эти новые неионогенные деэмульгаторы не взаимодействовали с растворенными в эмульгированной воде солями металлов, что являлось одним из факторов повышения эффективности их использования. При половинной дозировке, по сравнению с анионоактивными деэмульгаторами, новые реагенты легко разрушали эмульсии, считавшиеся трудными для прежних деэмульгаторов.

Еще более эффективные неионогенные деэмульгаторы удалось синтезировать на основе продуктов реакции окиси этилена со спиртами, жирными кислотами и алкилфенолами. Дальнейшие исследования показали, что если окись этилена заменить окисью пропилена, то можно существенно повысить нефтерастворимость деэмульгатора, не нарушая его гидрофильных свойств. Было также обнаружено, что сочетание окисей этилена и пропилена позволяет получить продукт, который по деэмульгирующим свойствам значительно превосходит оксипропилированные и оксипропилированные многоатомные спирты.

Большая часть деэмульгаторов, вырабатываемых в настоящее время, представляет собой высокомолекулярные соединения, образованные из полимерных цепей оксидов этилена и пропилена, алкилфенолов, аминоксидов и каучукоподобных материалов, которые содержат гидроксильные акцепторные группы. Каждый из этих полимеров синтезируют так, чтобы в него входили группы, обладающие гидрофильными свойствами.

Из изложенного следует, что для снижения расхода деэмульгатора он должен слабо растворяться в сплошной и в дисперсной фазе и обладать высокими поверхностно-активными свойствами. В зависимости от того, в какой фазе его растворимость выше, различают водорастворимые и нефтерастворимые деэмульгаторы. Однако такое разделение достаточно условно и истинной растворимости деэмульгатора не отражает.

При подборе наиболее эффективного деэмульгатора для конкретной эмульсии можно найти корреляционную связь между растворимостью деэмульгатора в водной фазе и некоторыми свойствами эмульсии. Наиболее важным из них, по-видимому, является содержание неорганических солей в диспергированной воде. Второе свойство — способность нефти растворять и диспергировать деэмульгирующее вещество. Подобная зависимость обусловлена наличием в воде растворенных неорганических солей, которые препятствуют растворению в ней деэмульгатора. Поэтому если эмульгированная вода слабо минерализована, то применяемый деэмульгатор может обладать слабой растворимостью в воде, и, наоборот, если эмульгированная вода содержит значительное количество солей, то требуются деэмульгаторы, обладающие большой растворимостью в ней.

Существует бесконечное количество разновидностей эмульсий с различными растворяющими свойствами нефти и с различной минерализацией воды и соответствующих этим эмульсиям оптимально работающих деэмульгаторов. Отсюда следует, что невозможно создать один универсальный деэмульгатор, обладающий одинаковой эффективностью при работе с любыми эмульсиями.

Новые деэмульгирующие материалы являются не чистыми веществами, а смесью полимеров разной молекулярной массы с различными гидрофобными свойствами. Поэтому они обладают гораздо более широким диапазоном растворимости, чем каждый из исходных компонентов. Однако применение одного деэмульгатора даже с широким диапазоном растворимости приводит к резкому колебанию его расхода на различных нефтях. Другими словами, эффективность работы деэмульгатора существенно зависит от свойств обрабатываемой эмульсии.

Уменьшение расхода деэмульгатора достигается подбором оптимальной (для данной нефти) смеси из нескольких базовых деэмульгирующих материалов, которая обеспечивает необходимую растворимость в органической и водной фазах.

Известно, что при смешении двух ПАВ, одно из которых обладает слабым, а другое сильным гидрофильным свойством, получается продукт, превосходящий по гидрофильности среднее значение у исходных

компонентов. Поэтому на основе двух веществ, смешиваемых в различных соотношениях, можно получить деэмульгаторы для разрушения эмульсий с широким диапазоном минерализации эмульгированной воды. Обычно эти два базовых деэмульгатора, сильно различающиеся по растворимости, образуют смесь, которая вскоре расслаивается. Для придания ей стойкости в нее добавляют одно или несколько веществ, обладающих промежуточными растворимостями. Такими «связывающими» компонентами являются неионогенные вещества со средней растворимостью или сульфаты. Промышленный деэмульгатор обычно состоит из нескольких базовых компонентов, смешиваемых с растворителем для обеспечения жидкого состояния.

Существует большое число высокоэффективных деэмульгаторов, разрушающих водонефтяные эмульсии при расходах от 3—5 до 20—30 г/т, в зависимости от конкретных условий применения. Для снижения расхода деэмульгатора и для повышения эффективности его работы по каким-либо интегральным параметрам, таким, как остаточная вода, остаточные соли, скорость работы и др., требуется индивидуальный подбор деэмульгаторов для каждого типа нефтей и конкретных условий его применения.

На эффективность применения деэмульгатора для разрушения эмульсии нефти влияют:

- температура ведения процесса;
- интенсивность и длительность перемешивания эмульсии;
- время до разделения эмульсии;
- длительность действия и напряженность электрического поля (если оно есть в процессе);
- длительность и интенсивность перемешивания с промывочной водой в процессе обессоливания нефти.

Основные показатели эффективности применения деэмульгатора при его подборе следующие:

- динамика и полнота отделения воды в процессе обезвоживания;
- содержание нефти в отделившейся воде;
- динамика и полнота процесса смешения пластовой и промывочной воды в процессе обессоливания.

Большая часть этих показателей является взаимозависимыми, но не взаимозаменяемыми. Это существенно затрудняет создание методики для выявления эффективного деэмульгатора и эффективного технологического режима его применения. Для облегчения решения этой задачи проведем качественный и количественный анализ основных процессов, определяющих процесс разрушения эмульсий при помощи деэмульгатора.

МЕХАНИЗМ ТРАНСПОРТА ДЕЭМУЛЬГАТОРА

Под дестабилизацией водонефтяной эмульсии будем понимать разрушение защитных оболочек на каплях пластовой воды. В этом процессе можно различить по крайней мере две стадии: а) доставка деэмульгатора на каплю, или транспортная стадия процесса; б) разру-

шение бронирующей оболочки, образованной эмульгатором, или кинетическая стадия процесса. Механизм транспортной стадии для «нефтерастворимых» деэмульгаторов не вызывает сомнения. Он диффузионный. Чтобы судить о механизме транспортной стадии для «водорастворимых» деэмульгаторов, следует более подробно рассмотреть сущность этих названий. Как известно [78—80], действие деэмульгаторов основано на большой адсорбционной активности. Поэтому, если деэмульгатор будет растворяться в нефти или в воде, то это должно снизить его эффективность. Хорошо известно также [78], что «водорастворимые» деэмульгаторы чаще всего не полностью растворяются в воде, а образуют взвесь. Даже в том случае, когда из водорастворимого деэмульгатора при комнатной температуре можно приготовить прозрачный водный раствор, он обычно мутнеет при повышении температуры, т. е. деэмульгатор становится нерастворимым. Поэтому для деэмульгатора понятия «водорастворимый» и «нефтерастворимый» достаточно условны. Все деэмульгаторы (включая и водорастворимые) рекомендуется вводить, по возможности, в чистом виде, или в виде высококонцентрированного раствора в каком-либо органическом растворителе. Довольно часто растворителем служит метанол.

При введении водорастворимого деэмульгатора в чистом виде механизм доставки его на капли пластовой воды будет, очевидно, диффузионным. При использовании водного раствора деэмульгатора транспортной стадии будет предшествовать еще стадия перехода деэмульгатора из капель воды, в которых он растворен, в нефть. Осуществление транспортной стадии непосредственно за счет столкновения капель пластовой воды и капель, содержащих деэмульгатор, маловероятно, так как такие капли не могут слиться до тех пор, пока на них не будут разрушены бронирующие оболочки, а на это требуется время. Предположение о преобладающем «точечном» или «локальном» механизме передачи деэмульгатора при сближении капель через наиболее тонкое место разделяющей их нефтяной пленки также маловероятно. Процесс выхода деэмульгатора из капель воды в нефть мы рассматривать не станем, а будем предполагать, что этот процесс завершился, и деэмульгатор уже равномерно распределен по объему нефти. Исходную эмульсию будем считать слабоконцентрированной для того, чтобы не учитывать взаимное влияние капель в процессе адсорбции деэмульгатора.

Некоторые авторы [80, 81] при наблюдении разрушения бронирующей оболочки на межфазной поверхности при помощи деэмульгатора, заметили растрескивание этой оболочки и последующее увеличение и расширение трещин. Однако этот эффект во всех экспериментах наблюдался на больших по площади межфазных поверхностях (большие капли или плоские поверхности раздела), и вряд ли правомерен его автоматический перенос на случай разрушения бронирующих оболочек на капельках эмульсии с радиусами порядка 1 мк. Поэтому для получения оценки верхней границы длительности ослабления эмульсии рассмотрим модель с равномерным (диффузным) процессом вытеснения эмульгатора деэмульгатором по всей поверхности. Предельный слой деэмульгатора на межфазной поверхности будем считать

мономолекулярным. Вследствие большой поверхностной активности деэмульгатора процесс его десорбции можно не учитывать.

При этих предположениях изменение во времени количества молекул деэмульгатора на поверхности отдельной капли можно записать в виде

$$\frac{dn}{dt} = J \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (4.1)$$

где J — поток молекул деэмульгатора на всю поверхность капли; n_0 — число молекул деэмульгатора, которое можно разместить в монослое на поверхности капли.

Второй множитель в правой части (4.1) определяет долю поверхности капли, еще не занятой деэмульгатором.

В общем случае поток J может зависеть от времени. Решая уравнение (4.1) с учетом этой зависимости при начальном условии $n=0$ при $t=0$, получим

$$n(t) = n_0 \left[1 - \exp \left(- \frac{1}{n_0} \int_0^t J(\tau) d\tau \right) \right] \quad (4.2)$$

Как уже отмечалось, поток J обусловлен диффузионным транспортным механизмом. Обычно рассматривают несколько типов диффузии [82, 83]: конвективная диффузия, молекулярная (или броуновская) диффузия, «наведенная» турбулентная диффузия.

Прежде чем перейти к нахождению потока J , сформулируем основные вопросы, на которые надо получить ответ при построении кинетической модели разрушения бронирующих оболочек.

Наибольший интерес для практики представляют закономерности поведения мелкодисперсной составляющей водонефтяной эмульсии. При этом понятие «мелкодисперсная составляющая эмульсии» относится к частицам максимальных размеров, порядка 10 мкм. Если учесть, что минимальные размеры частиц в водонефтяной эмульсии [84, 85] могут составлять доли микрона, то очевидно, что абсолютные размеры частиц в мелкодисперсной составляющей могут различаться в десятки и даже сотни раз. Поэтому при рассмотрении закономерностей разрушения бронирующих оболочек на каплях дисперсной фазы необходимо выяснить их зависимости от размеров капель, а также от температуры, вязкости, гидродинамики потока, концентрации деэмульгатора и др.

КОНВЕКТИВНАЯ ДИФфуЗИЯ ДЕЭМУЛЬГАТОРА

Как известно [82], общее уравнение конвективной диффузии можно записать в виде

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (v \nabla) C = \nabla (D \nabla C) \quad (4.3)$$

где C — концентрация вещества; v — скорость движения жидкости; D — коэффициент диффузии вещества; ∇ — оператор набла.

Мы рассмотрим только стационарные решения этого уравнения и будем считать коэффициент диффузии постоянным. В качестве граничных условий выберем следующие:

$$C = C_0 \text{ — на большом расстоянии от поверхности частицы}$$

$$D \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right) = kC \text{ — на поверхности частицы} \quad (4.4)$$

Здесь r — нормаль к поверхности частицы; k — константа скорости реакции на поверхности.

Второе условие означает, что молекулы ПАВ, которые подходят к частице, не могут сразу адсорбироваться на ее поверхности, так как они для этого должны преодолеть бронирующую пленку из эмульгирующих веществ. Это проникновение деэмульгатора через слой эмульгатора можно рассматривать как реакцию первого порядка, происходящую со скоростью k на поверхности капли. В работе [82] было показано, что когда число Re для частицы значительно меньше единицы, то при некоторых общих предположениях стационарное решение уравнения конвективной диффузии на равномерно движущуюся сферическую частицу можно записать в виде

$$C(z) = C_1 \int_0^z \exp\left(-\frac{4}{9}x^3\right) dx + C_2 \quad (4.5)$$

$$z = \left(\frac{3v}{4DR^2}\right)^{1/3} \cdot \frac{y \sin \theta}{(\theta - 0,5 \sin 2\theta)^{1/3}}$$

где y — расстояние по нормали до поверхности частицы; v — скорость движения частицы; θ — полярный угол в сферических координатах.

Определяя постоянные интегрирования C_1 и C_2 из граничных условий (4.4), получим, что концентрация диффундирующего вещества в окрестности капли удовлетворяет следующему соотношению

$$C(z) = \frac{C_0}{1 - 1,15 \frac{k}{\varphi}} \left[\frac{k}{\varphi} \int_0^z \exp\left(-\frac{4}{9}x^3\right) dx + 1 \right] \quad (4.6)$$

где

$$\varphi = \left(\frac{3vD^2}{4R^2}\right)^{1/3} \frac{\sin \theta}{(\theta - 0,5 \sin 2\theta)^{1/3}}$$

Диффузионный поток на единицу поверхности частицы будет равен

$$i_k = C_0 \frac{\varphi}{1,15 + \varphi/k} \quad (4.7)$$

а общий поток на всю частицу

$$J_k = 2\pi R^2 \int_0^\pi i_k \sin \theta d\theta = 2\pi C_0 R \frac{L}{\beta} \quad (4.8)$$

где

$$L = \int_0^\pi \frac{\sin^2 \theta d\theta}{\frac{\sin \theta}{k\beta} + (\theta - 0,5 \sin 2\theta)^{1/3}}, \quad \beta = 1,265 \frac{R}{D} (Pe)^{-1/3}$$

Зависимость величины L от параметров k и β является монотонно возрастающей функцией произведения этих параметров, выходящей на асимптоту $L=1,6$ при $k\beta \rightarrow \infty$. При $k\beta \rightarrow 0$ величина L стремится к нулю как линейная функция $y=2k\beta$; При больших значениях параметра $k\beta$, полагая $L=1,6$, полный поток на частицу можно записать в виде

$$J_k = 7,98 C_0 D R (Re)^{1/3} \quad (4.9)$$

Соотношение (4.9) можно рассматривать как предельный случай для потока на частицу, когда весь процесс переноса деэмульгатора определяется только транспортной стадией. В этом случае поток вещества деэмульгатора на частицу максимальный и скорость разрушения бронирующих оболочек при любой наперед заданной турбулизации потока также должна быть максимальной.

Коэффициент молекулярной диффузии деэмульгатора в нефти, входящий в выражения для потоков деэмульгатора на частицу, зависит от индивидуальных свойств деэмульгатора и от нефти, в которой происходит диффузия. В настоящее время мы не располагаем сведениями о величинах коэффициентов диффузии различных деэмульгаторов в нефти. Однако их можно оценить на основании известных измерений коэффициентов диффузии деэмульгаторов в воде. Так, если D_H и D_B соответственно коэффициенты диффузии деэмульгатора в нефти и воде при абсолютных температурах T_H и T_B и динамических вязкостях μ_H и μ_B , то будет справедливо следующее равенство [83]

$$D_H = D_B \frac{T_H \mu_B}{T_B \mu_H} \quad (4.10)$$

Для неионогенных деэмульгаторов ОЖК, ОП10, диссольван 4411 и диссольван 4422 величины D_B измеряемые при $T_B=293$ К, достаточно близки между собой и находятся в интервале $(3-6) \cdot 10^{-7}$ см²/с [84].

Ранее отмечалось, что современные деэмульгаторы являются смесями компонентов с различными молекулярными массами и молекулярной структурой. Каждый из этих компонентов, очевидно, обладает собственным коэффициентом диффузии. Поэтому понятие коэффициента диффузии, которым мы пользуемся в нашей модели, следует рассматривать только как некоторое среднее значение коэффициентов диффузии отдельных компонентов.

В соотношении для потока вещества на отдельную каплю входит константа скорости реакции k , характеризующая скорость адсорбции деэмульгатора. Она должна определяться константами конкурирующей адсорбции деэмульгатора и эмульгатора, а также первоначальными механическими свойствами бронирующих оболочек на межфазной поверхности. Поскольку константы адсорбции и механические

свойства бронирующих оболочек являются функциями температуры, параметр k также будет являться функцией температуры. В нашем распоряжении нет данных, которые позволили бы провести количественный анализ температурной зависимости параметра k , однако зависимость L от $k\beta$ позволяет оценить область значений k , в которой процесс диффузии деэмульгатора идет на транспортной стадии. Из (4.8) можно показать, что с 10%-ной точностью эта область значений L определяется неравенством $k\beta \geq 6$, которое можно переписать в виде

$$\lambda \geq \frac{D_0 (\text{Pe})^{1/3}}{R} \quad (4.11)$$

где Pe — число Пекле.

Определение относительной скорости движения капель, которая необходима для вычисления величины потока деэмульгатора на основе полученных соотношений, рассмотрено в Приложении, раздел 3.

НАВЕДЕННАЯ ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФFUЗИЯ ДЕЭМУЛЬГАТОРА

Наведенная турбулентная диффузия [82] в некоторых случаях может во много раз превышать конвективную диффузию. Ее можно учесть в расчетах, если вместо коэффициента молекулярной диффузии воспользоваться полным коэффициентом диффузии, который вследствие независимости коэффициентов турбулентной и молекулярной диффузии можно определить как сумму этих коэффициентов, т. е.

$$D = D_0 + D_T \quad (4.12)$$

где D_0 — коэффициент молекулярной диффузии; D_T — коэффициент наведенной турбулентной диффузии.

Проведем расчет стационарного потока деэмульгатора на отдельную каплю для случая, когда начальные условия определены в виде (4.4). Решая стационарное уравнение диффузии в сферических координатах, получим следующее соотношение для вычисления полного потока на каплю

$$J_T = \frac{4\pi R D_0 C}{\frac{D_0}{Rk} + \int_1^\infty \frac{dx}{x^2 \left(1 + \frac{D_T}{D_0}\right)}}, \quad x = \frac{Y}{R} \quad (4.13)$$

Определяя коэффициент наведенной турбулентной диффузии так, как это сделано в работе [82], запишем его в виде

$$D_T = \gamma \left(\frac{\varepsilon_0}{v}\right) \lambda^2 \quad \text{при } \lambda < \lambda_0 \quad (4.14)$$

где γ — масштабный коэффициент; λ_0 — внутренний масштаб турбулентности; λ — характерное расстояние. отождествляя λ с расстоянием от поверхности частицы, на которую направлена диффузия, т. е.

полагая $\lambda = y - R$, из (4.12) и (4.14) получим

$$\frac{D_T}{D_0} = \frac{\gamma}{D_0} \left(\frac{\varepsilon_0}{v}\right)^{1/2} (x-1)^2 R^2 \quad (4.15)$$

Подставляя (4.15) в (4.13) и вычисляя интеграл в знаменателе (4.13), запишем выражение для потока J_T в виде

$$J_T = \frac{4\pi R D_0 C_0}{\frac{D_0}{kR} + \frac{\pi}{2\sqrt{z+1}}} \kappa \quad (4.16)$$

где

$$z = \gamma \frac{R^2}{D} \left(\frac{\varepsilon_0}{v}\right)^{1/2}, \quad \kappa = \frac{1}{\sqrt{z-1}} \left(\frac{\sqrt{z}(z-1)}{z+1} - \frac{2z}{\pi(z+1)} \ln z + \frac{2}{\pi}\right)$$

При $z \rightarrow 0$ и при $z \rightarrow \infty$ величина κ монотонно стремится соответственно к $2/\pi$ и к единице. При $z \gg 1$ соотношение (4.16) можно записать в виде

$$J_T = \frac{4\pi R D_0 C}{\frac{D_0}{kR} + \kappa \frac{\pi}{2R} \left(\frac{D}{\gamma}\right)^{1/2} \left(\frac{v}{\varepsilon_0}\right)^{1/4}} \quad (4.17)$$

Для случая $z \leq 1$, раскладывая $(z+1)^{1/2}$ в ряд по z и ограничиваясь двумя первыми членами, получим

$$J_T = \frac{4\pi R D_0 C_0}{\frac{D_0}{kR} + \frac{\pi}{2} \kappa \left[1 - \gamma \frac{R^2}{2D_0} \left(\frac{\varepsilon_0}{v}\right)^{1/2}\right]} \quad (4.18)$$

При $z \ll 1$ транспорт деэмульгатора будет определяться закономерностями молекулярной диффузии, которую можно рассматривать как частный случай наведенной турбулентной диффузии [см. (4.12)]. Поток деэмульгатора на каплю для этого случая получается из (4.16) при $v_0 \rightarrow 0$

$$J_M = \frac{4\pi R D_0 C_0}{1 + \frac{C_0}{kR}} \quad (4.19)$$

Сравним между собой эффективности транспорта деэмульгатора за счет наведенной турбулентной и конвективной диффузии. Вычисляя отношение полных диффузионных потоков, обусловливаемых этими механизмами при больших значениях k и β , из (4.9) и (4.17) получим

$$\frac{J_T}{J_k} = \frac{2\gamma^{1/2} R}{\pi k \text{Pe}^{1/3}} \left(\frac{\varepsilon_0}{vD}\right)^{1/4} \quad (4.20)$$

В Приложении (раздел 3) показано, что в большинстве типовых транспортных потоков относительная скорость частицы, а следовательно, и число Pe , определяется движением частиц под действием силы тяжести. Подставляя в выражение для числа Pe скорость стоксов-

ского оседания частиц, запишем (4.20) в виде

$$\frac{J_T}{J_R} = \frac{2\gamma^{1/2}}{\pi\kappa} \left[\frac{9\rho_H v}{2(\rho_B - \rho_H) \varepsilon D^{1/2}} \right]^{1/3} \left(\frac{\varepsilon_0}{v} \right)^{1/4} \quad (4.21)$$

Для интересующей нас области изменения параметров

$$\begin{aligned} \rho_H &\in (800 - 900) \text{ кг/м}^3 & \Delta\rho &\in (200 - 300) \text{ кг/м}^3 \\ v &\in (0,01 - 0,2) \text{ см}^2/\text{с} & D_0 &\approx 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с} \end{aligned}$$

выражение в квадратных скобках правой части (4.21) имеет величину порядка единицы. Поскольку величина ε_0 в транспортных трубопроводах установок подготовки нефти изменяется от нескольких тысяч ($\varepsilon_0 = 2000 - 3000 \text{ см}^2/\text{с}^3$ при прохождении последних блоков теплообменной аппаратуры) до нескольких сот ($\varepsilon_0 = 500 - 1000 \text{ см}^2/\text{с}^3$ при движении в обвязочных трубопроводах), как видно из (4.21), эффектом конвективной диффузии на транспорт деэмульгатора можно пренебречь. Все дальнейшие расчеты потоков деэмульгатора будем проводить только с учетом наведенной турбулентной диффузии.

Как уже отмечалось, константы скорости реакции разрушения бронирующих оболочек неизвестны. Поэтому нельзя установить, на какой стадии идет разрушение — на транспортной или на кинетической. Однако из полученных соотношений вытекает условие, при выполнении которого можно считать, что процесс разрушения бронирующих оболочек происходит на транспортной стадии. Из (4.16) непосредственно получаем это условие в виде

$$k \gg \frac{2(z+1)^{1/3}}{\pi\kappa} \cdot \frac{D_0}{R} \quad (4.22)$$

которое при $z \gg 1$ можно переписать в виде

$$k \gg \frac{2(\gamma D_0)^{1/2}}{\pi\kappa} \left(\frac{\varepsilon_0}{v} \right)^{1/4} \quad (4.23)$$

При $D_0 = 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$, $\varepsilon_0 = 500 \text{ см}^2/\text{с}^3$ и $v = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ правая часть этого неравенства имеет величину $2 \cdot 10^{-3}$. С уменьшением z нижний предел для k — правая часть неравенства (4.22), определяющего переход процесса на транспортную стадию, также будет уменьшаться и стремиться к величине D_0/R .

Анализ полученных неравенств для границ перехода процесса разрушения оболочек на транспортную стадию показывает, что возможны ситуации, когда разрушение бронирующих оболочек на самых маленьких каплях будет проходить на кинетической стадии, а для более крупных капель этот процесс будет идти на транспортной стадии.

В том случае, когда процесс разрушения оболочек будет идти на кинетической стадии, как видно из (4.16), выражение для потока деэмульгатора запишется в виде

$$J_T = 4\pi R^2 k C_0 \quad (4.24)$$

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ БРОНИРУЮЩИХ ОБОЛОЧЕК

После получения выражения для полного потока деэмульгатора на каплю, можно перейти к вычислению соотношения (4.2). До сих пор все соотношения для потоков деэмульгатора были прямо пропорциональны концентрации вещества C_0 , которую мы подразумевали постоянной. Однако в первом приближении этими же моделями можно пользоваться и в случае медленно изменяющейся во времени концентрации, формально заменив в рассматриваемых моделях C_0 на $C(t)$. Произведя такую замену в (4.17) и подставляя результирующее выражение в (4.2), получим для процесса, идущего на транспортной стадии, т. е. при достаточно больших значениях k

$$\frac{n(t)}{n_0} = 1 - \exp \left[-B\sigma \int_0^t C(\tau) d\tau \right] \quad (4.25)$$

где

$$B = \frac{2}{\pi\kappa} (\gamma D_0)^{1/2} \left(\frac{\varepsilon_0}{v} \right)^{1/4}$$

Здесь σ — поверхность, занимаемая одной молекулой деэмульгатора ($n\sigma = 4\pi R^2$). Левая часть соотношения (4.25) представляет собой относительную поверхность капли, занятую деэмульгатором. В интересующей нас области изменений параметра z (z изменяется от нескольких единиц до нескольких сот единиц, величину κ в выражении для B можно с 20%-ной точностью принять равной 1,5).

После такой замены правая часть (4.25) не будет зависеть от радиуса частиц. Поскольку долю заполнения поверхности капли деэмульгатором можно принять за степень разрушения бронирующей оболочки на ней, получаем, что скорость относительного разрушения бронирующих оболочек одинакова для всех капель, независимо от их размеров. Здесь следует еще раз отметить, что мы рассматриваем капли с размерами во много раз меньшими внутреннего масштаба турбулентности.

Рассмотрим случай, когда вещество адсорбируется не одной частицей, а совокупностью частиц, равномерно распределенных в пространстве. При этом будем считать концентрацию частиц такой, при которой их взаимодействием можно пренебречь. Однако их влияние друг на друга будет сказываться во времени за счет изменения концентрации адсорбируемого вещества.

Пусть общее число частиц в единице объема равно N и они обладают плотностью распределения по радиусам $p(R)$. Пусть за время t на каждую частицу уже адсорбировалось $n(R, t)$ молекул деэмульгатора. Тогда, если в нулевой момент времени в единице объема содержалось C_0 молекул деэмульгатора, то через время t их останется

$$C(t) = C_0 - N \int_0^\infty n(R, t) p(R) dR \quad (4.26)$$

Обозначая через $n_0(R)$ предельное количество деэмульгатора на капельке радиуса R , (4.26) можно записать в следующем виде

$$C(t) = C_0 - \frac{n(R, t)}{n_0(R)} N \int_0^{\infty} n_0(R) \rho(R) dR = C_0 - \frac{n(R, t)}{n_0(R)} \cdot \frac{S}{\sigma} \quad (4.27)$$

Здесь $S = 4\pi N \int_0^{\infty} R^2 \rho(R) dR$ — суммарная поверхность всех капелек. Множитель $n(R, t)/n_0(R)$ был вынесен из-под знака интеграла на основании полученного вывода о независимости скорости разрушения бронирующих оболочек от радиуса капелек. Подставляя (4.27) в (4.25), получим

$$x(t) = 1 - \exp \left[-B\sigma \left(C_0 - \frac{S}{\sigma} \right) \int_0^t x(\tau) d\tau \right] \quad (4.28)$$

здесь

$$x = n(t)/n_0$$

Уравнение (4.28) можно привести к виду

$$\ln [1 - x(t)] = BS \int_0^t x(\tau) d\tau - B\sigma C_0 t \quad (4.29)$$

Дифференцируя это выражение по t и производя очевидные преобразования, получим

$$\dot{x} = BS \left(x - \frac{\sigma C_0}{S} \right) (x - 1) \quad (4.30)$$

Интегрируя это уравнение с начальным условием $x=0$ при $t=0$, получим

$$x = \frac{m \{ 1 - \exp [(m-1)BS t] \}}{1 - m \exp [(m-1)BS t]}, \quad m = \frac{\sigma C_0}{S} \quad (4.31)$$

Параметр m можно рассматривать как показатель передозировки деэмульгатора, так как он равен отношению площади мономолекулярной пленки, составленной из всего объема деэмульгатора, к общей площади межфазной поверхности. Зависимость x от безразмерного времени $\tau = BSt$ при различных значениях m представлена на рис. 4.2.

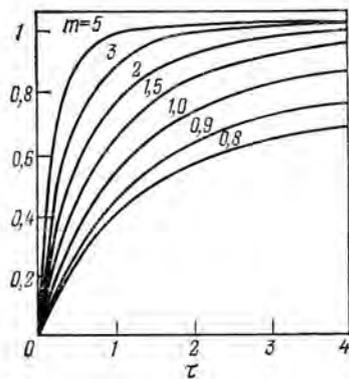


Рис. 4.2. Зависимость степени разрушения бронирующих оболочек x от безразмерного времени τ и расхода деэмульгатора m .

Как видно из рис. 4.2, рост величины x во времени носит асимптотический характер. Асимптотой для нее служит величина m , если $m \leq 1$ и 1, если $m \geq 1$. Степень влияния параметра m на скорость разрушения бронирующей оболочки также хорошо видна из этого рисунка.

Изменение скорости разрушения бронирующих оболочек определяется, очевидно, не только степенью передозировки деэмульгатора, но и теми технологическими параметрами, от которых зависит безразмерное время.

Чтобы установить зависимость скорости разрушения бронирующих оболочек от различных технологических параметров, определим из (4.31) время, необходимое для процесса разрушения оболочек до степени x

$$t = \frac{1}{B} \cdot \frac{\ln \left[\frac{m-x}{m(1-x)} \right]}{m-1} \cdot \frac{1}{S} \quad (4.32)$$

Первый сомножитель в правой части (4.32) на основании (4.25) может быть представлен в виде

$$\frac{1}{B} = \frac{\pi \kappa}{2(\gamma D_0)^{1/2}} \left(\frac{\nu}{\epsilon_0} \right)^{1/4} \quad (4.33)$$

Величину удельной диссипации энергии следует, вероятно, отнести не только к технологическим, но и к конструктивным параметрам блока, в котором разрушаются бронирующие оболочки. Так, в мешалках этот параметр определяется соотношениями геометрических размеров мешалки, вязкостью жидкости и оборотами мешалки [83]; в круглой гладкой трубе удельная диссипация определяется соотношением (П.1.12) в Приложении. Учитывая это соотношение в (4.33), получаем для круглой трубы диаметром d

$$\frac{1}{B} = 2,07 (\gamma D_0)^{-1/2} \frac{d^{27/16} \nu^{3/16}}{Q^{11/16}} \quad (4.34)$$

где Q — расход через трубу.

Как видно из (4.34), второй сомножитель в правой части, характеризующий влияние наведенной турбулентной диффузии на перенос деэмульгатора, практически не зависит от вязкости и определяется только расходом. (Диаметр трубы является конструктивным параметром).

Второй сомножитель в (4.32) определяется только задаваемой степенью разрушения бронирующей оболочки и степенью передозировки деэмульгатора m .

Зависимость величины t в (4.32) от третьего сомножителя очевидна, хотя и кажется несколько необычной. Действительно, этот сомножитель показывает, что при уменьшении межфазной поверхности длительность разрушения бронирующих оболочек возрастает при неизменной величине передозировки деэмульгатора. В отличие от первых двух сомножителей, величинами которых можно управлять путем изменения технологических параметров, третий сомножитель

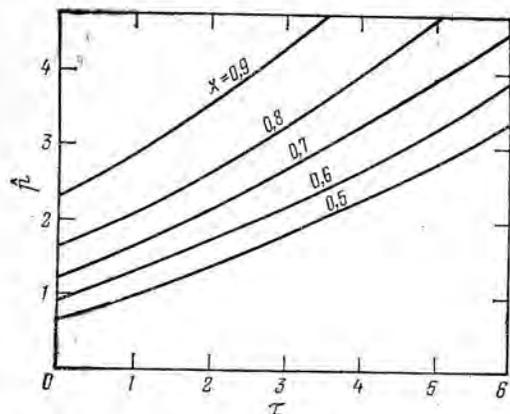


Рис. 4.3. Зависимости безразмерного расхода деэмульгатора m от безразмерного времени τ и степени разрушения бронирующих оболочек x .

в (4.32) изменяется независимо от технологических параметров установки. Его изменение можно пытаться компенсировать только изменением дозировки деэмульгатора. Других неинерционных технологических параметров, которые можно было бы использовать для этой цели, нет. Правило дозировки деэмульгатора для такой компенсации можно определить на основании (4.32).

Из уравнения (4.32) можно вычислить зависимости массового расхода деэмульгатора, необходимого для разрушения бронирующих оболочек до степени x за время t , от межфазной поверхности S . Для проведения подобных расчетов запишем величину m в виде

$$m = \frac{N_A \sigma P}{MS} \quad (4.35)$$

где N_A — число Авогадро, P — массовый расход деэмульгатора на единицу объема нефти, M — средняя молярная масса деэмульгатора. Подставляя (4.35) в (4.32), получим

$$\hat{P} - \tau = \ln \frac{\hat{P} - x\tau}{\hat{P}(1-x)} \quad (4.36)$$

где

$$\hat{P} = \frac{N_A \sigma C}{M} tB \text{ и } \tau = BS t$$

Зависимости \hat{P} от τ , вычисленные из этого соотношения при различных значениях x , представлены на рис. 4.3. Из этого рисунка и (4.36) видно, что зависимости \hat{P} от τ , монотонно возрастающие с асимптотами $\hat{P} = x\tau$ при $\tau \rightarrow \infty$ и $\hat{P} \rightarrow -\ln(1-x)$ при $\tau \rightarrow 0$.

В качестве примера по использованию полученных зависимостей оценим время и дозировку деэмульгатора, необходимые для разрушения эмульсии в транспортном потоке с $\epsilon_0 = 500 \text{ см}^2/\text{с}^3$, температурой порядка 80°C , вязкостью $0,05 \text{ см}^2/\text{с}$ и величиной межфазной поверхности 60 см^2 * на 1 см^3 эмульсии.

Воспользовавшись литературными данными [85, 86] для средней молекулярной массы неионогенного деэмульгатора типа диссольван

* Такая величина межфазной поверхности соответствует 1 %-ной монодисперсной эмульсии с радиусом частиц $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.

($M \approx 2500$) и для площади, занимаемой одной молекулой деэмульгатора такого типа ($\sigma \approx 100 \text{ \AA}$) и выбирая коэффициент передозировки деэмульгатора $m = 1,5$ получим при $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ $P = 1,5 \rho M S / \sigma N_A = 33 \text{ г/т}$. Для $x = 0,9$ время до разрушения бронирующих оболочек в этом случае, определяемое из (4.32), равно 46 с.

Если разрушение бронирующих оболочек идет на кинетической стадии, подставляя в (4.2) поток деэмульгатора в виде (4.23) и проводя выкладки аналогичные проведенным при выводе соотношения (4.32), получим

$$t = \frac{1}{k} \cdot \frac{\ln \left[\frac{m-x}{m(1-x)} \right]}{m-1} \cdot \frac{1}{S} \quad (4.37)$$

Поскольку (4.37) отличается от (4.32) только заменой B на k , проведенный анализ соотношения (4.32) справедлив и для (4.37) с учетом замены B на k .

Из рис. 4.3 видно, что зависимость \hat{P} от τ близка к линейной и ее с учетом (4.36) можно аппроксимировать выражением вида

$$P_{r/\tau} = \left[\frac{\alpha(x)}{Bt} + \frac{3 \cdot 10^{-2} \beta(x) W \int_0^\infty R^2 p(R) dR}{\int_0^\infty R^3 p(R) dR} \right] 10^6 \frac{Mp}{A\sigma} \quad (4.38)$$

где $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ — коэффициенты, зависящие только от x и имеющие порядок величины соответственно $\alpha(x) \sim \ln(1-x)^{-1}$ и $\beta(x) \sim x$, W — обводненность сырья в %. Для ситуаций, когда плотность распределения частиц по размерам $p(R)$ можно считать постоянной, соотношение (4.38) при $x = 0,9$ и для неионогенного деэмульгатора с параметрами $M = 2500$, $\sigma = 100 \text{ \AA}$ можно переписать в виде

$$P_{r/\tau} = \frac{0,9}{Bt} + 10^{-2} W \frac{\mu_2}{\mu_3} \quad (4.39)$$

где μ_2 и μ_3 — соответственно второй и третий момент распределения частиц дисперсной фазы по размерам. Слагаемые в правой части (4.39) можно трактовать как количества деэмульгатора, идущие соответственно на компенсацию временного и гидродинамического факторов разрушения эмульсии и на заполнение межфазной поверхности. Отношение этих слагаемых, которое обозначим через Y , будет показывать перерасход (в долях) деэмульгатора на компенсацию гидродинамического и временного факторов в блоке разрушения эмульсии

$$Y = \frac{90\mu_3}{BtW\mu_2} \quad (4.40)$$

Когда процесс разрушения бронирующих оболочек идет в круглой трубе диаметром d и длиной l , произведение Bt с учетом (4.34) можно

$$Bt = 0,4 \left(\frac{\gamma D_0}{\nu^{3/10}} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{Q} \right)^{3/10} l \text{ при } Re \lesssim 10^5 \quad (4.41)$$

Отсюда видно, что это произведение слабо зависит от диаметра трубы, в которой разрушаются оболочки, и прямо пропорционально ее длине. Для этого случая можно поставить задачу о выборе наилучшего диаметра трубопровода, обеспечивающего максимальное значение правой части соотношения (4.41) при заданном перепаде давления Δp . Подставляя в (4.41) зависимость l от Δp и d , получим

$$Bt = 1,5 \frac{(\gamma D_0)^{1/2} \Delta p d^{3/10}}{\rho \nu^{2/10} Q^{33/10}} \quad (4.42)$$

$$l = \frac{2\Delta p d}{\xi \rho \mu^2}, \quad \xi = 0,316 Re^{-1/4}$$

Из этого соотношения видно, что повышения эффективности процесса разрушения бронирующих оболочек при фиксированном перепаде давления Δp можно достичь путем увеличения диаметра трубопровода. Поскольку при увеличении диаметра трубопровода уменьшается турбулизация потока, исследуемая модель разрушения бронирующих оболочек справедлива только для случая хорошо развитой турбулентности.

При построении модели для скорости разрушения эмульсии при помощи деэмульгатора не учитывался процесс коалесценции между отдельными каплями. Поэтому полученные результаты справедливы только для слабоконцентрированных эмульсий. На практике подобные случаи встречаются при разрушении эмульсии в процессе обессоливания нефтей. При расчете деэмульгатора для обезвоживания рассмотренная модель будет давать завышенные его расходы. Для выяснения причины этого рассмотрим подробнее кинетику процесса разрушения высокообводненной эмульсии.

После добавления деэмульгатора бронирующие оболочки на каплях начинают разрушаться, и капли приобретают возможность коалесцировать друг с другом. В результате коалесценции какой-либо пары капель их суммарная поверхность уменьшается, появляется излишек деэмульгатора, который не может разместиться на этой новой поверхности и должен высвободиться. Пусть за время t исходная межфазная поверхность эмульсии уменьшится в q раз. Это означает, что количество деэмульгатора, которое будет захвачено эмульсией, будет также примерно в q раз меньше расчетного его количества, т. е. без учета процесса коалесценции.

В модели не учитывалось также, что деэмульгатор при определенных условиях может адсорбироваться не только на поверхности капель эмульгированной воды, но и на макро- и коллоиднодиспергированных в нефтях веществах, таких, как асфальтены, механические примеси и др. [87].

ПРОЦЕССЫ ДРОБЛЕНИЯ И КОАЛЕСЦЕНЦИИ КАПЕЛЬ В ЭМУЛЬСИЯХ

ОБРАЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭМУЛЬСИИ

Промысловые эмульсии являются полидисперсными системами с размерами капель от долей микрона и более. Основные трудности при подготовке нефтей обусловлены мелкодисперсной составляющей эмульсии, которая может образовываться при дроблении капель в турбулентном потоке, при коалесценции капель за счет образования мелкодисперсных сателлитов, при дроблении капель в электрическом поле.

Рассмотрим кратко каждый из этих процессов.

Дробление в турбулентном потоке происходит из-за воздействия на них сил, возникающих в результате турбулентных пульсаций. Очевидно, что дробление капли может происходить только под действием пульсаций, характерный размер которых λ не превышает характерного размера капли $2R$. Пульсации больших размеров будут просто переносить каплю из одной точки пространства в другую, не деформируя ее. Если размер капли удовлетворяет условию $2R < \lambda_0$, то капля также не будет дробиться, поскольку пульсации размера $\lambda < \lambda_0$ обтекают эту каплю с числами Рейнольдса $Re_\lambda < 1$. Можно показать, что обтекание капли с такими числами Рейнольдса не приводит к дроблению. Таким образом, характерный размер дробимых капель и характерный размер турбулентных пульсаций, которые вызывают их дробление, должны удовлетворять следующему неравенству

$$\lambda_0 < \lambda \lesssim 2R \quad (5.1)$$

Из этого неравенства видно, что должны существовать капли с минимальным критическим размером, которые уже не будут дробиться при данной турбулизации потока; причем этот минимальный размер не больше внутреннего масштаба турбулентности. Значение λ_0 может служить грубой оценкой для критического диаметра капель, дробящихся в турбулентном потоке.

Нахождению зависимости критического радиуса капли при дроблении от различных характеристик сплошной и дисперсной фаз посвящено большое число работ. Приведем основные из полученных в них результатов.

В. Г. Левич [82] приводит соотношение для определения критического радиуса капли при дроблении в поле однородной изотропной турбулентности

$$R_{кр} = \left(\frac{\sigma}{\kappa_e \rho_H \nu^2} \right)^{3/5} \lambda_0^{8/5} \quad (5.2)$$

где σ — межфазное поверхностное натяжение; ρ_n — плотность непрерывной фазы; ν — кинематическая вязкость непрерывной фазы; κ_e — коэффициент сопротивления, который при обтекании каплей определяется числом Рейнольдса Re_k .

Не следует считать, что капли размером меньше $R_{кр}$ совсем не будут дробиться. Они дробятся, но вероятность их дробления будет значительно меньше, чем капля размером $R > R_{кр}$.

В качестве примера ниже приведены расчетные данные в зависимости от числа Re потока в круглой трубе диаметром 10 см при $\sigma = 10^{-4}$ Н/см, $\rho_n = 1000$ кг/м³, $\nu = 0,05$ см²/с, $\kappa_e = 1$, что соответствует обтеканию капли с $Re_k \approx 100$.

Re	$10^{-4} R_{кр}$ см	Re	$10^{-4} R_{кр}$ см
$5 \cdot 10^4$	270	$4 \cdot 10^5$	38
10^5	113	$5 \cdot 10^5$	21
$2 \cdot 10^5$	50		

Соотношение (5.2) выведено для случая однородного и изотропного турбулентного потока. Вблизи стенки поток становится существенно неоднородным и не изотропным. Частично это объясняется тем, что на расстоянии y от стенки масштаб пульсаций ограничен условием $\lambda \leq y$. Поэтому чем ближе к стенке капля, тем с большей вероятностью она будет раздроблена, так как на нее действуют только мелкомасштабные пульсации. Это подтверждается и экспериментальными наблюдениями [88—91].

В работе [88] для критического радиуса капли в пристеночной области турбулентного потока в круглой трубе было получено следующее равенство

$$R_{кр} = 38 \frac{\sigma^{3/2} d^{5/2}}{\rho_n^{3/2} \nu^2 Re^{3/2}} \quad (5.3)$$

Ниже даны значения $R_{кр}$, рассчитанные по формуле (5.3) при прежних значениях входящих в нее параметров.

Re	$10^{-4} R_{кр}$ см	Re	$10^{-4} R_{кр}$ см
$5 \cdot 10^4$	250	$3 \cdot 10^5$	3,2
10^5	52	$4 \cdot 10^5$	1,6
$2 \cdot 10^5$	9		

В работе [99] выводятся соотношения, уточняющие (5.3) путем учета зависимости $R_{кр}$ от вязкости не только сплошной, но и дисперсной фазы. Там же исследуются соотношения, определяющие зависимость $R_{кр}$ от диаметра трубы. Однако существенных поправок к соотношению (5.3) не получено.

Правильность соотношения (5.3) подтверждается результатами экспериментов [3]. Показано, что при $\rho_n \approx \rho_d$ формула (5.3) выполняется с точностью до 20%. При этом отмечено, что дробление наблюдалось только возле стенки. В ядре потока дробление не происходило. Следовательно, можно сделать вывод, что по формуле (5.3) можно оп-

ределить критический размер каплей для процесса дробления возле стенки трубы.

Как показали многочисленные эксперименты, капли дробятся следующим образом. Вначале капля деформируется, принимая вид гантели, шейка которой быстро утоньшается и разрывается. При этом образуются две примерно одинаковые капли и одна или несколько мелких от разрыва шейки. Наблюдения проводили при объемных концентрациях дисперсной фазы от 0,6 до 5%. Было замечено, что с уменьшением относительного расстояния $2y/d$ размеры каплей уменьшаются.

В работе [90] проанализированы различные математические модели дробления. Удовлетворительное совпадение с результатами экспериментов дала следующая модель. Вероятность дробления каплей с $R < R_{кр}$ равна нулю. При изменении R от $R_{кр}$ до R_{max} она линейно растет от нуля до единицы. В результате дробления возникают две одинаковые дочерние капли и сателлит, размер которого равномерно распределен в фиксированном интервале.

Рассмотрим дробление капли в электрическом поле. Имеется несколько теоретических и экспериментальных работ [92—95], посвященных этому вопросу. Однако во всех работах анализируется поведение не каплей эмульсии, а каплей аэрозоля, точнее, дождевых каплей размером от 0,1 до 1 см в атмосфере при напряженности поля 10 кВ/см.

Капля, помещенная в электрическое поле напряженностью E , поляризуется и деформируется, принимая форму эллипсоида, большая ось которого параллельна направлению электрического поля. Степень деформации, которая определяется отношением полуосей эллипсоида, зависит от напряженности поля E . Существует некоторое значение $E_{кр}$, при котором деформация капли может привести к ее разрыву. Условие равновесия для капли реализуется при равенстве суммы внешних сил, действующих на единицу ее поверхности, силе межфазного поверхностного натяжения. Поскольку электрическое поле в окрестности поверхности капли неоднородно, условие равновесия характеризуется локальное равновесие, а не равновесие всей капли. В работе [92] это условие равновесия рассмотрено для полюсов и для экватора капли в связи с тем, что именно в этих точках деформации поверхности максимальны. Показано, что устойчивость капли зависит от безразмерного параметра $\kappa = E (R/\sigma)^{1/2}$, значение которого в момент потери устойчивости равно 1,625.

Представляет интерес зависимость $E_{кр}$ от радиуса капли, которую можно получить из соотношения

$$E_{кр} = \kappa \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{1/2} \quad (5.4)$$

Ниже даны значения $E_{кр}$ для различных величин R при $\sigma = 3 \times 10^{-4}$ Н/см и $\kappa = 1,625$.

R , см	E , кВ/см	R , см	E , кВ/см
1	2,67	0,011	25,43
0,5	3,77	0,005	37,60
0,1	8,42	0,0012	83,44
0,05	11,87		

Как видно из приведенных данных, для капель размером $\leq 10^{-2}$ см, $E_{кр} \geq 2,5$ кВ/см. Капли же размером 1 см теряют устойчивость при $E_{кр} \sim 3$ кВ/см*. Поскольку нас интересуют поля от 1 до 3 кВ/см*, можно заключить, что изолированные мелкие капли в электрических полях такой напряженности дробиться не будут.

Устойчивость капли в однородном внешнем электрическом поле с учетом влияния соседних капель рассмотрена в работах [94, 95]. На основе вычисления напряженности электрического поля между каплями найдены следующие критические значения параметра κ , определяющего критическую напряженность поля в зависимости от относительного расстояния между двумя одинаковыми каплями:

Начальное расстояние, радиусы капли	κ
∞	1,625
10	1,555
1	0,9889
0,1	0,0789
0,01	$3,91 \cdot 10^{-3}$
0,001	$1,9 \cdot 10^{-4}$

Из приведенных данных видно, что наиболее значительное изменение κ происходит на расстояниях, меньших радиуса капли. Следовательно, при сближении капель на расстояние, меньше радиуса капли, они могут потерять устойчивость и при незначительных внешних электрических полях. В то же время на столь близких расстояниях станет существенной сила притяжения капель, которая будет способствовать коалесценции дробящихся капель.

До сих пор мы рассматривали процессы дробления капель, которые приводят к образованию мелкодисперсной составляющей водонефтяной эмульсии. Однако мелкие капли могут образовываться не только при дроблении капель, но и при их коалесценции. Было экспериментально установлено, что одиночная капля может коалесцировать на плоской поверхности межфазного раздела в несколько этапов, на каждом из которых образуется более мелкая (по сравнению с коалесцирующей) капелька-сателлит. В работе [96] наблюдалось до восьми последовательных этапов коалесценции. В работе [97] авторы описывают экспериментальные наблюдения, доказывающие образование мелкодисперсных сателлитов при коалесценции отдельных капель дисперсной фазы. Если коалесценция идет в электрическом поле с напряженностью несколько десятков вольт на 1 см и более, мелкодисперсные сателлиты не образуются. Этот интересный факт подробно исследовался в работах [96—99].

* Типовые напряженности полей в электродегидраторах.

Теорию процессов, связанных с переходом в состояние равновесия, называют кинетической [100], а соответствующие ей уравнения — кинетическими. Следуя этому определению, кинетическими уравнениями для эмульсий называют уравнения, отражающие изменение во времени и пространстве концентрации и распределения по размерам капель эмульгированной жидкости.

Будем характеризовать состояние эмульсии в момент времени t в элементарном объеме в окрестности точки с координатами x, y, z , распределением числа частиц по объемам $n(t, V, x, y, z)$.

Переменные x, y, z можно рассматривать как координаты фазового пространства для распределения частиц с объемами в интервале $(V, V+dV)$. Поскольку частицы могут исчезать и появляться в элементе фазового объема в результате процессов дробления и коалесценции частиц, уравнение неразрывности в этом пространстве запишется в виде

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(vn) = j^+ - j^- \quad (5.5)$$

где v — скорость движения частиц, а j^+ и j^- — потоки частиц объема V соответственно приходящие и уходящие из элемента фазового объема. Поток j^+ образуется за счет коалесценции капель с объемами, меньшими V , и за счет дробления капель с объемами, большими V . Если через $K(V, \omega)$ обозначить вероятность коалесценции капель с объемами V и ω при единичной их концентрации*, а через $g(V/\omega)$ — вероятность образования капли объемом V при дроблении капли объемом ω , то поток j^+ можно записать в виде

$$j^+ = \frac{1}{2} \int_0^V K(V-\omega, \omega) n(V-\omega) n(\omega) d\omega + \int_V^\infty g(V/\omega) n(\omega) d\omega \quad (5.6)$$

Поток j^- образуется в результате коалесценции частиц объема V со всеми остальными частицами, а также в результате дробления частиц этого объема. Для потока j^- будет справедливо равенство

$$j^- = -n(V) \int_0^\infty K(V, \omega) n(\omega) d\omega - n(V) \int_0^V g(\omega/V) d\omega \quad (5.7)$$

Подставляя (5.6) и (5.7) в (5.5) и дополняя полученное интегродифференциальное уравнение начальными и граничными условиями, получим кинетическое уравнение для описания поведения коалесцирующей дисперсной системы с учетом дробления частиц. Если влиянием процессов дробления на формирование распределения частиц по объемам можно пренебречь, из (5.5), (5.6) и (5.7) получим кинетическое

* Здесь и далее рассматривается только парное взаимодействие частиц.

уравнение для описания коалесцирующей дисперсной системы

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(vn) = \frac{1}{2} \int_0^V K(V-\omega, \omega) n(V-\omega) n(\omega) d\omega - n(V) \times \int_0^\infty K(V, \omega) n(\omega) d\omega \quad (5.8)$$

Подобные системы реализуются во многих технологических звеньях процессов подготовки нефти, таких, как предварительное укрупнение в каплеобразователях [101], коалесценция при гравитационном отстое в электрическом поле и без него, коалесценция в процессе смешения в условиях сильной турбулизации потока и др.

Впервые уравнения подобного типа для описания поведения во времени коагулирующей дисперсной системы были рассмотрены Смолуховским. Он моделировал дисперсную систему, состоящую из сферических коллоидных частиц. Под действием броуновской диффузии эти частицы могут сталкиваться и слипаться (коагулировать), что приводит к изменению во времени их размеров и числа. Смолуховский рассмотрел дискретный аналог уравнения (5.8). Впоследствии этим уравнением занимались многие исследователи. Достаточно полные обзоры по общим и частым методам его решения можно найти в работе [102].

Имеющиеся в литературе результаты относятся к исследованиям поведения коллоидных и аэрозольных дисперсий. Нас же интересуют дисперсные системы типа жидкость — жидкость, поведение которых может существенно отличаться от поведения аэрозольных и коллоидных систем вследствие различной подвижности частиц в этих системах, обусловливаемой вязкостными свойствами непрерывных фаз, разностью плотностей фаз и размерами частиц. Если коллоидные системы обладают полидисперсностью второго порядка (размер их частиц 10^{-7} — 10^{-5} см), то полидисперсность водонефтяных эмульсий на два порядка выше (10^{-5} — 10^{-1} см).

В уравнении (5.8) единственный элемент зависит от всех этих факторов — это ядро коалесценции $K(V, \omega)$, которое и определяет поведение дисперсной системы во времени. $K(V, \omega)$ не является произвольной функцией двух переменных. Помимо очевидных размерностных свойств она должна обладать свойством симметрии, т. е. должна удовлетворять условию $K(V, \omega) = K(\omega, V)$. Чтобы это показать, умно-

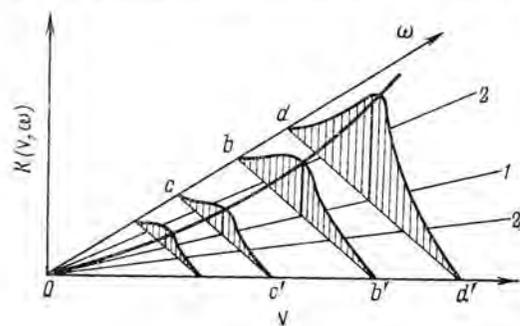


Рис. 5.1. Схематическое изображение функции $K(V, \omega)$.

жим правую и левую часть (5.8) на V и проинтегрируем по всем объемам. Полагая $v=0$, получим

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\omega - V) K(V, \omega) n(V) n(\omega) d\omega dV \quad (5.9)$$

Поскольку суммарный объем дисперсной фазы W остается во времени неизменным, производная в левой части равна нулю, и (5.9) можно переписать в виде

$$\int_0^\infty V K(V, \omega) n(V) n(\omega) d\omega dV = \int_0^\infty \omega K(V, \omega) n(V) n(\omega) d\omega dV \quad (5.10)$$

Отсюда видно, что это равенство справедливо при любых V только при выполнении условия симметрии для функции $K(V, \omega)$. Нарушение этого условия приводит к нарушению материального баланса в системе и эквивалентно введению в кинетическое уравнение источников или стоков для частиц различных размеров, интенсивность которых пропорциональна концентрации частиц и зависит от степени и вида несимметрии.

В плоскости V, ω (рис. 5.1) осью симметрии для $K(V, \omega)$ будет прямая $0,1$, проходящая под углом 45° к осям координат. В сечениях, перпендикулярных оси симметрии, $K(V, \omega)$ будет одномерной симметричной функцией. Если она в этом сечении не тождественная константа, то в точке $V=\omega$, находящейся на оси симметрии, она имеет экстремальное значение. На рис. 5.1 условно изображены несколько сечений и показана функция $K(V, \omega)$, достигающая максимального значения на оси симметрии.

Если взять производную от $K(V, \omega)$ по направлению, перпендикулярному оси симметрии, и приравнять ее нулю при $V=\omega$, то получим следующую формулировку условия экстремума

$$\left. \frac{\partial K(V, \omega)}{\partial V} \right|_{V=\omega} = - \left. \frac{\partial K(V, \omega)}{\partial \omega} \right|_{V=\omega} \quad (5.11)$$

Предположим, что структура $K(V, \omega)$ такова, что ее можно представить в виде

$$K(V, \omega) = Gf(V, \omega) \quad (5.12)$$

где $f(V, \omega)$ — симметричная функция, зависящая только от размеров частиц, а G — множитель, определяемый внешними условиями, при которых идет коалесценция. Обе величины — G и $f(V, \omega)$ в общем случае размерные. Пусть $f(V, \omega)$ имеет размерность длины в степени η ; тогда из теории размерностей [103] следует, что ее можно записать в виде

$$f(V, \omega) = V^\eta f\left(1, \frac{\omega}{V}\right) \quad (5.13)$$

Функции, для которых это условие справедливо, называются однородными функциями со степенью однородности η .

Вдоль любого луча, проведенного из начала координат плоскости V, ω [например, вдоль $(0,1); (0,2), (0,2')$ на рис. 5.1], $K(V, \omega)$ — монотонная функция одной переменной со скоростью роста V^n . Поскольку при одновременном уменьшении V и ω функция $K(V, \omega)$, исходя из физических соображений, не должна неограниченно возрастать, то $\eta \geq 0$.

В произвольном сечении aa' координатной плоскости, задаваемом уравнением $V + \omega = Z = \text{const}$ (см. рис. 5.1), $K(V, \omega)$ можно записать в виде

$$\frac{K(V, \omega)}{GZ^n} = f(m, 1-m), \quad m = \frac{V}{Z} \quad (5.14)$$

Функция $K(V, \omega)$ в общем случае определяется механизмом сближения и последующей коалесценцией капель, которая зависит от свойств их поверхностей. Мы будем рассматривать только транспортные модели коалесценции, т. е. модели, учитывающие только процессы сближения капель.

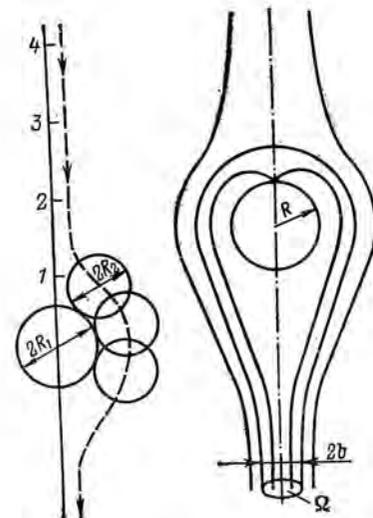
Различают два основных механизма сближения частиц дисперсной среды: за счет разности абсолютных скоростей их движения, или конвективный (градиентный) механизм сближения; за счет диффузии частиц, или диффузионный механизм сближения. Оба эти механизма еще усложняются различными силовыми взаимодействиями между частицами, которые обуславливаются гидродинамикой выдавливания разделяющей их пленки сплошной фазы, свободными или наведенными зарядами на частицах, внешним электрическим полем и др. Рассмотрим эти механизмы более подробно с целью получения соответствующих им ядер коалесценции.

КОНВЕКТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ СБЛИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ

Оседают ли частицы под действием сил тяжести в покоящейся или слабоперемешиваемой жидкости или находятся в сдвиговом потоке, — они будут перемещаться относительно друг друга и могут сталкиваться. Однако это столкновение не похоже на чисто геометрическое столкновение бильярдных шаров. Частицы находятся в вязкой жидкости и могут сблизиться только после выдавливания разделяющей их пленки сплошной фазы. Сближению капель препятствуют значительные силы, которые зависят от вязкости сплошной фазы, относительных размеров частиц и скорости их сближения. Вследствие гидродинамического взаимодействия частиц даже почти при центральном их сближении, когда столкновение казалось бы неизбежным, частицы могут обойти друг друга, не коснувшись. Такое поведение частиц неоднократно наблюдалось в физических и модельных экспериментах. На рис. 5.2 приведены результаты по моделированию сближения сферических частиц в вязкой жидкости [105]. Одна частица была неподвижной, а другая двигалась к ней вместе с потоком жидкости. Из приведенного рисунка хорошо видно влияние гидродинамического взаимодействия между частицами на траекторию их движения.

Рис. 5.2. Траектория относительного движения двух сферических частиц $R_2/R_1=0,80, 2R_1=3,95$ мм.

Рис. 5.3. Линии тока при обтекании крупной частицы мелкими и сечение захвата Ω



Однако не при любом начальном положении частиц они будут «обтекать» друг друга. Существует некоторое критическое расстояние между осями движения сближающихся частиц, когда они еще не взаимодействуют, но одна частица уже не обтекает другую, а касается ее и коалесцирует, т. е. как бы захватывается ею. Площадь, перпендикулярная оси движения большей частицы, характеризующаяся тем, что если центр меньшей частицы прошел через эту площадь, то она коалесцирует с большей частицей, называется сечением захвата большой частицы (рис. 5.3). Мы будем обозначать его через Ω . Если сечение захвата является окружностью, то говорят о радиусе сечения захвата.

Сечение захвата зависит от радиусов сближающихся частиц, их гидродинамического и силового взаимодействия, порождаемого молекулярными и электрическими силами. В работе [104] показано, что если учитывать только гидродинамическое взаимодействие сферических частиц, то сечение захвата будет всегда равно нулю, т. е. силовое взаимодействие частиц является существенным фактором в процессе их коалесценции.

Пусть крупная частица объема V обладает сечением захвата $\Omega(V, \omega)$ и движется со скоростью v относительно меньших частиц объемом ω . Если концентрация меньших частиц $n(\omega)$, то в единицу времени с частицей объема V будет происходить J столкновений

$$J = n(\omega) \Omega(V, \omega) |v| \quad (5.15)$$

Если концентрация мелких частиц будет единичной, то величина J будет равна, по определению, ядру коалесценции для частиц с объемами V и ω ; численное значение которого можно определить по формуле

$$K(V, \omega) = \Omega(V, \omega) |v| \quad (5.16)$$

Размерность ядра коалесценции будет равна

$$[K(V, \omega)] = \frac{1}{T} \quad (5.17)$$

Вследствие симметрии левой части равенства (5.16) правая его часть также должна обладать свойством симметрии, так как $|v|$ является симметричной функцией по своему определению; следо-

вательно $\Omega(V, \omega)$ также должна быть симметричной функцией относительно V и ω .

Имеющиеся работы по определению сечения захвата, как правило, выполнены для случая сильно различающихся по размерам частиц, а выражение для функции $\Omega(V, \omega)$ не обладают свойством симметрии. Некоторые из этих работ разбираются ниже.

Впервые сечение захвата для сильно различающихся по размерам частиц с учетом гидродинамического взаимодействия между ними было определено в работе [106]. Задача решалась в следующей постановке. Пусть R_1 и R_2 — радиусы сближающихся частиц и пусть $R_1 \gg R_2$. Относительная скорость движения частиц, пока они находятся на большом расстоянии друг от друга, равна v . При сближении частиц между ними начинают действовать гидродинамические силы, возникающие вследствие выдавливания разделяющей их пленки жидкости, и силы Ван-дер-Ваальса. При сближении капель на расстояние между их поверхностями δ сумму этих сил можно записать в виде

$$F(\delta) = \frac{6\pi\mu R_2^2}{\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} + A \frac{R_2}{6\delta^2} \quad (5.18)$$

Первое слагаемое в правой части характеризует силу гидродинамического взаимодействия частиц, второе определяет силу их взаимного притяжения, которая прямо пропорциональна величине A , называемой константой молекулярного взаимодействия, или константой Гамакера. Для системы вода — органическая жидкость величина A имеет порядок $10^{-19} - 10^{-20}$ Дж.

Пренебрегая инерционностью малой частицы и находя предельную траекторию, по которой она обтекает крупную частицу при условии действия между ними силы (5.18), было получено [106] следующее выражение для сечения захвата

$$\Omega(R_1, R_2) = 4\pi\beta \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \frac{1}{|v|}, \quad \beta = \frac{A}{6\pi\mu}, \quad R_1 \gg R_2 \quad (5.19)$$

Отсюда видно, что эта формула не обладает основным необходимым структурным свойством — симметрией. Однако ее можно подправить путем добавления в круглую скобку слагаемого R_2/R_1 . Симметризованное сечение захвата запишется в виде

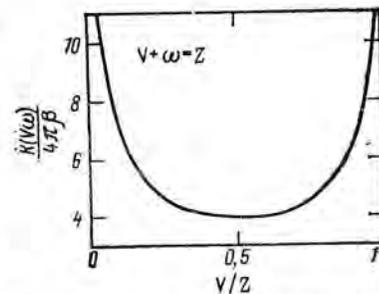
$$\Omega^*(R_1, R_2) = 4\pi\beta \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 \frac{1}{|v|}, \quad R_1 \gg R_2 \text{ или } R_2 \gg R_1 \quad (5.20)$$

Подставляя (5.20) в (5.16), получим формулу для асимптотических значений ядра коалесценции частиц при конвективном механизме их сближения с учетом гидродинамического и молекулярного взаимодействия между частицами

$$K(R_1, R_2) = 4\pi\beta \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1}\right)^2, \quad R_1 \gg R_2 \text{ или } R_2 \gg R_1 \quad (5.21)$$

* Это делается чисто формально для примера и не претендует на физическую обоснованность.

Рис. 5.4. $K(V, \omega)$ в формуле (5.21) в сечении $V + \omega = Z$.



В области значений $R_1 \sim R_2$ функция $K(R_1, R_2)$ должна быть доопределена. Исходя из соображений размерности это доопределение можно сделать при помощи доумножения правой части (5.21) на соответствующую безразмерную, симметричную и положительно определенную функцию, стремящуюся к единице при $R_1 \gg R_2$ и $R_2 \gg R_1$. В первом приближении эту функцию будем считать тождественной единицей. Переходя для этого случая в (5.21) к объемам частиц, получим

$$K(V, \omega) = 4\pi\beta \left[\left(\frac{V}{\omega}\right)^{1/3} + \left(\frac{\omega}{V}\right)^{1/3} \right]^2 \quad (5.22)$$

Порядок однородности этого ядра $\eta = 0$. Следовательно, по любому лучу, выходящему из начала координат в плоскости V, ω (см. рис. 5.1), функция $K(V, \omega)$ будет постоянной величиной, характерной для выбранного направления.

В сечении $V + \omega = Z$ $K(V, \omega)$ будет одномерной функцией, определяемой равенством

$$\frac{K(V, \omega)}{4\pi\beta} = \left[\left(\frac{m}{1-m}\right)^{1/3} + \left(\frac{1-m}{m}\right)^{1/3} \right]^2, \quad m = \frac{V}{Z}, \quad \omega = Z - V \quad (5.23)$$

График функции (5.23) представлен на рис. 5.4.

В работе [107] определялось сечение захвата для случая, когда меньшая из частиц радиусом R_2 несет свободный заряд Q_2 . Обе частицы проводящие. При расчетах не учитывалось молекулярное взаимодействие частиц и силы их гидродинамического взаимодействия. Сумма этих сил ранее определялась формулой (5.18). Электрические силы взаимодействия считались кулоновскими и определялись взаимодействием заряда Q_2 с индуцированным зарядом на частице R_1 . Для сечения захвата было получено выражение

$$\Omega(R_1, R_2) = \left(\frac{2\pi^3}{3\rho_{H2O}}\right)^{1/4} \frac{Q_2^{1/2}}{(R_1 R_2)^{1/2} v^{1/4}}, \quad R_1 \gg R_2 \quad (5.24)$$

Подставляя (5.24) в (5.16) и считая обтекание частиц стоксовым, получим формулу для асимптотических значений ядра

$$K(R_1, R_2) = G \frac{(R_1^2 - R_2^2)^{3/4}}{(R_1 R_2)^{1/2}}, \quad G = \frac{2(\pi\Delta\rho)^{3/4}}{3^{7/4}\rho_{H2O}^{1/4}} \text{ при } R_1 \gg R_2 \text{ или } R_2 \gg R_1 \quad (5.25)$$

Так же, как и в предыдущем случае, в области $R_1 \sim R_2$ эта функция должна доопределяться. Считая доопределяющую функцию в первом

приближении тождественной единицей и переходя к объемам частиц, получим

$$K(V, \omega) = 0,49G \frac{(V^{2/3} - \omega^{2/3})^{3/4}}{(V\omega)^{1/6}} \quad (5.26)$$

Порядок однородности этого ядра $\eta = 1/6$. В сечении $V + \omega = z$ $K(V, \omega)$ будет одномерной функцией, определяемой равенством

$$\frac{K(V, \omega)}{0,49Gz^{1/6}} = \frac{[m^{2/3} - (1-m)^{2/3}]^{3/4}}{m^{1/6}(1-m)^{1/6}}, \quad m = \frac{V}{z}; \quad \omega = z - V \quad (5.27)$$

График функции (5.27) представлен на рис. (5.5).

В работе [108] рассмотрено определение сечения захвата для нейтральных проводящих сферических частиц, находящихся во внешнем электрическом поле напряженностью E . Предполагалось, что большая частица закреплена, а меньшая приближается к ней с потоком жидкости, имеющим скорость v . Задача решалась с учетом только гидродинамического и электростатического взаимодействия частиц. Выражение для силы гидродинамического взаимодействия частиц взято из работ [109—112], где рассмотрено сближение пары сферических частиц произвольного радиуса. Задача решалась численно, отношение радиусов частиц варьировалось в пределах 100—2. Если плоскость движения частиц совпадает с плоскостью поля, авторы предлагают аппроксимировать сечение захвата следующим выражением

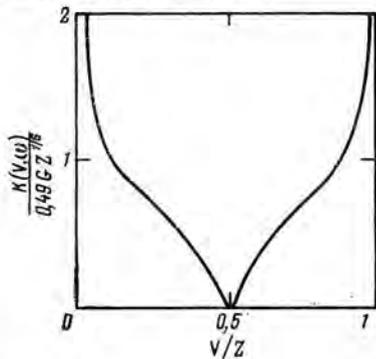
$$\Omega(R_1, R_2) = 0,57R_1^2 S [1 - \exp(-5,75R_2/R_1)]$$

$$S = \frac{\epsilon R_2 E^2}{6\pi\rho_H v |v|}, \quad R_1 > R_2 \quad (5.28)$$

Для случая, когда $R_1 \gg R_2$, предлагается использовать аппроксимирующее выражение вида

$$\Omega(R_1, R_2) = 0,55 \frac{\epsilon E^2}{\rho_H v} \cdot \frac{R_1 R_2^2}{|v|}, \quad R_1 \gg R_2 \quad (5.29)$$

которое получается из (5.28) разложением экспоненты в ряд и раскрытием параметра S .



Если безразмерный параметр S , характеризующий силы электростатического взаимодействия частиц, порядка единицы и выше, то, как показали авторы, гидродинамическим взаимодействием частиц можно пренебречь. Расчеты сечений захвата, проведенные для трехмерного слу-

Рис. 5.5. $K(V, \omega)$ в формуле (6.27) в сечении $V + \omega = z$.

чая без учета гидродинамического взаимодействия частиц, показывают, что площади сечений захвата от ориентации поля уменьшаются меньше, чем на 10%. Поэтому в первом приближении сечение захвата можно считать независимым от ориентации поля и удовлетворяющим соотношению (5.28). Полученные аппроксимации для сечений захвата (5.28) и (5.29) не удовлетворяют условию симметрии, и их необходимо подправить. Поскольку при условии закрепления большей частицы, при котором проведены расчеты, полученные результаты справедливы только при $R_1 \gg R_2$, будем рассматривать только аппроксимацию вида (5.29).

Ее можно симметризовать без существенного нарушения численных значений в области определения. В результате получим

$$\Omega(R_1, R_2) = 0,55 \frac{\epsilon E^2}{\rho_H v} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{|v|}, \quad R_1 \gg R_2 \text{ или } R_2 \gg R_1 \quad (5.30)$$

Подставляя (5.30) в (5.16), получим асимптотики для ядра коалесценции

$$K(R_1, R_2) = 0,55 \frac{\epsilon E^2}{\rho_H v} \cdot \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1 + R_2}, \quad R_1 \gg R_2 \text{ или } R_2 \gg R_1 \quad (5.31)$$

Считая доопределяющую функцию для этого ядра в области близких размеров частиц в первом приближении тождественной единицей и переходя к объемам частиц, получим

$$K(V, \omega) = 0,24 \frac{\epsilon E^2}{\rho_H v} \cdot \frac{(V\omega)^{2/3}}{V^{1/3} + \omega^{1/3}} \quad (5.32)$$

Порядок однородности этого ядра $\eta = 1$. В сечении $V + \omega = z$, $K(V, \omega)$ определяется равенством

$$\frac{K(V, \omega) \rho_H v}{0,24 \epsilon E^2} = (1-m) \left(\frac{m}{1-m} \right)^{2/3} \left[1 + \left(\frac{m}{1-m} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (5.33)$$

График этой функции представлен на рис. 6.1 (см. с. 111).

ДИФфуЗИОННЫЙ МЕХАНИЗМ СБЛИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ

Различают три вида диффузии взвешенных частиц, способствующих их относительному перемещению.

1. Молекулярная диффузия частиц, при которой подвижность частиц обусловлена их «бомбардировкой» молекулами сплошной среды. Коэффициент молекулярной диффузии сферической частицы радиуса R определяется формулой Эйнштейна

$$D = \frac{kT\rho}{6\pi\eta R} \quad (5.34)$$

где $k = 1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. Молекулярную диффузию обычно применяют для описания подвижности коллоидных или мелких аэрозольных частиц. С увеличением размеров частиц и вязкости среды, в которой они диф-

фундируют, коэффициент броуновской диффузии достигает величин порядка 10^{-10} см²/с для эмульгированных частиц при $R=10^{-3}$ м, $\rho=1000$ кг/м³, $\nu=0,01$ см²/с, $T=300$ К. Для коллоидных частиц размером 10^{-6} м (при прочих равных условиях) коэффициент броуновской диффузии будет на три порядка выше.

2. Турбулентная диффузия частиц, при которой они перемещаются турбулентными пульсациями сплошной среды. Турбулентная диффузия определяет макроперемещения частиц и характеризует не взаимное перемещение близкорасположенных частиц, которое может привести к их столкновению, а перенос частиц на большие, по сравнению с длиной пути перемешивания, расстояния и способствует выравниванию концентрации вещества в объеме.

3. Наведенная турбулентная диффузия частиц в масштабах, меньших внутреннего масштаба турбулентности (см. Приложение, раздел 2), при которой подвижность частиц обусловлена влиянием мелкомасштабных затухающих пульсаций, возбуждаемых внешним полем турбулентных пульсаций с размерами, большими λ_0 .

Из всех этих видов диффузии наибольшее влияние на коалесценцию в водонефтяных эмульсиях оказывает наведенная турбулентная диффузия, которую мы и будем разбирать в дальнейшем.

При диффузионном механизме сближения частиц радиусов R_1 и R_2 число их столкновений в единицу времени принято характеризовать диффузионным потоком частиц одного размера на частицу другого размера. Для определенности будем говорить, что частицы R_2 диффундируют на частицы R_1 . Этот поток при единичной концентрации частиц R_2 является ядром коалесценции $K(R_1, R_2)$ и определяется из решения стационарного диффузионного уравнения

$$\nabla \left[D \nabla n(R_2) - \frac{F}{h} n(R_2) \right] = 0 \quad (5.35)$$

с соответствующими граничными условиями. Здесь D — коэффициент взаимной диффузии частиц радиусов R_1 и R_2 ; $n(R_2)$ — концентрация частиц R_2 ; F — силовое взаимодействие частиц; h — коэффициент сопротивления для движения частицы R_2 , ∇ — дифференциальный оператор набла.

Величины D , h и F являются функциями расстояния между частицами, а F дополнительно может зависеть и от пространственной ориентации частиц.

Рассмотрим вначале случай, когда сила F является центральносимметричной. Такими силами являются силы молекулярного взаимодействия частиц, а также силы, обусловленные свободными электрическими зарядами на частицах. Решая уравнение (5.35) в сферической системе координат с началом в центре частицы R_1 и граничными условиями $n=0$ при $r=R_1+R_2$ и $n=n_0$ при $r \rightarrow \infty$, получим следующее выражение для потока частиц R_2 на частицу R_1

$$J(R_1, R_2) = 4\pi n_0 \varphi^{-1}, \quad \varphi = \int_{R_1+R_2}^{\infty} \frac{dr}{r^2 D(r)} \exp \left[\int_r^{\infty} \frac{F\rho}{h(\rho) D(\rho)} d\rho \right] \quad (5.36)$$

Для вычисления правой части (5.36) необходимо определить функции $D(r)$, $F(r)$ и $h(r)$.

Коэффициент взаимной диффузии сферических частиц в вязкой жидкости (см. Приложения) можно представить в виде

$$D(r) = D_0(r) H^2(r) \quad (5.37)$$

где $D_0(r)$ — коэффициент свободной, т. е. без учета взаимовлияния, взаимной диффузии частиц, $H^2(r)$ — поправочный множитель, учитывающий гидродинамическое торможение частиц при их сближении. Эти величины можно аппроксимировать следующими выражениями

$$D_0(r) = \frac{\nu}{\lambda_0^2} \left[r - R_1 - R_2 + \frac{(R_1 + R_2) R_1 R_2}{R_1^2 + R_2^2 - R_1 R_2} \right]^2 \quad (5.38)$$

$$H(r) = \left[1 + \frac{1}{r - R_1 - R_2} \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right]^{-1} \quad (5.39)$$

Силы молекулярного взаимодействия частиц вследствие их короткодействия можно учитывать в (5.36) только на малых расстояниях и вычислять по формуле, приведенной в работе [117]

$$F_m = -\frac{A}{6} \cdot \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)(r - R_1 - R_2)^2} \quad (5.40)$$

При $R_1 \gg R_2$ формула (5.40) будет выражать силу молекулярного взаимодействия частиц, используемую в работе [106] при расчете сечения захвата (см. 5.18).

Пока частицы находятся далеко друг от друга и их гидродинамическим взаимодействием можно пренебречь, будем считать, что частицы R_2 движутся под действием силы F_m по закону Стокса и $h=6\pi R_2$. При сближении частиц сила гидродинамического взаимодействия между ними растет обратно пропорционально расстоянию между их поверхностями. Анализ работ, в которых рассматривалось движение двух сфер вдоль линии, соединяющей их центры [109—112], показывает, что для определения величины h с точностью до 5% можно использовать соотношение

$$h = 6\pi \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left[1 + \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)(r - R_1 - R_2)} \right] \quad (5.41)$$

Подставляя (5.37)—(5.42) в (5.36) и переходя к безразмерным переменным, получим следующее выражение для вычисления множителя в (5.36)

$$\varphi = \frac{\lambda_0^2}{\nu(R_1 + R_2)^3} \int_0^{\infty} \frac{(x+a)^2}{x^2(x+b)^2(x+1)^2} \exp \left[-\frac{\lambda_0^2 A}{36\pi\nu^2(R_1 + R_2)^3} \times \int_x^{\infty} \frac{(z+a) dz}{z^3(z+b)^2} \right] dx \quad (5.42)$$

$$a = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2}, \quad b = \frac{R_1 R_2}{R_1^2 - R_1 R_2 + R_2^2}, \quad x = \frac{r}{R_1 + R_2}$$

Интеграл в показателе экспоненты вычисляется, и его можно записать в виде

$$\int_x^{\infty} \frac{z+x}{z^3(z+b)^2} dz = \frac{a}{2x^2(x+b)b} - \frac{1}{2b} \left(3 \frac{a}{b} - 2 \right) \times \\ \times \left[\frac{1}{x(x+b)} + \frac{2}{b(x+b)} - \frac{2}{b^2} \ln \frac{x+b}{x} \right] \quad (5.43)$$

При условии $x \ll b$, которое эквивалентно предположению, что основной эффект от гидродинамического торможения для сближающихся частиц проявляется только на малых (по сравнению с радиусом меньшей частицы) расстояниях, можно ограничиться первым членом в правой части (5.43) и записать его в виде

$$\int_x^{\infty} \frac{z+a}{z^3(z+b)^2} dz = \frac{a}{2x^2b^2} + o\left(\frac{1}{x}\right) \quad (5.44)$$

Подставляя (5.44) в (5.42) и также учитывая условие $x \ll b$, получим

$$\varphi_m = \frac{\lambda_0^2}{v(R_1+R_2)^3} \int_0^{\infty} \frac{a_2}{x^2b^2} \exp\left\{-S_m \frac{a}{2x^2b^2}\right\} dx \\ S_m = \frac{A\lambda_0^2}{36\pi\rho v^2(R_1+R_2)^3}$$

или после вычисления интеграла в правой части

$$\varphi_m = \frac{\lambda_0^2}{vS_m^2} \cdot \frac{(R_1^2+R_2^2-R_1R_2)(R_1R_2)^{1/2}}{(R_1+R_2)^6} \quad (5.45)$$

Подставляя (5.45) в (5.36), получаем следующее выражение для потока частиц радиуса R_2 , направленного на частицу радиуса R_1

$$J(R_1, R_2) = 4\pi n_0 S_m^{1/2} \frac{v}{\lambda_0^2} \cdot \frac{(R_1+R_2)^6}{(R_1^2+R_2^2-R_1R_2)(R_1R_2)^{1/2}} \quad (5.46)$$

Можно показать, что предположение $x \ll b$, при котором были проведены вычисления, выполняется только для частиц, мало различающихся по размерам.

Полагая в (5.16) концентрацию частиц, равной единице, и переходя к их объемам, получим выражение для асимптотического поведения ядра коалесценции в турбулентном потоке в области близких по размерам частиц

$$K_1(V, \omega) = 3\bar{S}_m^{1/2} \frac{v}{\lambda_0^{1/2}} \cdot \frac{(V^{1/3} + \omega^{1/3})^{3/2}}{[V^{2/3} + \omega^{2/3} - (V\omega)^{1/3}](V\omega)^{1/6}} \quad (5.47) \\ \bar{S}_m = \frac{A}{27\rho v^2 \lambda_0}, \quad V^{1/3} \approx W^{1/3}$$

Таблица 5.1*

	R_1/R_2	S_m						
		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
$S_3=0$	1	1815	612,9	200,3	64,31	20,49	9,238	7,923
	2	1424	482,3	158,4	51,02	16,25	6,017	4,539
	5	1005	338,9	112,5	36,56	11,70	3,727	1,691
	10	968	327,9	110,5	36,33	11,71	3,734	1,299
	20	1016	353,8	123,8	41,60	13,61	4,370	1,403
	50	1094	399,7	148,6	53,62	18,39	6,054	1,946
	100	1134	426,2	165,9	63,65	23,18	7,953	2,610

* Все значения таблицы умножены на 10^4 .

Степень однородности этого ядра $\eta=0,5$. В сечении $V+\omega=Z$ его можно записать в виде

$$K_1 = 3\bar{S}_m^{1/2} \frac{v}{\lambda_0^{1/2}} z^{1/2} \frac{[m^{1/3} + (1-m)^{1/3}]^{3/2}}{[m^{2/3}(1-m)^{2/3} + m^{1/3}(1-m)^{1/3}] m^{1/6}(1-m)^{1/6}} \quad (5.48)$$

Проводя аналогичные вычисления с учетом условия $x \gg b$, которое справедливо для области сильно различающихся по размерам частиц, получим следующее выражение для описания поведения ядра коалесценции в этой области

$$K_2(V, \omega) = \frac{3^{2/3}}{\Gamma\left(\frac{4}{3}\right)} \bar{S}_m^{1/2} \frac{v}{\lambda_0} (V^{1/3} + \omega^{1/3})^2 \\ V^{1/3} \gg \omega^{1/3} \text{ или } \omega^{1/3} \gg V^{1/3} \quad (5.49)$$

Степень однородности правой части (5.49) $\eta=2/3$. В сечении $V+\omega$ (5.49) можно записать в виде

$$K_2 = \frac{3^{2/3}}{\Gamma\left(\frac{4}{3}\right)} \bar{S}_m^{1/2} \frac{v}{\lambda_0} Z^{2/3} [m^{1/3} + (1-m)^{1/3}]^2 \quad (5.50)$$

Характерной особенностью ядра K_2 является его ограниченность при стремлении размера одной из частиц к нулю. Это важное и довольно очевидное с физической точки зрения свойство не выполнялось для ядра градиентной коалесценции, рассмотренной в предыдущем разделе.

Для определения закона изменения ядра коалесценции в области отношений размеров частиц, расположенной между областями определения полученных асимптотик, интеграл в правой части (5.42) был прочитан численно. Результаты вычислений приведены в табл. 5.1.

Аналитическую аппроксимацию результатов численных расчетов можно получить путем «стыковки» асимптотических описаний ядра (5.48) и (5.50) в сечении $z=V+\omega$. Вводя весовую функцию $\alpha(m)$, запишем аппроксимирующее выражение для ядра в виде

$$K = \alpha(m) K_1 + [1 - \alpha(m)] K_2 \quad (5.51)$$

$\alpha(m)$ — функция, симметричная относительно точки $m=0,5$, определенная и дифференцируемая на отрезке $[0,1]$, монотонно убывающая на отрезке $[0,5-1]$ и принимающая значения $\alpha(0,5)=1$, $\alpha(1)=0$. Функции, удовлетворяющие всем этим требованиям, можно найти в классе тригонометрических функций, в классе полиномов и т. д. Их примерами служат следующие одно- и двухпараметрические семейства

$$\begin{aligned} \text{а) } \alpha(m) &= [\sin(m\pi)]^k \\ \text{б) } \alpha(m) &= [1 - (2m - 1)^{2k}]^\beta \end{aligned} \quad (5.52)$$

Параметры k и β нужно подбирать из условия лучшего, в некотором смысле, сопряжения аппроксимирующего выражения с цифровым материалом. Так, для весовой функции типа б) удовлетворительная аппроксимация расчетных значений получается при $k=1$, $\beta=1$. Подставляя значение $\alpha(m)$ с этими коэффициентами в (5.51), получим

$$K(V, \omega) = \frac{4V\omega}{(V+\omega)^2} K_1(V, \omega) + \frac{(V-\omega)^2}{(V+\omega)^2} K_2(V, \omega) \quad (5.53)$$

В отличие от ранее рассмотренных, это ядро не обладает свойством однородности. Физически это означает, что влияние межмолекулярных и гидродинамических сил на процесс сближения частиц зависит от их размеров.

Если силы взаимодействия между частицами не являются центрально-симметричными, как например, во внешнем электрическом поле, диффузионное уравнение уже не удастся решить аналитически. Однако если пренебречь угловыми составляющими диффузионного потока, то из уравнения (5.35) в сферической системе координат можно найти плотность потока на единицу поверхности частицы R_1 . Интегрируя найденную величину, по полярному углу, от которого зависит величина радиальной составляющей силы, получим следующее выражение для полного потока частиц R_2 на частицу R_1

$$J(R_1, R_2) = 4\pi n_0 \int_0^\pi \varphi_3^{-1} \sin \theta d\theta \quad (5.54)$$

$$\varphi_3 = \int_{R_1+R_2}^{\infty} \frac{dz}{r^2(D)r} \exp \left[- \int_r^{\infty} \frac{F(\rho, \theta) d\rho}{h(\rho)D(\rho)} \right]$$

или в безразмерных переменных

$$\begin{aligned} \varphi_3 = \frac{\lambda_0^2}{v(R_1+R_2)^3} \int_0^{\infty} \frac{(x+a)^2}{x^3(x+b)^2(1+x)^2} \exp \left\{ - \int_x^{\infty} \left[S_m \frac{z+a}{z^3(z+b)^3} + \right. \right. \\ \left. \left. + S_3 \frac{z+a}{z(z+b)^2} \cdot \frac{R_2}{R_1} (F_1 \cos^2 \theta - F_2 \sin^2 \theta) \right] dz \right\} dx \end{aligned} \quad (5.55)$$

$$S_3 = \frac{\epsilon E^2 \lambda_0^2}{6\pi v^2}$$



Рис. 5.6. Методы решения кинетического уравнения.

Здесь F_1 и F_2 — коэффициенты векторных составляющих электрического взаимодействия частиц. Интеграл в правой части (5.55) рассчитывался численно при различных значениях S_m , S_3 и R_1/R_2 . Результаты расчетов приведены в табл. 5.2. При $S_3=0$ формула (5.55) переходит в (5.42).

В области $S_3 > 0,5$ аппроксимация численных результатов позволяет получить следующее выражение для ядра коалесценции

$$K(V, \omega) = S_3^{0,8} V^{0,5} \omega^{0,5} \quad (5.56)$$

Степень однородности этого ядра $\eta=1$.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ. ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ

По своей структуре кинетическое уравнение является интегрально-дифференциальным уравнением, для которого пока не существует общего аналитического решения. Имеющиеся частные методы решения кинетического уравнения при $v=0$ для упрощения их анализа разделим на группы (рис. 5.6).

Точные методы решений, как показано на рис. 5.6, образуют небольшую группу и основаны на применении интегральных преобразований Лапласа. Класс точных решений анализировался в работе [115], где было показано, что такие решения могут быть получены только для ядер, являющихся линейными функциями по каждому из аргументов в отдельности, т. е. для ядер вида

$$K_0(V, \omega) = G_0 \quad (5.57)$$

Таблица 5.2*.

S ₉	R ₁ /R ₂	S _m						
		10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
0,1	1	189,3	65,9	24,1	10,26	5,93	4,24	4,17
	2	145,2	51,8	19,5	8,72	5,37	3,95	3,85
	5	102,0	35,9	13,6	6,07	3,73	2,78	2,67
	10	97,3	33,7	12,2	4,94	2,60	1,77	1,62
	20	101,6	35,6	12,8	4,73	2,03	1,82	1,82
	50	109,2	40,00	14,9	5,49	2,06	0,851	0,472
0,2	100	113,2	42,6	16,6	6,39	2,38	0,89	0,48
	1	189,2	69,9	28,7	15,29	11,42	9,29	9,27
	2	148,3	55,6	23,8	13,48	10,57	8,83	8,79
	5	103,7	38,1	16,2	9,09	7,08	6,09	6,04
	10	98,01	34,7	13,4	6,45	4,34	3,61	3,54
	20	101,9	36,0	13,2	5,35	2,79	3,39	3,39
0,5	50	109,3	40,0	15,0	5,64	2,24	1,12	0,79
	100	113,3	42,6	16,6	6,42	2,43	0,99	0,62
	1	206,8	85,6	45,8	34,15	31,28	27,5	27,5
	2	157,8	68,2	38,8	30,31	28,25	25,7	25,7
	5	108,9	45,1	24,9	19,10	17,69	16,8	16,8
	10	100,1	37,7	17,4	11,29	9,69	9,34	9,32
1	20	102,6	37,0	14,7	7,25	5,10	7,23	7,23
	50	110,1	40,2	15,3	6,05	2,86	1,95	1,77
	100	113,4	42,6	16,7	6,53	2,62	1,29	0,94
	1	224,1	112,5	78,1	68,96	66,93	61,3	61,3
	2	174,0	90,6	65,6	59,27	59,27	55,1	55,1
	5	117,7	57,3	39,9	35,49	34,50	34,1	34,1
2	10	103,8	42,9	24,2	19,20	18,01	17,7	16,2
	20	103,9	38,8	17,1	10,42	8,68	8,75	8,72
	50	110,4	40,7	15,8	6,77	3,89	3,24	3,15
	100	114,0	42,9	17,0	7,06	3,49	1,76	1,46
	1	270,9	172,2	145,2	138,80	138,80	130	130
	2	205,9	134,6	115,7	111,40	111,40	110	110
5	5	135,8	81,8	68,1	65,05	64,41	65	65
	10	111,3	53,5	37,5	33,65	32,81	36,1	35,4
	20	106,4	42,4	22,0	16,37	15,04	15,7	15,7
	50	110,7	41,4	16,7	8,17	5,83	5,44	5,40
	100	114,1	42,9	17,0	7,06	3,49	2,45	2,21
	1	412,2	341,7	325,5	322,1	321,4	315	315
5	2	288,8	239,8	229,1	229,0	229,0	238	238
	5	188,6	147,6	139,1	137,5	137,2	140	140
	10	133,9	84,2	72,6	70,23	69,82	72,3	72,3
	20	114,2	53,4	36,1	32,07	31,22	3,29	3,29
	50	112,1	43,4	19,6	12,20	10,7	10,6	10,6
	100	115,0	43,5	17,8	8,10	4,98	4,20	4,03

* Все значения таблицы умножены на 10³.

$$K_1(V, \omega) = G_1(V + \omega) \quad (5.58)$$

$$K_2(V, \omega) = G_2V\omega \quad (5.59)$$

Применяя преобразование Лапласа к кинетическому уравнению с ядрами (5.57—5.59), получим следующие уравнения в области изобра-

жений

$$\frac{dL_0}{d\tau} = \frac{1}{2} L_0^2 - NL_0, \quad \tau_0 = G_0t \quad (5.60)$$

$$\frac{dL_1}{d\tau_1} = \frac{dL_1}{dp} (N - L_1) - WL_1, \quad \tau_1 = G_1t \quad (5.61)$$

$$\frac{dL_2}{d\tau_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{dL}{dp} \right)^2 + W \frac{dL_2}{dp}, \quad \tau_2 = G_2t \quad (5.62)$$

где N — суммарное количество частиц, а W — количество дисперсной фазы в единицу объема.

Если учесть предельные свойства преобразования Лапласа

$$\lim_{p \rightarrow 0} L(p, \tau) = N(\tau), \quad \lim_{p \rightarrow 0} \frac{\partial L}{\partial \tau} = -W \quad (5.63)$$

то из (5.60), (5.61) и (5.62) можно получить следующие уравнения для общего числа частиц в коалесцирующей системе с соответствующими ядрами (5.57), (5.58) и (5.59)

$$\frac{dN}{d\tau_0} = -\frac{1}{2} N^2, \quad N(\tau_0) = \frac{N_0}{1 + \frac{1}{2} N_0 \tau_0} \quad (5.64)$$

$$\frac{dN}{d\tau_1} = -WN, \quad N(\tau_1) = N_0 e^{-W\tau_1} \quad (5.65)$$

$$\frac{dN}{d\tau_2} = -\frac{1}{2} W^2, \quad N(\tau_2) = N_0 - \frac{1}{2} W^2 \tau_2 \quad (5.66)$$

Из этих решений видно, что случай коалесценции с ядром (5.59), которому соответствует уравнение (5.66), вряд ли можно считать физически реализуемым, так как решение этого уравнения не обладает свойствами непрерывности во времени. При $\tau_2 > 2N_0/W$ число частиц в системе становится отрицательным.

Обзор существующих аналитических методов решений кинетических уравнений можно найти в работах [102, 115].

В [102] рассмотрены решения кинетических уравнений с ядрами (5.57), (5.58), (5.59) и с начальными распределениями в виде гамма-распределения

$$n(V, 0) = N_0 \frac{\lambda^\beta}{\Gamma(\beta)} V^{\beta-1} e^{-\lambda V} \quad (5.67)$$

а также в виде дельта-функции и П-образного распределения.

Для начального условия (5.67) общее решение кинетического уравнения с ядром (5.57) можно записать в виде

$$\frac{W}{N_0} n(X, \xi_0) = \frac{(1 - \xi_0)^2}{\xi_0 X} e^{-\beta X} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\beta^k \beta}{\Gamma(\beta k)} \xi_0^k X^{\beta k} \quad (5.68)$$

где

$$X = N_0 \frac{V}{W}, \quad \xi_0 = 1 - \frac{N(\tau_0)}{N_0}$$

Для случая $\beta=1$, соответствующего экспоненциальному начальному распределению, (5.68) преобразуется к виду

$$\frac{W}{N_0} n(X, \xi_0) = (1 - \xi_0)^2 e^{-X(1 - \xi_0)} \quad (5.69)$$

Для $\beta=2$ выражение (5.68) также можно упростить и записать в виде

$$\frac{W}{N_0} n(X, \xi_0) = \frac{2(1 - \xi_0)}{\xi_0^{3/2}} e^{-2X} \operatorname{sh}(2X\xi_0^{1/2}) \quad (5.70)$$

Величина $N(\tau)$ в (5.68), (5.69) и (5.70) определена равенством (5.64).

Общее решение для случая ядра (5.58) с начальным условием (5.67) записывается в виде

$$\begin{aligned} \frac{W}{N_0} n(X, \xi_1) &= (1 - \xi_1) e^{-(\xi_1 + \beta)X} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\beta^{\beta(k+1)}}{(k+1)! \Gamma[(k+1)\beta]} \times \\ &\times \xi_1 X^{\beta-1+k(\beta+1)} \quad (5.71) \\ \xi_1 &= 1 - N(\tau_1)/N_0 \end{aligned}$$

При $\beta=1$, т. е. для случая экспоненциального начального распределения, получаем

$$\frac{W}{N_0} n(X, \xi_1) = \frac{(1 - \xi_1) e^{-(1 + \xi_1)X}}{X\xi_1^{1/2}} I_1(2X\xi_1^{1/2}) \quad (5.72)$$

Величина $N(\tau_1)$ в (5.71) и (5.72) определяется уравнением (5.65).

Когда полное знание закона распределения частиц не требуется, а достаточно лишь информации о поведении во времени его целых моментов, задача существенно упрощается. Для ядер вида (5.57)–(5.59) она решается точно. Рассмотрим только физически реализуемые ядра (5.57) и (5.58).

Умножая правую и левую части исходного кинетического уравнения на V^i и интегрируя по этой переменной, получим следующую систему уравнений относительно моментов m_i

$$\begin{aligned} \dot{m}_i &= \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K(V, \omega) \left[\frac{1}{2} (V + \omega)^i - V^i \right] n(V, t) n(\omega, t) d\omega dV \quad (5.73) \\ m_i &= \int_0^{\infty} V^i n(V, t) dV, \quad i = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Нулевой момент равен общему числу частиц, а первый момент — суммарному объему частиц, т. е. количеству дисперсной фазы. Подставляя в (5.73) конкретное ядро, получим систему дифференциальных уравнений, предназначенных для определения моментов распределения числа частиц по размерам. Так, для ядер (5.57) и (5.58) соответ-

венно первые четыре моментных уравнения запишутся в виде

$$\dot{m}_0 = -\frac{1}{2} m_0^2, \quad \dot{m}_1 = 0, \quad \dot{m}_2 = m_1^2, \quad (5.74)$$

$$\dot{m}_3 = 3m_2 m_1, \quad \dot{m}_4 = 4m_3 m_1 + 3m_2^2$$

$$\dot{m}_0 = -m_1 m_0, \quad \dot{m}_1 = 0, \quad \dot{m}_2 = 2m_1 m_2, \quad (5.75)$$

$$\dot{m}_3 = 3(m_1 m_3 + m_2^2), \quad \dot{m}_4 = 4m_1 m_4 + 10m_2 m_3$$

Точкой здесь обозначены производные по $\tau_i = G_i t$ ($i=0,1$). Решения для нулевых моментов в этих системах мы уже получили [см. (5.64) и (5.65)]. Для первого момента всегда $m_1 = W$, а для второго, третьего и четвертого моментов решения системы (5.74) можно записать в виде

$$m_2 = W^2 \tau_0 + m_2(0), \quad m_3 = \frac{3}{2} W^3 \tau_0^2 + 3W m_2(0) \tau_0 + m_3(0)$$

$$m_4 = 3W^4 \tau_0^3 + 9m_2(0) W^2 \tau_0^2 + [4m_3(0) W + 3m_2^2(0)] \tau_0 + m_4(0) \quad (5.76)$$

В (5.75) величина $\tau_1 = G_1 t$, в отличие от $\tau_0 = G_0 t$, размерная. Вводя вместо нее безразмерное время $\tau = G_1 W t$, решения этой системы можно записать в виде

$$\begin{aligned} m_2 &= m_2(0) e^{2\tau}, \quad m_3 = e^{3\tau} \left[\frac{m_2^2(0)}{W} (e^\tau - 1) + m_3(0) \right] \\ m_4 &= e^{4\tau} \left\{ 10 \frac{m_2(0)}{W} (e^\tau - 1) \left[\frac{m_2^2(0)}{W} (e^\tau - 1) + m_3(0) \right] + m_4(0) \right\} \quad (5.77) \end{aligned}$$

НАЧАЛЬНАЯ АСИМПТОТИКА

Численные и параметрические методы

Приближенные методы решения кинетического уравнения можно разделить на две основные группы: методы для получения начальной асимптотики и методы для получения дальних асимптотик решений. Первую группу методов еще можно разделить на численные и параметрические методы.

Поскольку в настоящее время отсутствуют аналитические методы исследования кинетических уравнений с произвольными ядрами, многие исследования последних лет были посвящены разработке численных методов решения этих уравнений. Основное — внимание в этих работах уделялось построению рациональных схем счета, оценке точности получаемых результатов и разработке общих методик анализа результатов. Обзор по имеющимся реализациям численных методов можно найти в работе [102].

Основная трудность при использовании численных методов возникает из-за большого диапазона изменения частиц по размерам. Так, если рассматриваемый спектр радиусов частиц изменяется в пределах

1—100 мкм, то их объемы, по которым производится интегрирование правой части уравнения, будут изменяться в пределах 1—10⁶. Такой широкий диапазон изменения затрудняет выбор рационального шага интегрирования. Для сужения области интегрирования применяют различные преобразования переменных и неравномерные сетки интегрирования [102].

Несмотря на кажущуюся универсальность численных методов применяют их сравнительно редко. Это связано, по-видимому, с большой затратой времени на счет, так как приходится решать двумерную задачу. Численные решения кинетического уравнения для конкретных ядер приводятся в работах [102, 116].

Параметрические методы основаны на предположении, что решение (точное или приближенное) принадлежит некоторому априори известному параметрическому классу функций

$$n(V, t) \in \{ | V, \alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_k(t) \} \quad (5.78)$$

Для определения параметров $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ исходное кинетическое уравнение заменяют системой моментных уравнений (5.73), число которых совпадает с числом неизвестных коэффициентов.

Параметрические методы являются приближенными, и значительная доля успешного их применения заключена в разумном выборе исходного класса функций, в котором отыскивается приближение. В принципе мы всегда можем представить $n(V, t)$ в виде бесконечного ряда по какой-либо полной системе функций $\varphi_i(V)$

$$n(V, t) = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i(t) \varphi_i(V) \quad (5.79)$$

и использовать это разложение как параметрическое представление $n(V, t)$ с параметрами $\alpha_0, \alpha_1, \dots$

Подставляя (5.79) в (5.73), получим следующую систему уравнений для определения параметров

$$\frac{dm_i}{dt} = \sum_{k, l=0}^{\infty} \alpha_k \alpha_l \beta_{kli}, \quad \beta_{kli} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K(V, \omega) \left[\frac{1}{2} (V + \omega)^i - V^i \right] \times \\ \times \varphi_k(V) \varphi_l(\omega) d\omega dV \quad (5.80)$$

$$m_i = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_j \int_0^{\infty} V^i \varphi_j(V) dV$$

Если система функций $\varphi_i(V)$ ортогональна и нормирована на единицу, то домножая исходное кинетическое уравнение не на V^i с целью получения уравнения для i -го момента, а на $\varphi_i(V)$ после интегрирования по V , получим

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = \sum_{k, l=0}^{\infty} \alpha_k \alpha_l \beta_{kli}^* \\ \beta_{kli}^* = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K(V, \omega) \left[\frac{1}{2} \varphi_i(V + \omega) - \varphi_i(V) \right] \varphi_k(V) \varphi_l(\omega) dV d\omega \quad (5.81)$$

В отличие от (5.80), эта система уравнений уже решена относительно производных. Коэффициенты β_{kli} и β_{kli}^* в (5.80) и (5.81) постоянны и определяются перед решением систем. Полученные уравнения нелинейны и могут быть решены только при помощи вычислительной техники.

Ряды типа (5.79) для аппроксимации решения кинетического уравнения применяли в работах [116, 117]. В качестве функций $\varphi_i(V)$ использовали полиномы Лагерра и были рассчитаны три первых коэффициента. Определение последующих коэффициентов было затруднено из-за большого объема и громоздкости необходимых вычислений. Большая часть вычислений приходится на определение коэффициентов β_{kli} , что существенно зависит от выбора базисных функций (5.79).

Разложение (5.79) является аналогом рядов, получаемых при разложении плотностей распределения по ортогональным функциям. Это станет еще более очевидным, если (5.79) записать в виде

$$n(V, t) = N(t) p(V, t) = N(t) \sum_{i=0}^{\infty} \beta_i(t) \varphi_i(V) \quad (5.82)$$

Сумма в правой части является разложением плотности распределения $p(V, t)$. Подобные представления плотностей распределений известны давно. В качестве базисных функций $\varphi_i(V)$ используют ряды Фурье, полиномы Эрмита*, полиномы Чебышева, полиномы Лагерра и т. д. [118, 119].

Исследования точности аппроксимации, которой можно достигнуть при использовании конечного числа членов ряда Грамма — Шарлье [118], показали следующее.

1. Эти ряды могут вести себя нерегулярно, — сумма k членов может дать худшее приближение, чем сумма $(k-1)$ членов.

2. Сумма конечного числа членов этих рядов может привести к отрицательным значениям плотности вероятностей, особенно на «хвостах» распределения.

3. Использование конечных рядов дает удовлетворительные результаты только в случае оценки распределений с умеренной асимметрией ($\mu_3^2/\mu_2^3 < 0,7$).

Все это является довольно серьезным препятствием при применении начальных членов ряда (5.79) для аппроксимации решения кинетического уравнения, когда требуется определить не только моменты некоей плотности распределения, но и само распределение.

Для некоторых ядер специальных видов параметрический метод решения может несколько видоизменяться. К ним относятся ядра вида

$$K(V, \omega) = G \sum_{j=0}^n \alpha_j (V^{\eta-\delta_j} \omega^{\delta_j} + V^{\delta_j} \omega^{\eta-\delta_j}) \quad (5.83)$$

* Разложения по полиномам Эрмита иногда называют расложениями (или рядами) Грамма — Шарлье.

Подставляя (6.77) в (6.67), получим

$$\begin{aligned} \dot{m}_0 &= -G \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_j m_{\eta-\delta_j} m_{\delta_j}, \quad \dot{m}_1 = 0 \\ \dot{m}_i &= \frac{G}{2} \sum_{j=0}^n \alpha_j \sum_{k=1}^{i-1} C_i^k (m_{\eta+\delta_j+i-k} m_{\delta_j+k} + m_{\eta-\delta_j+k} m_{\delta_j+i-k}) \quad (5.84) \\ m_{\delta} &= \int_0^{\infty} V^{\delta} n(V, t) dV, \quad t = 2, 3, \dots \end{aligned}$$

Рассмотренные выше ядра (5.57—5.59), для которых система уравнений моментов допускает точные решения, относятся к этому же классу ядер.

В общем случае для решения системы (5.84) ее нужно дополнить уравнениями связей между моментами. Необходимая информация для этого может быть получена на основе параметрических и непараметрических предположений о виде этих связей.

Параметрические методы базируются на условии, что искомое распределение принадлежит определенному параметрическому классу. Для уменьшения числа отыскиваемых параметров в качестве такого класса может выбираться совокупность известных распределений, включающий начальное. Пусть, например, исходная плотность распределения частиц по объемам является гамма-распределением. И пусть на начальном участке процесса коалесценции $p(V, t)$ остается в двухпараметрическом классе этого распределения, которое задается равенством

$$p(V, t) = \frac{\lambda^{\beta}}{\Gamma(\beta)} V^{\beta-1} e^{-\lambda V}, \quad \lambda = \lambda(t), \quad \beta = \beta(t) \quad (5.85)$$

Тогда $n(V, t)$ запишется в виде

$$n(V, t) = \frac{W}{\bar{V}} p(V, t), \quad \bar{V} = \int_0^{\infty} V p(V, t) dV = \frac{\beta}{\lambda} \quad (5.86)$$

Определяя моменты $n(V, t)$, получим

$$\begin{aligned} m_0 &= W \frac{\lambda}{\beta}, \quad m_{\alpha} = m_0 \frac{1}{\lambda^{\alpha}} \cdot \frac{\Gamma(\beta + \alpha)}{\Gamma(\beta)} \\ m_{1+\alpha} &= m_0 \frac{(\beta + \alpha) \Gamma(\beta + \alpha)}{\lambda^{\alpha+1}}, \quad m_2 = m_0 \frac{(\beta + 1) \beta}{\lambda^2} \quad (5.87) \end{aligned}$$

При больших значениях β и $\beta \gg \alpha$, раскрывая гамма-функцию по асимптотическому разложению Стирлинга, получим

$$\frac{\Gamma(\beta + \alpha)}{\Gamma(\beta)} \approx A \beta^{\alpha}, \quad A = (1 + \alpha) e^{-\alpha} \quad (5.88)$$

что позволяет переписать второе и третье равенства в уравнении (5.87) в виде

$$m_{\alpha} = A m_0^{1-\alpha} W^{\alpha}, \quad m^{1+\alpha} + A m_0^{-\alpha} W^{1+\alpha} \quad (5.89)$$

Рассмотрим случай, когда ядро коалесценции определяется равенством

$$K(V, \omega) = G V^{\eta/2} \omega^{\eta/2} \quad (5.90)$$

Соответствующие ему первые три уравнения для моментов запишем в виде

$$\dot{m}_0 = -\frac{1}{2} G m_{\eta/2}^2, \quad \dot{m}_1 = 0, \quad \dot{m}_2 = 2G m_{1+\eta/2}^2 \quad (5.91)$$

Учитывая (5.89), получим

$$\dot{m}_0 = -\frac{1}{2} G A^2 W^{\eta} m_0^2 \left(1 + \frac{\eta}{2}\right), \quad m_1 = W, \quad \dot{m}_2 = 2G A^2 W^2 \left(1 + \frac{\eta}{2}\right) m_0^{\eta} \quad (5.92)$$

Дополняя эти уравнения начальными условиями и решая их, получим

$$\frac{m_0(\tau)}{m_0(0)} = \left[1 + \frac{1-\eta}{2} m_0^{1-\eta(0)} \tau\right]^{\frac{1}{\eta-1}}, \quad \tau = G A^2 W^{\eta} t \quad (5.93)$$

$$\frac{m_2(\tau)}{m_2(0)} = 1 + \frac{2W^2}{m_2(0) m_0(0)} \left[\frac{m_0(0)}{m_0(\tau)} - 1\right] \quad (5.94)$$

Непараметрический метод

Параметрические методы доопределения системы моментных уравнений, несмотря на их очевидность и логическую простоту получения решения, базируются на очень сильном исходном предположении о виде искомого распределения, которое обычно выбирают «волевым» методом. Этот недостаток в выборе доопределяющих уравнений можно устранить, если воспользоваться непараметрическими методами интерполяции для определения связей между целыми и дробными моментами на интервале времени $[t, t + \Delta t]$. Переходя к безразмерным переменным при помощи нормирования всех моментов на их значения в начале интервала, запишем интерполяционный полином Лагранжа [120] для оценки дробного момента $m_{i+\alpha}$ в виде

$$m_{i+\alpha}(\xi) = \sum_{j+k}^{k+n} L_j^{(n)}(x) \tilde{m}_j(\xi), \quad k \leq i \leq k+n, \quad \tilde{m}_j(\xi) = \frac{m_j(\xi)}{m_j(t)} \quad (5.95)$$

$$\xi \in [t, t + \Delta t], \quad L_j^{(n)}(x) = \frac{1}{n!} \prod_{n+1} \frac{(-1)^{n-j} C_n^j}{x-j}$$

$$C_n^j = \frac{n!}{j!(n-j)!}, \quad \prod_{n+1}(x) = x(x-1)(x-2)\dots(x-n)$$

Эта формула дает нулевую ошибку в приближении дробного момента при $\xi=t$, когда все $\tilde{m}_j(\xi)$, тождественно равны единице. С увеличением времени ошибка интерполяции будет нарастать. Разложим мо-

менты $\tilde{m}_{i+\alpha}(\xi)$ и $\tilde{m}_j(\xi)$ в (5.95) в ряд по ξ в окрестности точки $\xi=t$. Считая Δt малой величиной и ограничиваясь первыми двумя членами разложения, получим

$$1 + \frac{1}{m_{i+\alpha}(t)} \cdot \frac{dm_{i+\alpha}(\xi)}{d\xi} \Big|_{\xi=t} (\xi-t) = \sum_{j=k}^{k+n} L_j^{(n)}(x) \frac{1}{m_j(t)} \cdot \frac{dm_j(\xi)}{d\xi} \Big|_{\xi=t} (\xi-t) + \sum_{j=k}^{k+n} L_j^{(n)}(x) \quad (5.96)$$

Учитывая, что сумма коэффициентов Лагранжа равна единице и производя необходимые сокращения, преобразуем это равенство к виду

$$\frac{d}{d\xi} [\ln m_{i+\alpha}(\xi)] \Big|_{\xi=t} = \sum_{j=k}^{k+n} L_j^{(n)}(x) \frac{d}{d\xi} [\ln m_j(\xi)] \Big|_{\xi=t} \quad (5.97)$$

Интегрируя правую и левую часть этого равенства по t , получим

$$m_{i+\alpha}(t) = C \prod_{j=k}^{k+n} [m_j(t)]^{L_j^{(n)}} \quad (5.98)$$

где C — постоянная интегрирования. Из условия равенства оценки и истинной величины момента при целых значениях α получаем $C=1$. Если дополнительно к этому условию при определении C потребовать равенства оценки и истинного значения момента $m_{i+\alpha}(t)$ при любых α в момент времени $t=0$, то из (5.98) получим

$$C = \prod_{j=k}^{k+n} [m_j(0)]^{-L_j^{(n)}} \cdot m_{i+\alpha}(0) \quad (5.99)$$

С учетом (5.99) интерполяционную формулу (5.98) можно записать

$$m_{i+\alpha}'(t) = \prod_{j=k}^{k+n} [m_j'(t)]^{L_j^{(n)}}, \quad k \leq t \leq k+n, \quad m_j'(t) = \frac{m_j(t)}{m_j(0)} \quad (5.100)$$

Эта интерполяционная формула справедлива для любого времени t и обеспечивает совпадение оценки интерполируемого момента с его точным значением в любой момент времени, если α — целое, и при $t=0$, если α — дробное.

Для оценки точности интерполяции по формуле (5.98) при $C=1$ были проведены численные расчеты дробных моментов гамма- и логнормальных распределений. Результаты показали, что относительная ошибка интерполяции монотонно убывает с ростом n , при увеличении дисперсии исследуемых распределений, а также при увеличении порядка интерполируемого момента. Так, относительная ошибка интерполяции при $C=1$ для начальных дробных моментов гамма-распределения зависит только от его параметра формы β и имеет порядок 10^{-2} при $\beta=2$ и порядок 10^{-3} при $\beta=5$. С ростом β ошибка монотонно убывает.

Знак ошибки в общем случае зависит от β и порядка интерполируемого момента. Для логнормального распределения соотношение (5.100) становится точным при $n \geq 2$.

ДАЛЬНЯЯ АСИМПТОТИКА. АВТОМОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ

При достаточно большом времени коалесценции распределение размеров частиц перестает зависеть от их начального распределения*, т. е. как бы «забывает свое прошлое», и может быть описано некоторой универсальной функцией, вид которой определяется только ядром коалесценции. Известны два подхода к построению таких универсальных функций. Первый из них, который в работе [115] называется традиционным, основан на предположении, что $n(V, t)$ при больших временах представимо в виде

$$n(V, t) = N^2(t) f_1[VN(t)] \quad (5.101)$$

Функция f_1 определяется из решения кинетического уравнения при подстановке в него $n(V, t)$ в виде (5.101). Второй подход, развитаемый в работах А. Лушников, базируется на представлении $n(V, t)$ в виде

$$n(V, t) = t^{-\frac{2}{1-\eta}} f_2 \left(Vt^{-\frac{1}{1-\eta}} \right) \quad (5.102)$$

В работе [121] утверждается, что при обоих подходах получаются одинаковые результаты, если только $f_2(x)$ не имеет неинтегрируемой особенности при $x \rightarrow 0$. Если такая особенность есть, то асимптотическое закона вида (5.101) просто не существует.

Проанализируем эти два подхода с целью выявления различия между ними. Поскольку оба они основаны на предположении автомодельного, т. е. подобного во времени изменения распределения количества частиц $n(V, t)$, соответствующая ему плотность распределения частиц по размерам $p(V, t)$ также будет автомодельной и ее можно записать в виде

$$p(V, t) = \frac{1}{h(t)} p \left[\frac{V}{h(t)} \right] \quad (5.103)$$

где $h(t)$ — функция подобия.

Моменты этой плотности распределения также являются автомодельными функциями и определяются равенствами

$$\mu_\gamma(t) = \mu_\gamma(0) h^\gamma(t) \quad (5.104)$$

Распределение частиц по размерам $n(V, t)$ с учетом (5.103) и (5.104) можно записать в виде

$$n(V, t) = N(0) \frac{1}{h^2(t)} p \left[\frac{V}{h(t)} \right] \quad (5.105)$$

Подставляя (5.105) в кинетическое уравнение и интегрируя по

* Предполагается, что ядро обладает степенью однородности η .

всей области определения, получим

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{1}{2} N^2(t) h^\eta(t) R, \quad R = \int_0^\infty \int_0^\infty K(V, \omega) p(V) p(\omega) d\omega dV \quad (5.106)$$

С другой стороны, величина $N(t)$ однозначно определяется средним объемом частиц и суммарным объемом дисперсной фазы W . Поэтому с учетом (5.104) можно записать следующее равенство

$$N(t) = \frac{W}{\bar{V}(t)} = \frac{W}{V(0)} h^{-1}(t) \quad \text{или} \quad \frac{dN}{dt} = -N(0) \frac{1}{h^2(t)} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (5.107)$$

Подставляя (5.107) в (5.106), получим следующее уравнение относительно $h(t)$

$$\frac{dh(t)}{dt} = B h^\eta(t), \quad B = \frac{1}{2} N(0) R \quad (5.108)$$

Полагая $h(0) = 1$, получим

$$h(t) = [(1 - \eta) Bt + 1]^{\frac{1}{1-\eta}} \quad \text{при } \eta \neq 1 \quad (5.109)$$

$$h(t) = e^{Bt} \quad \text{при } \eta = 1$$

Зная $h(t)$, можно определить зависимость от времени произвольного момента распределения на основании равенства (5.104). В частности, для изменения во времени общего числа частиц в единице объема из (5.107) получим

$$\frac{N(t)}{N(0)} = [1 + (1 - \eta) Bt]^{\frac{1}{1-\eta}} \quad \text{при } \eta \neq 1 \quad (5.110)$$

$$\frac{N(t)}{N(0)} = e^{-Bt} \quad \text{при } \eta = 1$$

В связи с тем, что мы рассматриваем дисперсные системы, в которых происходит только укрупнение частиц, число частиц во времени должно убывать и стремиться к нулю при $t \rightarrow \infty$. Из (5.110) видно, что это справедливо только при $\eta \leq 1$. При $\eta > 1$ не сохраняется положительность $N(t)$, если $t \rightarrow \infty$. Таким образом, автомодельное решение в коалесцирующей системе существует только для ядер со степенью однородности не выше единицы.

Для получения уравнения, определяющего начальную плотность распределения частиц по размерам $p(V)$, преобразуем уравнение коалесценции с учетом (5.103) и (5.109). Учтя также, что $\dot{n}(V, t) = N(t) \cdot p(V, t)$, получим следующее интегродифференциальное уравнение для определения $p(V)$

$$R \left(p + \frac{1}{2} V \frac{dp}{dV} \right) = -\frac{1}{2} \int_0^V K(V - \omega, \omega) p(V - \omega) p(\omega) d\omega +$$

$$+ p \int_0^\infty K(V, \omega) p(\omega) d\omega \quad (5.111)$$

$$R = \int_0^\infty \int_0^\infty K(V, \omega) p(V) p(\omega) d\omega dV$$

Прежде чем начать рассматривать методы решения (5.111), вернемся к предложению о виде автомодельного решения. Из сравнения (5.101) и (5.102) видно, что первый подход эквивалентен рассмотренному, а функция $f_1 [VN(t)]$ определяется равенством

$$f_1 [VN(t)] = \frac{m_0(0)}{W} p \left[\frac{V}{h(t)} \right] \quad (5.112)$$

При большом времени коалесценции, когда выполняются условия $(1 - \eta) Bt \gg 1$ и $\eta \neq 1$

$$(1 - \eta) Bt \gg 1 \quad \text{и} \quad \eta \neq 1 \quad (5.113)$$

выражение для $h(t)$ можно записать в виде

$$h(t) \approx [(1 - \eta) Bt]^{\frac{1}{1-\eta}} \quad (5.114)$$

Подставляя (5.110) в (5.97), получим для этого случая

$$n(V, t) = t^{\frac{2}{1-\eta}} [(1 - \eta) B]^{-\frac{2}{1-\eta}} N_0 p \left[\frac{V}{h(t)} \right] \quad (5.115)$$

При сравнении (5.115) и (5.102), видно, что подход Лушников к представлению автомодельного решения кинетического уравнения в виде (5.102) является частным случаем общего подхода, который реализуется при выполнении условий (5.101) и при большом времени, когда

$$f_2 \left(Vt^{-\frac{1}{1-\eta}} \right) = N [(1 - \eta) B]^{-\frac{2}{1-\eta}} p \left\{ V [(1 - \eta) Bt]^{-\frac{1}{1-\eta}} \right\} \quad (5.116)$$

Вследствие условий (5.113) этот подход неприменим для исследования уравнений, у которых степень однородности ядра $\eta = 1$. Все трудности получения автомодельных решений связаны с определением $p(V)$ из интегродифференциального уравнения (5.111). Общих методов получения его решений пока нет, хотя для некоторых специальных видов ядер они могут быть получены (например для ядер, допускающих точные решения кинетического уравнения). В этих случаях автомодельные решения, если они существуют, можно получить из точного решения при $t \rightarrow \infty$ или же путем решения (5.111) с помощью преобразования Лапласа.

В работе [121] рассматривается метод точного решения (5.107) для ядра вида

$$K(V, \omega) = G (V^\alpha \omega^\beta + V^\beta \omega^\alpha) \quad (5.117)$$

Метод основан на предварительном интегральном преобразовании исходного кинетического уравнения и решения получаемого уравнения, при условии (5.102), методом преобразования Лапласа. Правда авторам в этой работе удалось получить решение только при $\alpha = \beta = 0$, которое уже было известно. При $\alpha, \beta > 0$ и $\alpha + \beta < 1$

полное решение оказалось физически нереализуемым и в работе исследована только его асимптотика по V .

Трудности решения уравнения (5.111), как неоднократно отмечалось в работах Лушникова, в значительной степени обусловлены поведением искомого распределения в области нуля, т. е. его сингулярностью*.

При нахождении автомодельных решений обычно не рассматривается вопрос о времени выхода коалесцирующей системы на автомодельный режим. Это время будет зависеть не только от ядра коалесценции, но и от начального распределения в коалесцирующей системе. Для его определения необходимо ввести критерий сравнения автомодельного и начального решений, по величине которого можно было бы судить о их близости. Поскольку, как было показано выше, при определении полных решений кинетического уравнения как для начальной, так и для дальней асимптотики встречаются существенные математические трудности, кажется разумным построить критерий сравнения на основе моментов этих решений.

Из (5.104) с учетом (5.107) можно выписать следующие соотношения для моментов автомодельного решения

$$m_i'(t) = h^{i-1}(t), \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (5.118)$$

из которых следует, что

$$m_i'(t) m_0^{(i-1)}(t) = 1, \quad i = 2, 3, \dots \quad (5.119)$$

Эти уравнения будут критериальными соотношениями для оценки времени выхода коалесцирующей системы на автомодельный режим, если в них подставить моменты для начального решения кинетического уравнения. Таким образом, задачу оценки времени выхода на автомодельный режим мы свели к задаче оценки времени выхода на автомодельный режим моментов решения кинетического уравнения. Это время очевидно должно зависеть от номера момента и поэтому является чувствительной характеристикой при описании поведения коалесцирующей системы.

* Функция $f(X)$ называется сингулярной в нулевой точке, если интеграл от нее в нуле расходится.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УКРУПНЕНИЯ И СМЕШЕНИЯ В ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ ПРИ ПОДГОТОВКЕ НЕФТЕЙ

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АППРОКСИМАЦИЯ ЯДЕР КОАЛЕСЦЕНЦИИ

Для исследования процессов укрупнения и смешения в водонефтяных эмульсиях теоретически можно использовать любые методы, рассмотренные в предыдущей главе, с соответствующим ограничением на вид ядра коалесценции. Однако с точки зрения вычислений и последующего анализа результатов наиболее прост метод, основанный на непараметрическом доопределении системы моментных уравнений. Кроме того, он является достаточно общим, так как применим для решения уравнений с ядрами коалесценции вида (5.83). Когда исследуемое ядро коалесценции имеет другой вид, для него можно построить аппроксимационную формулу типа (5.83). Пусть $K(V, \omega)$ — симметричная функция двух переменных со степенью однородности η , которую надо аппроксимировать рядом вида (5.83). Учитывая условие однородности, перепишем (5.83) в виде

$$V^\eta K(1, X) = V^\eta \sum_{j=0}^n \beta_j (X^{\delta_j} + X^{\eta - \delta_j}), \quad X = \frac{\omega}{V} \quad (6.1)$$

Неизвестные коэффициенты β_j определим из условия выполнения равенства между правой и левой частью (6.1) при фиксированных значениях X , которые назовем точками привязки. Чтобы при последующем интегрировании разложения (6.1) не появлялись моменты с порядком выше степени однородности, величину δ_j определим равенством $\delta_j = \eta \frac{j}{n+1}$. С учетом введенных обозначений систему уравнений для определения коэффициентов можно записать в виде

$$K(1, X_i) = \sum_{j=0}^n \beta_j (X_i^{\delta_j} + X_i^{\eta - \delta_j}), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (6.2)$$

Доумножая правую и левую часть (6.2) на V^η , получаем, что при $n = 0$ аппроксимация отыскивается в классе функций

$$K(V, \omega) = \beta_0^{(0)} (V^\eta + \omega^\eta) \quad (6.3)$$

при $n = 1$ — в классе функций

$$K(V, \omega) = \beta_0^{(1)} (V^\eta + \omega^\eta) + \beta_1^{(1)} (V\omega)^\eta \quad (6.4)$$

при $n = 2$ — в классе функций

$$K(V, \omega) = \beta_0^{(2)} (V^\eta + \omega^\eta) + \beta_1^{(2)} (V^{2\eta/3} \omega^{\eta/3} + V^{\eta/3} \omega^{2\eta/3}) \quad (6.5)$$

и т. д. Из (6.3)—(6.5) видно, что число точек привязки, необходимое для определения коэффициентов разложения (6.1), может быть меньше $n + 1$ за счет того, что отдельные слагаемые в правой части (6.1) можно сгруппировать.

Решения (6.2) при $n = 0; 1; 2$ можно записать в виде

$$n = 0, \beta_0^{(0)} = \frac{K(1, X_1)}{1 + X_1^\eta} \quad (6.6)$$

$$n = 1, \beta_0^{(1)} = [K(1, X_1) X_2^{\eta/2} - K(1, X_2) X_1^{\eta/2}] \Delta_1^{-1} \quad (6.7)$$

$$\beta_1^{(1)} = [K(1, X_2) (1 + X_1^\eta) - K(1, X_1) (1 + X_2^\eta)] \Delta_1^{-1}$$

$$\Delta_1 = X_2^{\eta/2} (1 + X_1^\eta) - X_1^{\eta/2} (1 + X_2^\eta)$$

$$n = 2, \beta_0^{(2)} = [K(1, X_1) (X_2^{2\eta/3} + X_2^{2\eta/3}) - K(1, X_2) (X_1^{2\eta/3} + X_1^{2\eta/3})] \Delta_2^{-1}$$

$$\beta_1^{(2)} = [K(1, X_2) (1 + X_1^\eta) - K(1, X_1) (1 + X_2^\eta)] \Delta_2^{-1} \quad (6.8)$$

$$\Delta_2 = (1 + X_1^\eta) (X_2^{2\eta/3} + X_2^{2\eta/3}) - (1 + X_2^\eta) (X_1^{2\eta/3} + X_1^{2\eta/3})$$

Пусть для решения системы уравнений (6.2) потребовалось выбрать k точек X_i . Считая сумму $V + \omega$ фиксированной, рассмотрим их расположение на прямой $V + \omega = Z$ в координатной плоскости (V, ω) (см. рис. 5.1, с. 82). Без ограничения общности можно считать, что все выбранные точки удовлетворяют условию $V \geq \omega$ (или $0 \leq X \leq 1$). Тогда на прямой $V + \omega = Z$ для каждой выбранной точки, за исключением $\omega = V$ (или $X = 1$), существует точка, симметричная относительно точки $V = \omega$, в которой также, вследствие симметрии задачи, будет выполняться равенство (6.1). Поэтому истинное число точек привязки, в которых равенство (6.1) выполняется точно, будет равно $2k$ или $(2k - 1)$, в зависимости от наличия привязки в точке $X = 1$. В дальнейшем мы будем называть аппроксимацию ядра m точечной, если правая и левая часть (6.1) будут совпадать в m точках при изменении X от 0 до ∞ . Так, если $X = 1$ не является точкой привязки, то формулы (6.6)—(6.8) определяют неизвестные коэффициенты соответственно для двух-, четырех- и шеститочечной схем привязки. Если $X = 1$ является точкой привязки, то эти же формулы будут определять коэффициенты для одно-, трех- и пятиточечной схем привязки.

Если выбрано число точек привязки, то одним из возможных способов определения их координат может быть следующий. В связи с симметрией задачи будем выбирать эти точки так, чтобы отрезок $m = \frac{V}{V + \omega} \in [0, 1]$, характеризующий сечение $V + \omega = Z$ (см. с. 82), делился ими на равные части. И, кроме того, концы отрезка будем считать точками привязки. Тогда, если выбрана m — точечная схема привязки, то $\Delta m = 1/(m - 1)$, а последовательность точек

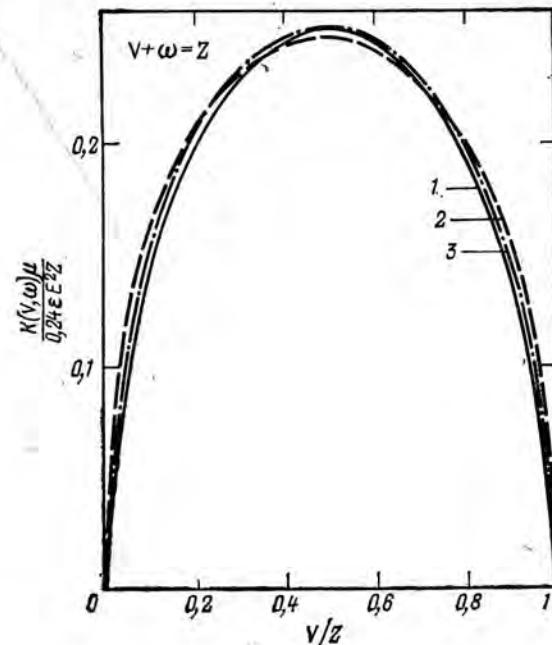


Рис. 6.1. Графики значений ядра гравитационной коалесценции в электрическом поле в сечении $V + \omega = Z$:

1 — точное значение; 2 — трехточечная аппроксимация; 3 — четырехточечная аппроксимация.

X_i для системы (6.2) определяется следующим рекуррентным соотношением

$$\frac{1}{X_i + 1} - \frac{1}{X_{i+1} + 1} = \frac{1}{m - 1}, \quad i = 2, 3, \dots, X_1 = 0 \quad (6.9)$$

Рассчитанные по (6.9) значения величин X_i при различном числе точек привязки приведены в табл. 6.1.

Если $X = 0$ является точкой привязки, то соотношения (6.7) существенно упрощаются и приводятся к виду

$$n = 0, \beta_0^{(0)} = K(1, 0) \quad (6.10)$$

$$n = 1, \beta_0^{(1)} = K(1, 0), \beta_1^{(1)} = \frac{K(1, X_2) - \beta_0^{(1)} (1 + X_2^\eta)}{X_2^{\eta/2}} \quad (6.11)$$

$$n = 2, \beta_0^{(2)} = K(1, 0), \beta_1^{(2)} = \frac{K(1, X_2) - \beta_0^{(2)} (1 + X_2^\eta)}{X_2^{\eta/2} + X_2^{2\eta/3}} \quad (6.12)$$

В качестве примера рассмотрим задачу аппроксимации ядра гравитационной коалесценции в электрическом поле (5.32).

Таблица 6.1

X	m=2	m=3	m=4	m=5	m=6	m=7	m=8	m=9
X ₀	0	0	0	0	0	0	0	0
X ₁		1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7
X ₂			1	2/3	1/2	2/5	1/3	1/3
X ₃				1	3/4	3/5		

Из (6.9) для $m = 2, 3$ и 4 получаем соответственно $(X_1 = 0)$; $(X_1 = 0, X_2 = 1)$; $(X_1 = 0, X_2 = 0,5)$. Подставляя их в (6.10) и (6.12), определяем соответствующие им коэффициенты разложения

$$\beta^{(0)} = 0, \beta_0^{(1)} = 0, \beta_1^{(1)} = 0,5, \beta_0^{(2)} = 0, \beta_1^{(2)} = 0,496.$$

Подставляя их в (6.4) и (6.5), получаем

$$K(V, \omega) = G \frac{(V\omega)^{2/3}}{V^{1/3} + \omega^{1/3}} \approx \begin{cases} 0,5GV^{0,5}\omega^{0,5} & \text{при } m=3 \\ 0,496GV^{0,5}\omega^{0,5} & \text{при } m=4 \end{cases} \quad (6.13)$$

Графики значений ядра $K(V, \omega)$ и его аппроксимации (6.13) в сечении $V + \omega = Z$ приведены на рис. 6.1. Из рисунка видно, что даже при таком незначительном числе точек привязки аппроксимация получается хорошая. Поэтому при оценочных расчетах моментов решения кинетического уравнения можно считать, что ядро гравитационной коалесценции в электрическом поле принадлежит классу ядер

$$K(V, \omega) = GV^\alpha \omega^\alpha \quad (6.14)$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ МОМЕНТОВ РЕШЕНИЯ
КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ.
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Схему вычисления моментов решения разберем на примере кинетического уравнения с ядром коалесценции вида (6.14). Подставляя (6.5) в (5.84), получим следующую систему уравнений для определения первых пяти моментов решения кинетического уравнения

$$\begin{aligned} \dot{m}'_0 &= B_0 m'^2_\alpha; \quad \dot{m}'_1 = 0; \quad \dot{m}'_2 = B_2 m'^2_{1+\alpha}; \\ \dot{m}'_3 &= B_3 m'_{1+\alpha} m'^2_{2+\alpha}; \\ \dot{m}'_4 &= B_4 m'_{3+\alpha} m'_{1+\alpha} + B_5 m'^2_{2+\alpha}; \\ \tau &= Gm^{2\alpha}_1 t \\ B_0 &= -0,5m^{-2\alpha}_1 m_0^{-1} (0) m'^2_{1+\alpha} (0); \end{aligned} \quad (6.15)$$

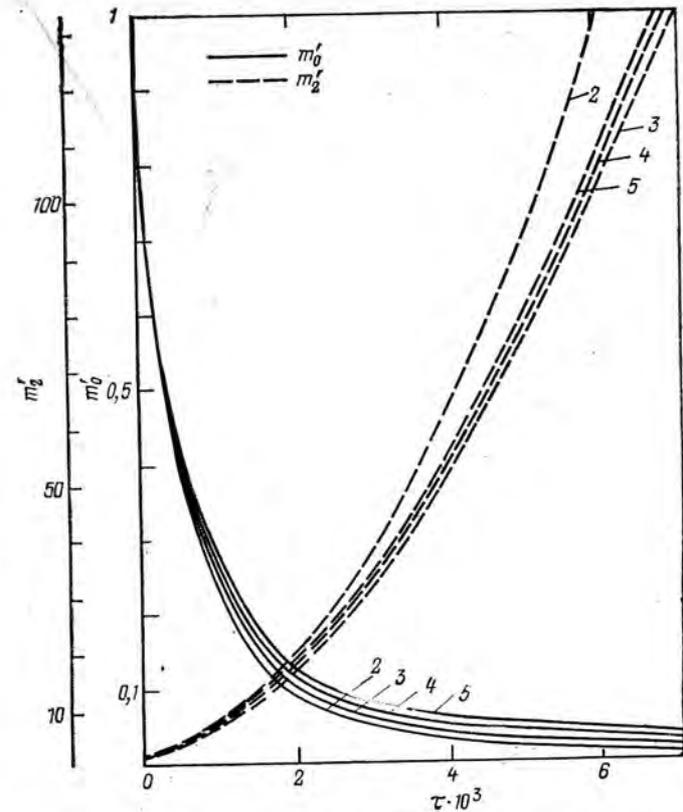


Рис. 6.2. Зависимости $m'_0(\tau)$ и $m'_2(\tau)$. Номер кривой соответствует порядку интерполяционной схемы при оценке дробных моментов.

$$\begin{aligned} B_2 &= m_1^{-2\alpha} m_2^{-1} (0) m'^2_{1+\alpha} (0); \\ B_3 &= 3m_1^{-2\alpha} m_{2+\alpha} (0) m'_{1+\alpha} (0) m_3^{-1} (0); \\ B_4 &= 4m_1^{-2\alpha} m_{3+\alpha} (0) m'_{1+\alpha} (0) m_4^{-1} (0); \\ B_5 &= 3m_1^{-2\alpha} m'^2_{2+\alpha} (0) m_4^{-1} (0) \end{aligned}$$

Дифференцирование проводится по τ . Для случая двухточечной интерполяции дробных моментов через целые доопределяющие уравнения для системы (6.15) можно записать в виде

$$\begin{aligned} m'_\alpha &= m_0^{(1-\alpha)}; \quad m'_{1+\alpha} = m_2^\alpha \\ m'_{2+\alpha} &= m_2^{(1-\alpha)} m_3^\alpha; \quad m'_{3+\alpha} = m_3^{(1-\alpha)} m_4^\alpha \end{aligned} \quad (6.16)$$

Подставляя (6.16) в (6.15), получим

$$\begin{aligned} \dot{m}'_0 &= B_0 m_0'^{2(1-\alpha)}, \quad \dot{m}'_1 = 0, \quad \dot{m}'_2 = B_2 m_2'^{2\alpha} \\ \dot{m}'_3 &= B_3 m_2' m_3'^\alpha, \quad \dot{m}'_4 = B_4 m_2'^\alpha m_3'^{(1-\alpha)} m_4'^\alpha + B_5 m_3'^{2\alpha} m_2'^{2(1-\alpha)} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Первые четыре уравнения имеют аналитические решения, которые можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} m'_0 &= [1 + (2\alpha - 1) B_0 \tau]^{-\frac{1}{1-2\alpha}}; \quad m'_1 = 1 \\ m'_2 &= [1 + (1 - 2\alpha) B_2 \tau]^{-\frac{1}{1-2\alpha}} \\ m'_3 &= \left\{ 1 + \frac{B_3}{2B_2} \left[\left(1 + \frac{B_2 \tau}{(1-2\alpha)} \right)^{\frac{2(1-\alpha)}{1-2\alpha}} - 1 \right] \right\}^{-\frac{1}{1-\alpha}} \end{aligned} \right\} \text{при } \alpha \neq 0,5 \quad (6.18)$$

$$\left. \begin{aligned} m'_0 &= e^{B_0 \tau}, \quad m'_1 = 1, \quad m'_2 = e^{B_2 \tau} \\ m'_3 &= \left(1 + \frac{B_3}{2B_2} e^{B_2 \tau} \right)^2 \end{aligned} \right\} \text{при } \alpha = 0,5$$

Графики $m'_0(\tau)$ и $m'_2(\tau)$, рассчитанные при $\alpha = 0,25$ и различных порядках интерполяционных схем, применяемых для выражения дробных моментов через целые, приведены на рис. 6.2. Для интерполяционных схем выше второго порядка эти зависимости определяли численно. Все расчеты проведены в предположении, что $m_1 = 0,01$, а начальная плотность распределения частиц по размерам является гамма-распределением

$$\rho(V, 0) = \frac{\lambda^\beta}{\Gamma(\beta)} V^{\beta-1} e^{-\lambda V} \quad (6.19)$$

С параметрами $\beta = 2$, $\lambda = 4 \cdot 10^9$ начальные значения моментов определялись как

$$m_\nu(0) = \frac{\Gamma(\beta + \nu)}{\lambda^\nu \Gamma(\beta)} \quad (6.20)$$

По первым пяти моментам решения можно сделать параметрическую оценку самого решения на основе диаграммы Пирсона [122], построенных в координатах квадрата асимметрии β_1 и эксцесса β_2 оцениваемого распределения

$$\beta_1 = \left(\frac{\mu'_3}{\mu_2'^{3/2}} \right)^2, \quad \beta_2 = \frac{\mu'_4}{\mu_2'^2}, \quad \mu'_i = \int_0^\infty (V - \bar{V})^i \rho(V) dV \quad (6.21)$$

Моменты μ'_i связаны с моментами m_i равенствами

$$\begin{aligned} \mu'_2 &= \frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^2, \quad \mu'_3 = \frac{m_3}{m_0} - 3 \frac{m_2 m_1}{m_0^2} + 2 \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^3 \\ \mu'_4 &= \frac{m_4}{m_0} - 4 \frac{m_3 m_1}{m_0^2} + 6 \frac{m_2 m_1^2}{m_0^3} - \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^4 \end{aligned} \quad (6.22)$$

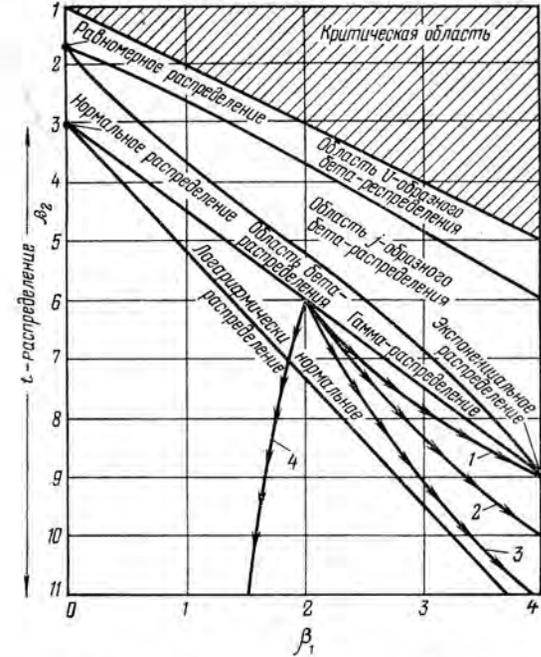


Рис. 6.3. Диаграмма Пирсона с годографами решений кинетического уравнения соответствующих ядер:
1 — $K(V, \omega) = G$; 2 — $K(V, \omega) = G V^{\alpha, 2\alpha} \omega^{\alpha, 2\alpha}$; 3 — $K(V, \omega) = G V^{\alpha, 5\alpha} \omega^{\alpha, 5\alpha}$;
4 — $K(V, \omega) = G(V + \omega)$.

На рис. 6.3 на диаграмму Пирсона для классических распределений нанесены годографы точек с координатами $\beta_1(\tau)$ и $\beta_2(\tau)$, рассчитанные для ядра вида (6.14) при $\alpha = 0$, $\alpha = 0,25$ и $\alpha = 0,5$ и начальном условии (6.19). Годограф 4 соответствует уравнению с ядром $K(V, \omega) = G(V + \omega)$.

Помимо использования параметров β_1 и β_2 для выбора параметрического класса решений по ним можно проследить время и скорость выхода решения кинетического уравнения на автомодельный режим.

В области автомодельного решения β_1 и β_2 не зависят от времени. Действительно, подставляя (5.104) в (6.22), получим

$$\mu'_2 = \mu'_0(0) h^2(\tau), \quad \mu'_3 = \mu'_0(0) h^3(\tau); \quad \mu'_4 = \mu'_0(0) h^4(\tau) \quad (6.23)$$

Правильность этого утверждения непосредственно следует из (6.23) и определения β_1 и β_2 в виде (6.21).

Таким образом, выход графиков $\beta_1(\tau)$ и $\beta_2(\tau)$ на асимптотические значения является доказательством наличия автомодельного решения, а время выхода будет соответственно временем его достижения. На диаграмме Пирсона автомодельное решение соответствует пре-

дельному значению годографа с координатами $\beta_1(\tau)$, $\beta_2(\tau)$ (см. рис. 6.3).

Рассмотрим теперь как изменятся решения для первых моментов, если степень однородности ядра сохранить, а вместо (6.11) записать его в более общем виде (6.1). Подобная ситуация реализуется, если аппроксимацию ядра гравитационной коалесценции (6.1) провести по более многоточечной схеме привязки. Исходя из (5.84), уравнения для первых моментов решения с ядром (6.1) запишем в виде

$$\dot{m}'_0 = - \sum_{j=0}^n \alpha'_{j0} m'_{\eta-\delta_j} m'_{\delta_j}, \quad \dot{m}'_2 = 2 \sum_{j=0}^n \alpha'_{j2} m'_{1+\eta-\delta_j} m'_{1+\delta_j} \quad (6.24)$$

$$\tau = G m_1^\eta t, \quad \alpha'_{j0} = \frac{\alpha_j}{m_1^\eta} m_{\eta-\delta_j}^{(0)} m_{\delta_j}^{(0)}$$

$$\alpha'_{j2} = \frac{\alpha_j}{m_1^\eta} m_{\eta+1-\delta_j}^{(0)} m_{1+\delta_j}^{(0)}$$

Доопределяя (6.24) уравнениями связи (6.16), получим

$$\dot{m}'_0 = A_0 m_0^{(2-\eta)}, \quad \dot{m}'_2 = A_2 m_2^\eta \quad (6.25)$$

$$A_0 = - \sum_{i=0}^n \alpha'_{i0}, \quad A_2 = 2 \sum_{i=0}^n \alpha'_{i2}$$

При сравнении (6.25) и (6.17) видно, что при уточнении аппроксимации ядра путем увеличения числа членов в разложении (6.1) вид зависимости первых моментов решения с этим ядром от времени не изменяется, а уточняется только масштабирование оси времени.

МОМЕНТЫ АВТОМОДЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Уравнение (5.111) для определения решения кинетического уравнения в автомодельной области для ядра (6.11) запишем в виде

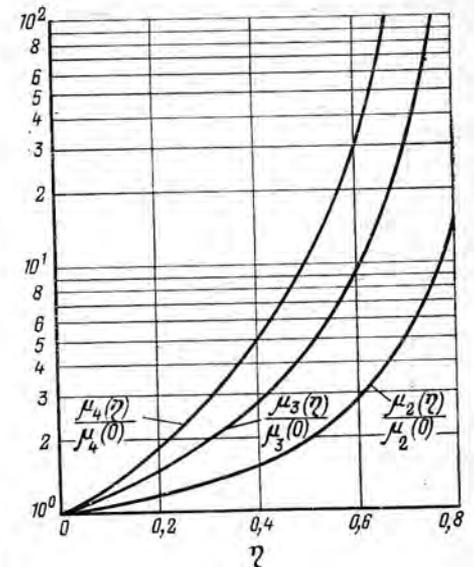
$$\begin{aligned} -2\mu_\alpha^2 \left(2p + V \frac{dp}{dV} \right) &= \frac{1}{2} \int_0^V (V-\omega)^\alpha \omega^\alpha p(V-\omega) p(\omega) d\omega - \\ &- \int_0^\infty V^\alpha \omega^\alpha p(V) p(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (6.26)$$

Доумножая правую и левую часть (6.26) на V^i и интегрируя по V , получим следующую систему уравнений для определения моментов автомодельного решения.

$$(i-1) \mu_\alpha^2 \mu_i = \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} \mu_{i-j+\alpha} \mu_{j+\alpha} - 2\mu_{i+\alpha} \mu_\alpha, \quad i = 2, 3, \dots \quad (6.27)$$

Для $i = 0, 1$ уравнения выполняются тождественно. Все конечные подмножества этой системы незамкнуты. Для их замыкания, как

Рис. 6.4. Зависимости величин моментов автомодельного решения для ядер $K(V, \omega) = GV\eta/2 \omega\eta/2$ от показателя его однородности η .



и ранее, воспользуемся интерполяционными уравнениями выражающими дробные моменты через целые. Так, рассмотрим первые три уравнения системы (6.27).

$$\begin{aligned} \mu_2 \mu_\alpha^2 &= 2\mu_{1+\alpha}^2, \\ \mu_3 \mu_\alpha^2 &= 3\mu_{1+\alpha}^2 + \alpha \mu_{1+\alpha}, \\ \mu_4 \mu_\alpha^2 &= 8/3 \mu_{3+\alpha} \mu_{1+\alpha} + 2\mu_{2+\alpha}^2 + \alpha \end{aligned} \quad (6.28)$$

Используя для их замыкания интерполяционные уравнения (5.98), получим

$$\begin{aligned} \mu_2 &= 2\mu_1^2 (1-2\alpha) \mu_2^{2\alpha}, \quad \mu_3 = 3\mu_1^{1-3\alpha} \mu_2 \mu_3^\alpha \\ \mu_4 &= 8/3 \mu_1^{1-3\alpha} \mu_2 \mu_3^{1-\alpha} \mu_4^\alpha + 2\mu_1^{-2\alpha} \mu_2^{2(1-\alpha)} \mu_3^\alpha \end{aligned} \quad (6.29)$$

откуда

$$\begin{aligned} \frac{\mu_2}{\mu_1^2} &= 2^{1-2\alpha}, \quad \frac{\mu_3}{\mu_1^3} = \left(3 \cdot 2^{\frac{1}{1-2\alpha}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}}, \\ \mu_4/\mu_1^4 &= 2^{\frac{4-5\alpha}{1-2\alpha}} \left(\mu_4/\mu_1^4 \right)^\alpha + 3^{\frac{2\alpha}{1-\alpha}} \cdot 2^{\frac{3+3\alpha^2-5\alpha}{(1-\alpha)(1-2\alpha)}} \end{aligned} \quad (6.30)$$

Зависимости $\mu_i(\eta)/\mu_i(0)$ от η для $i = 2, 3$ и 4 представлены на рис. 6.4 ($\eta = 2\alpha$). Величина $\mu_4(\eta)/\mu_4(0)$ определялась из трансцендентного уравнения (6.30) численно. Знание $\mu_i(\eta)/\mu_i(0)$ позволяет аналитически определить β_1 и рассчитать β_2

$$\beta_1 = \frac{\left[\left(3 \cdot 2^{\frac{1}{1-2\alpha}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} - 3 \cdot 2^{\frac{1}{1-2\alpha}} + 2 \right]^2}{\left(2^{\frac{1}{1-2\alpha}} - 1 \right)^3} \quad (6.31)$$

Зависимости β_1 и β_2 от η показаны на рис. 6.5, а их годограф нанесен на диаграмму Пирсона (рис. 6.6). Из рис. 6.6 видно, что точки, соответствующие автомодельным решениям кинетических уравнений с ядрами коалесценции (6.14), расположены в области распределений

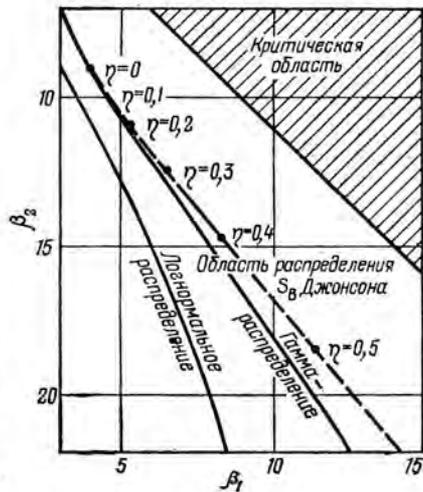
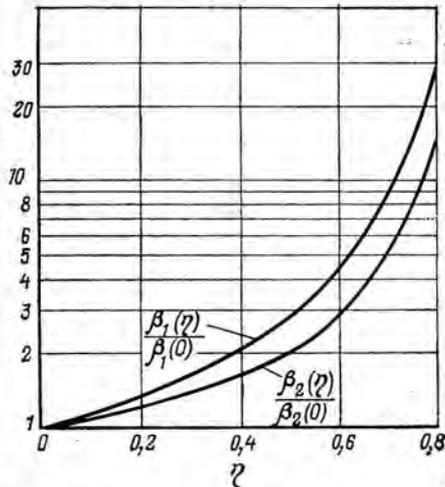


Рис. 6.5. Зависимости β_1 и β_2 автомодельного решения для ядра $K(V, \omega) = GV\eta^{1/2}\omega^{1/2}$ от его показателя однородности η .

Рис. 6.6. Годограф автомодельного решения для ядра $K(V, \omega) = GV\eta^{1/2}\omega^{1/2}$ на диаграмме Пирсона.

S_B Джонсона, которые определяются в виде

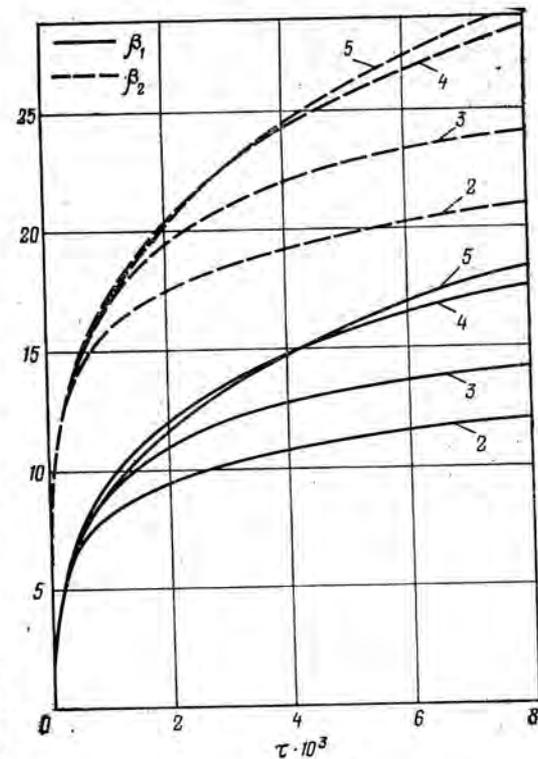
$$p(V) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(V-\varepsilon)^2 + \lambda^2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\gamma + \xi \ln\left[\left(\frac{V-\varepsilon}{\lambda}\right) + \left[\left(\frac{V-\varepsilon}{\lambda}\right)^2 + 1\right]^{1/2}\right]^2\right]\right\} \quad (6.32)$$

где $\xi > 0$, $-\infty < \gamma < \infty$, $\lambda > 0$, $-\infty < \varepsilon < \infty$, $\varepsilon \leq V \leq \varepsilon + \lambda$, γ и ξ — параметры формы, ε — характеризует центр распределения, а λ — масштабный параметр. Вследствие положительности области определения переменной V для нашего случая величину ε можно сразу приравнять нулю и перейти от четырехпараметрического семейства (6.32) к трехпараметрическому. Параметры γ , ξ и λ можно определять либо из исходного уравнения, предназначенного для автомодельного решения, либо оценивать по первым моментам μ_2 , μ_3 и μ_4 [122].

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ РЕШЕНИЯ
И ПОРЯДОК ИНТЕРПОЛЯЦИОННОЙ СХЕМЫ
ДЛЯ ДООПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ

Численная проверка пригодности интерполяционных соотношений (5.98) для оценивания дробных моментов различных классических распределений показывает, что их точность монотонно возра-

Рис. 6.7. Зависимости $\beta_1(\tau)$ и $\beta_2(\tau)$ для решения с ядром $K(V, \omega) = GV^{0,25}\omega^{0,25}$. Номер кривой соответствует порядку интерполяционной схемы при оценке дробных моментов.



стает с увеличением порядка интерполяционной схемы (см. с. 104). Одновременно с точностью возрастает нелинейность интерполяционных соотношений и результирующих систем моментных уравнений после их доопределения. Повышение нелинейности моментных уравнений может существенно усиливать чувствительность их решений к точности определения правых частей уравнений. Таким образом, повышение точности интерполяционных формул с одной стороны и повышение нелинейности

результатирующих систем уравнений с другой — является конкурирующими процессами. В зависимости от того, какой из них будет преобладать, увеличение степени интерполяционных соотношений может привести к уточнению решения или наоборот — к его ухудшению.

Для проверки этого эффекта были численно определены первые пять моментов из системы уравнений (6.15) с начальными условиями (6.19) и при различных порядках интерполяции доопределяющих уравнений (5.98). Результаты расчетов первых двух моментов и параметров β_1 и β_2 при $\alpha = 0,25$ и прежнем начальном условии представлены на рис. 6.2 и 6.7. Из рисунков видно, что повышение порядка интерполяционных формул приводит к нарушению устойчивости решения результирующей системы уравнений. Аналогичные данные были получены при определении моментов автомодельного решения из системы уравнений (6.25). Дробные моменты интерполировались по формуле (5.98). При $\alpha = 0,25$ были получены следующие результаты:

n	μ_2/μ_1^2	μ_3/μ_1^3	β_1
1	4	27,5	11,3
2	4	29,4	13,9
3	6,1	73,6	24,8
4	7,6	118,2	33,0

Существование подобной неустойчивости решений не позволяет формально увеличивать точность определения моментов кинетического уравнения путем повышения порядка интерполяционных доопределяющих соотношений.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ РЕШЕНИЯ
КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ КОАЛЕСЦЕНЦИИ
В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ**

Ядро коалесценции в турбулентном потоке с учетом молекулярного и гидродинамического взаимодействия частиц (5.53) является суммой двух однородных функций с показателями однородности $\eta = 0,5$ и $\eta = 2/3$ (см. с. 94). Раскладывая каждую однородную функцию в ряд по методике, изложенной в начале этой главы, представим ядро коалесценции (5.53) в виде

$$K(V, \omega) = \sum_{j=0}^n \alpha_j (V^{\eta-\delta_j} \omega^{\delta_j} + V^{\delta_j} \omega^{\eta-\delta_j}) + \sum_{j=0}^m \beta_j (V^{\gamma-\xi_j} + V^{\xi_j} \omega^{\gamma-\xi_j}) \quad (6.33)$$

Для определения коэффициентов разложения запишем слагаемые ядра (5.53) в виде

$$\alpha(1, X) K_1(1, X) = a \frac{(1 + X^{1/3})^{3/2} X^{3/4}}{(X^{2/3} + 1 - X^{1/3})(1 + X^2)}, \quad a = 12 \bar{S}_m^{1/2} \frac{\nu}{\lambda_0^2} \quad (6.34)$$

$$[1 - \alpha(1, X)] K_2(1, X) = b \frac{(1 + X^{1/3})(1 - X)^2}{(1 + X)^2}, \quad b = \frac{3^{3/2}}{\Gamma(4/3)} \bar{S}_m^{1/3} \frac{\nu}{\lambda_0}$$

Аппроксимирующие функции по трехточечной схеме привязки будем искать в классе функций (6.4), коэффициенты разложения определять из равенств (6.11) при $X_1 = 0$ и $X_2 = 1$. В результате вычислений получим

$$\alpha(V, \omega) K_1(V, \omega) \approx 5,65a (V\omega)^{0,25}$$

$$[1 - \alpha(V, \omega)] K_2(V, \omega) \approx b [V^{2/3} + \omega^{2/3} - 1,6 (V\omega)^{1/3}] \quad (6.35)$$

‡ Подставляя (6.35) в (5.51), запишем аппроксимацию ядра коалесценции в турбулентном потоке в виде

$$K(V, \omega) \approx 5,65a (V\omega)^{0,25} + b [V^{2/3} + \omega^{2/3} - 1,6 (V\omega)^{1/3}] \quad (6.36)$$

§ Вычислим нулевой и второй моменты решения кинетического уравнения с ядром (6.36). Определяющими уравнениями для них будут

$$\begin{aligned} \frac{dm_0}{dt} &= -2,875am_{0,25}^2 - bm_{2/3}m_0 + 0,8bm_{1/3}^2 \\ \frac{dm_2}{dt} &= 5,65am_{1,25}^2 + 2bm_{2/3}m_1 - 1,6bm_{1/3}^2 \end{aligned} \quad (6.37)$$

Выражая дробные моменты через целые по двухточечной интерполяционной схеме и переходя к безразмерным переменным, преобразуем (6.37) к виду

$$\begin{aligned} \frac{dm_0'}{d\tau} &= -A_1 m_0'^{3/4} - A_2 m_0'^{4/3} \\ \frac{dm_2'}{d\tau} &= A_3 m_4'^{0,5} + A_4 m_2'^{2/3} \end{aligned} \quad (6.38)$$

$$\tau = 2,875am_1^{0,5}t, \quad A_1 = \frac{m_{0,25}^2(0)}{m_1^{0,5}m_0(0)}$$

$$A_2 = \frac{b}{2,875am_1^{0,5}m_0(0)} [m_{2/3}(0)m_0(0) - 0,8m_{1/3}^2(0)]$$

$$A_3 = 2 \frac{m_{1,25}^2(0)}{m_1^{0,5}m_2(0)}$$

$$A_4 = \frac{2b}{2,875am_1^{0,5}m_0(0)} [m_{2/3}(0)m_1 - 0,8m_{1/3}^2(0)]$$

Решая (6.38) с начальными условиями $m_0'(0) = 1$ и $m_2'(0) = 1$, получим

$$\begin{aligned} \tau = & -\frac{6}{A_2^3} \left\{ \left[A_1^2 \ln(A_1 + A_2) - 2A_1(A_1 + A_2) + \frac{(A_1 + A_2)^3}{2} \right] - \right. \\ & \left. - \left[A_1^2 \ln \frac{A_1 m_0'^{1/4} + A_2}{m_0'^{1/4}} - \frac{2A_1(A_1 m_0'^{1/4} + A_2)}{m_0'^{1/4}} + \frac{(A_1 m_0'^{1/4} + A_2)^2}{2m_0'^{1/4}} \right] \right\} \quad (6.39) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau = & \frac{6}{A_4^3} \left[\frac{1}{2} (A_3 + A_4 m_2'^{1/3})^2 - 2A_3(A_3 + A_4 m_2'^{1/3}) + \right. \\ & \left. + A_3^2 \ln(A_3 + A_4 m_2'^{1/3}) - \frac{1}{2} (A_3 + A_4)^2 + 2A_3(A_3 + A_4) - A_3^2 \ln(A_3 + A_4) \right] \quad (6.40) \end{aligned}$$

Подставляя в (6.39) и (6.40) конкретные значения A_1, A_2, A_3 и A_4 и вычисляя правые части этих равенств для различных значений $m_0' < 1$ и $m_2' > 1$, получим отыскиваемые зависимости в численном виде.

Для случая, когда ядро коалесценции записано в более общем виде (6.33), процедура определения моментов решения сохраняется. Например, нулевой момент решения с ядром (6.33) определяется уравнением

$$\frac{dm_0}{dt} = - \sum_{j=0}^n \alpha_j m_0^{\eta-\delta_j} - \sum_{j=0}^m \beta_j m_0^{\gamma-\xi_j} m_{\xi_j} \quad (6.41)$$

Выражая дробные моменты через целые и переходя к безразмер-

ным переменным, получим

$$\frac{dm_0}{d\tau} = -m_0^\eta - \frac{B_2}{B_1} m_0^\gamma$$

$$\tau = m_1^\eta B_1 t, \quad B_1 = \sum_{j=0}^n \alpha_j \frac{m_{\eta-\delta_j}(0) m_{\delta_j}(0)}{m_0(0) m_1^\eta} \quad (6.42)$$

$$B_2 = \sum_{j=0}^m \beta_j \frac{m_{\gamma-\xi_j}(0) m_{\xi_j}(0)}{m_0(0) m_1^\eta}$$

При сравнении (6.38) и (6.42) видно, что вид уравнений совпадает. Это означает, что если сохраняются степени однородности слагаемых в правой части ядра (6.33), то вид решения для $m_0'(\tau)$ не будет зависеть от количества слагаемых в правой части (6.33).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ

Как было показано в гл. 3, процесс смешения состоит из многократно повторяющихся актов коалесценции и последующего дробления капель промывочной и пластовой воды. Поскольку наиболее медленно коалесцируют, а следовательно, и смешиваются мелкие капли, процесс смешения идет на стадии коалесценции мелкодисперсной составляющей пластовой воды.

В качестве основной характеристики процесса коалесценции используем число частиц, которые ни разу не скоалесцируют за время t . Для расчета числа частиц воспользуемся следующей линейной моделью

$$\frac{dn(\omega, t)}{dt} = -n(\omega, t) \int_0^\infty K(V, \omega) n(V, t) dV \quad (6.43)$$

где $n(\omega, t)$ — количество нескоалесцировавших частиц объемом ω к моменту времени t . Вследствие большого различия в размерах капель пластовой и промывочной воды в качестве ядра коалесценции в уравнении (6.43) можно использовать асимптотику ядра коалесценции в условиях турбулентного перемешивания (5.49). Для рассматриваемого случая (5.49) можно упростить и записать в виде

$$K(V, \omega) = 1,6 \left(\frac{Av}{\lambda_0^4 \rho_n} \right)^{1/3} V^{2/3} \quad (6.44)$$

Подставляя (6.44) в (6.43), получим

$$\frac{dn(\omega, t)}{dt} = -n(\omega, t) B \int_a^\infty (4\pi)^{1/3} (3V)^{2/3} n(V, t) dV \quad (6.45)$$

$$B = 0,69 \left(\frac{Av}{\lambda_0^4 \rho_n} \right)^{1/3}$$

где a — минимальный размер частиц промывочной воды, учитываемый в расчете. Предполагается, что выполняется условие $a \gg \omega$.

Поскольку интеграл в правой части (6.45) численно равен межфазной поверхности промывочной воды, обозначая его через $S(t)$ и решая (6.45) при начальном условии $n(\omega, 0) = n_0$, получим

$$\frac{n(\omega, t)}{n_0} = \exp \left\{ -B \int_0^t S(t) dt \right\} \quad (6.46)$$

Записывая интеграл в показателе экспоненты как произведение времени смешения на среднюю (за это время) величину межфазной поверхности \bar{S} , можно из (6.49) оценить время смешения, которое необходимо для достижения заданного отношения $n(\omega, t)/n_0$. Учитывая связь характерного масштаба турбулентности с удельной диссипацией энергии ϵ_0 (см. Приложение, раздел 1), это время можно записать в виде

$$t \approx -\frac{1,5}{\bar{S}} \left(\frac{v^2 \rho_n}{A \epsilon_0} \right)^{1/3} \ln \frac{n(\omega, t)}{n_0} \quad (6.47)$$

Отсюда видно, что время процесса смешения слабо зависит от интенсивности его ведения, характеризующего параметром ϵ_0 . Наиболее сильно это время зависит от средней величины межфазной поверхности, которая определяется устройством для дробления промывочной воды и ее расходом.

Оценим порядок величины времени смешения, необходимой для десятикратного уменьшения исходного количества мелких капель пластовой воды. Пусть процесс смешения идет в трубе при $\epsilon_0 = 500 \text{ см}^2/\text{с}^3$ и $v = 0,05 \text{ см}^2/\text{с}$, что характерно для обвязочных трубопроводов установок обессоливания. Промывочная вода подается из расчета 5% на нефть, а средний размер капель промывочной воды за время смешения $\bar{R} = 10^{-2} \text{ см}$. Тогда величина $\bar{S} \approx 15^{-1} \text{ см}$. Подставляя эти значения в (6.47) и полагая $\rho_n = 8,50 \text{ кг/м}^3$, а $A = 10^{-20} \text{ Дж}$, получим $t = 56 \text{ с}$. Из (6.47) видно, что существенно уменьшить это время и достигнуть величин порядка долей секунд нельзя в связи с отсутствием существенных управляющих параметров. Этот вывод противоречит установившемуся в промышленности мнению, что процесс смешения пластовой и промывочной воды происходит на смешительных задвижках, клапанах и на других аналогичных конструкциях, время прохождения через которые исчисляется долями секунды. Подобное представление о скорости процесса смешения ошибочно. На смешительных клапанах и задвижках промывочная вода только дробится, а сам процесс смешения пластовой и промывочной воды идет после этих устройств в обвязочных трубопроводах и частично в электродегидраторах, его длительность исчисляется десятками секунд. В связи с этим, если смешительный клапан или задвижка устанавливается в непосредственной близости от входа в дегидратор, процесс смешения не успевает закончиться, что приводит к снижению качества обессоливания.

Вывод о длительности процесса смешения экспериментально подтверждается в гл. 8 при разборе методики определения эффективности смешительных устройств.

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ОТСТОЙНЫХ АППАРАТОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

ПОНЯТИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ОТСТОЙНОГО АППАРАТА

Качество и эффективность разделения эмульсии в отстойном аппарате зависят от производительности отстойника, обводненности и дисперсности эмульсии сырой нефти, вязкостных и эмульгирующих свойств нефти, типа и расхода применяемого деэмульгатора, температуры ведения процесса, а также от конструктивных особенностей самого отстойника и его технологической обвязки. Учитывать все эти параметры и условия при анализе процессов обезвоживания вряд ли целесообразно. Поэтому попытаемся разделить интересующий нас процесс на более элементарные составляющие, зависящие от меньшего числа переменных.

Количественное описание процесса обезвоживания в целом удобно вести на языке передаточных функций и коэффициентов усиления, применяемых для этих целей в теории автоматического регулирования*. Для стационарного случая, т. е. когда все параметры процесса стабилизированы, его передаточную функцию $\mathcal{L}(V)$ можно определить как долю воды на выходе из отстойника, которая в исходном сырье содержалась в каплях объема V , т. е.

$$\mathcal{L}(V) = \frac{W_{\text{вых}}(V)}{W_{\text{вх}}(V)} \quad (7.1)$$

где $W_{\text{вх}}(V)$ — суммарное содержание воды в каплях объема V в исходной эмульсии, а $W_{\text{вых}}(V)$ — суммарное содержание воды в подготовленной нефти, которая в сырой нефти содержалась в каплях объема V . Как видно из (7.1), $\mathcal{L}(V)$ положительно определенная функция, удовлетворяющая неравенству $0 \leq \mathcal{L}(V) \leq 1$. Ее величина определяется процессами осаждения и коалесценции в отстойном аппарате, которые, в свою очередь, зависят от его производительности, вязкости нефти, особенности гидродинамического режима разделения эмульсии и др. Таким образом, передаточная функция (ПФ) является комплексной характеристикой и зависит практически от всех основных технологических и конструктивных параметров процесса обезвоживания.

* Понятие передаточной функции линейного объекта в теории автоматического регулирования определяется как отношение $F[y(t)]/F[x(t)]$, где F — оператор преобразования Лапласа [123]; $x(t)$ и $y(t)$ — соответственно значение входа и выхода объекта.

ПФ удобна для качественного и количественного сравнения эффективности процесса разделения в различных отстойниках (или в одном отстойнике при различных технологических режимах). Действительно, если тождественно неравные ПФ $\mathcal{L}^{(1)}(V)$ и $\mathcal{L}^{(2)}(V)$ для любых V удовлетворяют неравенству $\mathcal{L}^{(1)}(V) \leq \mathcal{L}^{(2)}(V)$, то можно утверждать, что в процессе, характеризуемом ПФ $\mathcal{L}^{(1)}(V)$, обезвоживание идет лучше, чем в процессе с ПФ $\mathcal{L}^{(2)}(V)$. Справедливость этого утверждения непосредственно следует из определения ПФ в виде (7.1).

Если известно распределение капель эмульгированной воды по размерам в сырой нефти, то остаточное содержание воды в подготовленной нефти $W_{\text{вых}}$ для процесса с ПФ $\mathcal{L}(V)$ будет определяться равенством

$$W_{\text{вых}} = \int_0^{\infty} \mathcal{L}(V) W_{\text{вх}}(V) dV \quad (7.2)$$

Введем понятие коэффициента усиления отстойного аппарата по воде, который определим как безразмерное отношение

$$\mathcal{K}_w = \frac{W_{\text{вых}}}{W_{\text{вх}}} \quad (7.3)$$

Из (7.3) видно, что $\mathcal{K}_w \leq 1$, и его величина численно равна остаточной воде в нефти, если сырая нефть имеет единичную обводненность при сохранении плотности распределения по объемам капель дисперсной фазы, т. е. величина \mathcal{K}_w не зависит от обводненности сырой нефти*. Этот вывод можно получить и формально, если в (7.3) $W_{\text{вх}}(V)$ записать через плотность распределения капель по объемам $p(V)$. Тогда $W_{\text{вх}}(V) dV = (W_{\text{вх}} \bar{V}) V p(V) dV$, где \bar{V} — средний объем частиц, а

$$\mathcal{K}_w = \frac{1}{\bar{V}} \int_0^{\infty} \mathcal{L}(V) V p(V) dV \quad (7.4)$$

Из (7.4) видно, что коэффициент усиления отстойника, в отличие от его передаточной функции, является условной характеристикой, зависящей от плотности распределения капель по объемам. Поэтому при сравнении отстойников по коэффициенту усиления их необходимо поместить в одинаковые условия.

Сравним по коэффициенту усиления отстойник с ПФ $\mathcal{L}^{(1)}(\bar{V})$ и $\mathcal{L}^{(2)}(V)$. Если исходная эмульсия обладает распределением $W_{\text{вх}}(V)$, то разницу в остаточной воде в нефти на выходе этих отстойников можно записать в виде

$$W_{\text{вых}}^{(1)} - W_{\text{вых}}^{(2)} = \int_0^{\infty} [\mathcal{L}^{(1)}(V) - \mathcal{L}^{(2)}(V)] W_{\text{вх}}(V) dV \quad (7.5)$$

* Предполагается, что при изменении $W_{\text{вх}}$ режим обезвоживания и гидродинамика отстоя остаются постоянными.

Разделив правую и левую части на $W_{вх}$ и учитывая (7.3), получим

$$\mathcal{K}_W^{(1)} - \mathcal{K}_W^{(2)} = \frac{1}{V} \int_0^{\infty} [\mathcal{L}^{(1)}(V) - \mathcal{L}^{(2)}(V)] V p(V) dV \quad (7.6)$$

Отсюда видно, что можно подобрать $p(V)$, при которой даже отстойники, существенно отличающиеся друг от друга по передаточным функциям, нельзя различить путем сравнения остаточной воды в товарной нефти.

Понятие ПФ применимо не только к отдельно взятому отстойнику. Его можно распространить и на группу отстойников, соединенных по определенной схеме. Так, можно показать, что если n аппаратов для обезвоживания с ПФ $\mathcal{L}^{(i)}(V)$ соединены параллельно и производительность каждого из них Q_i , то ПФ всей схемы будет связана с ПФ отдельных аппаратов соотношением

$$\mathcal{L}(V) = \frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{L}^{(i)}(V) Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (7.7)$$

Если те же отстойники соединить последовательно, то ПФ схемы будет определяться равенством

$$\mathcal{L}(V) = \prod_{i=1}^n \mathcal{L}^{(i)}(V) \quad (7.8)$$

Очевидно, что определить ПФ, учитывающие технологические параметры процесса разделения и многообразие его конструктивных реализаций, не удастся. В то же время в отдельных случаях можно определить предельные передаточные функции, между которыми будут расположены все остальные. Другими словами, удастся определить самую «плохую» и самую «хорошую» передаточную функции. Разница между ними характеризует гидродинамическую устойчивость отстойных характеристик аппарата для обезвоживания, а также позволяет рассчитать эффект, который определится при переходе к аппарату с оптимальной ПФ. По предельным ПФ можно также сравнивать эффективность работы отстойников различных конструкций.

Предельные ПФ для различных типов отстойных аппаратов можно получить расчетным путем, если предположить, что эмульсия разделяется вследствие осаждения капель в поле сил тяжести, а влиянием коалесценции капель на разделение можно пренебречь. В этом случае ПФ представим в виде

$$\mathcal{L}(V) = \frac{n_{вых}(V)}{n_{вх}(V)} \quad (7.9)$$

где $n_{вх}(V)$ и $n_{вых}(V)$ — число капель объемом V на входе и выходе аппарата. Поскольку учет процесса коалесценции способствует только улучшению передаточной функции отстойника, передаточные функции вида (7.9) станут предельными «наихудшими» и будут определяться только гидродинамикой отстоя.

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОТСТОЙНЫХ АППАРАТОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОТОКОМ СЫРЬЯ

Основное влияние на гидродинамический режим процесса отстоя в дегидрататоре оказывает тип ввода сырья. В гл. 6 было показано, что в настоящее время в отстойниках используют вводы трех основных типов: нижний, торцевой и через распределительные головки. Наиболее просто определить ПФ для отстойника с вводом сырья через распределительное устройство, расположенное в нижней части аппарата, и отбором сырья из верхней части аппарата (см. рис. 2.5, с. 29). В этом случае капли будут двигаться против потока нефти. Поэтому абсолютная скорость осаждения капли объемом V сложится из скорости движения сплошной фазы v_n , направленной вверх, и скорости осаждения капли $v_k(V)$, направленной вниз. Если в отстойной части аппарата соблюдается ламинарный режим движения жидкости, то все капли, для которых скорость сплошной фазы больше скорости их осаждения, не осадут и останутся в товарной нефти. Поэтому будет справедливо равенство

$$n_{вых}(V) = n_{вх}(V) \operatorname{sgn} \left(1 - \frac{v_k(V)}{v_n} \right) \quad (7.10)$$

$$\operatorname{sgn} x = \begin{cases} 1 & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases}$$

Подставляя (3.7) в определение передаточной функции (7.6), получим

$$\mathcal{L}(V) = \operatorname{sgn} \left(1 - \frac{v_k(V)}{v_n} \right) \quad (7.11)$$

График этой функции приведен на рис. 7.1. Через отстойные аппараты с такой ПФ будут проходить все капли, для которых скорость осаждения меньше скорости восходящего потока жидкости. Из равенства $v_k(V) = v_n$ можно определить критический объем капель $V_{кр}$. Все капли с меньшим объемом будут выноситься из аппарата вместе с товарной нефтью. На рис. 7.2 изображен условный график распределения капель воды по размерам в сырой нефти. Заштрихованная часть 2 показывает капли, оставшиеся в подготовленной нефти при прохождении ее через аппарат с ПФ (7.11).

Представляет интерес результат, который можно получить из рассмотрения ПФ для отстойных аппаратов, соединенных по схеме, изображенной на рис. 7.3. Пусть все аппараты обладают одинаковыми ПФ. Пользуясь

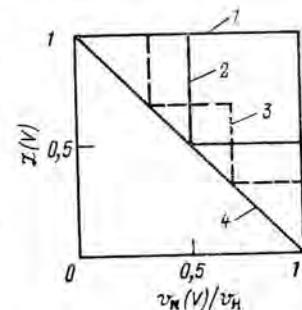


Рис. 7.1. Графики передаточных функций для отстойников с восходящим потоком сырья и различными устройствами ввода эмульсии: 1 — нижний ввод; 2 — два ввода по высоте; 3 — три ввода по высоте; 4 — непрерывное распределение по объему.

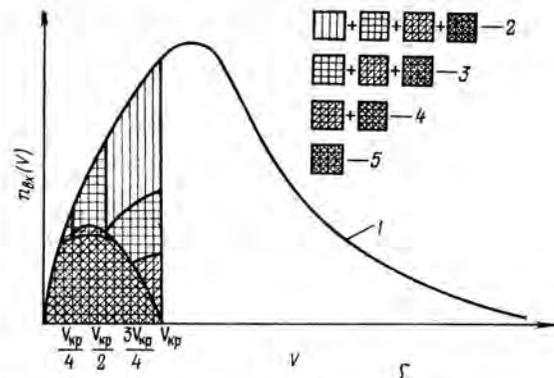


Рис. 7.2. 1 — Распределение по размерам капель эмульгированной воды в сырой нефти. Доля капель эмульгированной воды, остающейся в подготовленной нефти на выходе из остойных аппаратов; 2 — с одним нижним вводом; 3 — с двумя вводами по высоте; 4 — с тремя вводами по высоте; 5 — с непрерывным распределением эмульсии по объему.

правилами (7.7) и (7.8), с учетом (7.9), нетрудно записать передаточные функции для схем *a* и *б*. Для частного случая $Q_i = Q_j$, $i = 1, 2, 3$ графики этих передаточных функций представлены на рис. 7.2 — соответственно 2 и 3. Легко показать, что с увеличением числа отстойников в схеме, аналогичной схемам *a* и *б*, передаточная функция всей схемы будет приближаться к диагонали квадрата, изображенного на рис. 7.1, соединяющей точки (0, 1) и (1, 0). Другими словами, подобная схема соединения аппаратов обладает предельной ПФ, изображенной на рис. 7.1 под номером 4, которую можно записать в виде [124]

$$\mathcal{L}(V) = \left(1 - \frac{v_{к}(V)}{v_{н}}\right) \operatorname{sgn} \left(1 - \frac{v_{к}(V)}{v_{н}}\right) \quad (7.12)$$

Проведенное обсуждение представляет интерес в связи с тем, что работа такой схемы эквивалентна работе отстойного аппарата, изображенного на рис. 2.5, если в нем дополнительно смонтировать распределительные устройства для сырья, располагая их все друг над другом в зоне отстоя. Так, если помимо существующего нижнего ввода в зоне отстоя расположить еще один ввод и часть сырья подавать через него, то ПФ такого аппарата будет эквивалентна ПФ группы аппаратов на рис. 7.3 *a*. Если в зоне отстоя поместить не один, а два дополнительных ввода, то работа отстойника будет эквивалентна работе схемы *б* и т. д. При увеличении числа вводов, т. е. при переходе к объемному распределению сырья по аппарату, мы будем приближаться к передаточной функции (7.12) * (прямая 4, изображенная на рис. 7.1). Причина такого улучшения процесса отстоя понятна. В первом случае вся эмульсия отстаивается в восходящем потоке

* Скорость $v_{н}$ определяется в верхней зоне аппарата.

непрерывной фазы, имеющей скорость $v_{н}$. Во всех остальных случаях эмульсия распределяется по высоте, и значительная ее часть проходит зоны, в которых скорость восходящего потока меньше скорости $v_{н}$, реализуемой в первом случае.

Представление о динамике процесса улучшения отстоя при замене одного нижнего ввода на распределенный ввод дает рис. 7.2.

Итак, рассмотрев последовательное совершенствование отстойного аппарата, можно заключить, что предельной (или наилучшей) ПФ, к которой нужно стремиться, будет функция (7.9). Представляет интерес установить, можно ли усовершенствовать и этот отстойник и организовать процесс отстоя так, чтобы график его передаточной функции лежал ниже прямой 4, показанной на рис. 7.1.

Рассмотрим поперечное сечение отстойного аппарата длиной L и диаметром d . Отстойную зону мысленно разобьем на узкие продольные зоны шириной Δx , каждую из которых будем рассматривать как элементарный отстойник объемом ΔV_i . Пусть в начальный момент времени вся отстойная зона равномерно заполнена эмульсией сырой нефти, которая отстаивается в режиме покоя. Очевидно в этом случае скорость осаждения капель будет максимальной, так как отсутствуют восходящие потоки сплошной фазы. За время t капля объема V сместится вниз относительно своего первоначального положения на величину $l = v_{к}(V) t$. При этом все капли объема V , находившиеся от нижней границы отстойной зоны ближе, чем l , уйдут из этой зоны. Рассмотрим отношение оставшегося в эмульсии числа капель объема V к его первоначальному значению, т. е. ПФ для отстоя в данных условиях. Ее можно записать в виде

$$\mathcal{L}_i(V) = \left[1 - \frac{v_{к}(V) \Delta XL}{\Delta V_i} t\right] \operatorname{sgn} \left[1 - \frac{v_{к}(V) \Delta XL}{\Delta V_i} t\right] \quad (7.13)$$

Для отстойного аппарата, работающего в непрерывном режиме, можно ввести понятие характерного времени отстоя t_i для i -й зоны, равного отношению ее высоты к скорости подъема нефти

$$t_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta XL v_{н}} \quad (7.14)$$

Если длительность отстоя в (7.13) выбрать равной характерному

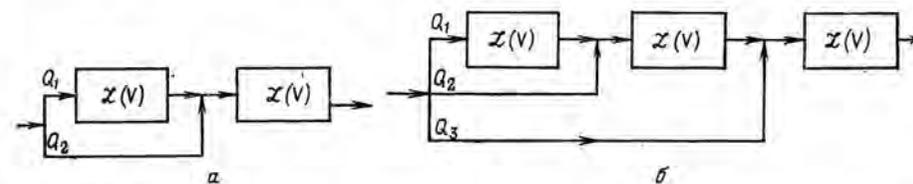


Рис. 7.3. Схемы соединения отстойных аппаратов с нижним вводом сырья, эквивалентные аппаратам:

a — с двумя распределительными устройствами; *б* — с тремя распределительными устройствами.

времени отстоя (7.14), то, подставляя (7.14) в (7.13) получим

$$\mathcal{L}_i(V) = \left[1 - \frac{v_k(V)}{v_n} \right] \operatorname{sgn} \left[1 - \frac{v_k(V)}{v_n} \right] \quad (7.15)$$

Поскольку все элементарные отстойники соединены параллельно, их суммарная ПФ определяется на основании равенства (7.7). В связи с тем, что производительности всех отстойников в схеме одинаковы, суммарная ПФ будет равна ПФ одного отстойника, т. е. будет иметь вид (7.15). Совпадение (7.15) с (7.12) доказывает правильность сделанного выше утверждения, что осуществить процесс отстоя лучше, чем в аппарате с распределенным объемным вводом сырья, нельзя. Однако из этого утверждения не следует, что подобная оптимальная конструкция является единственной. В следующем разделе будет показано, что передаточные функции вида (7.12) могут быть реализованы для отстойников других конструкций.

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОТСТОЙНЫХ АППАРАТОВ
С ТОРЦЕВЫМ ВВОДОМ СЫРЬЯ И ВВОДОМ
ЧЕРЕЗ ЩЕЛЕВЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ГОЛОВКИ

Рассмотрим отстойник с торцевым вводом сырья (рис. 7.4). Сырая нефть подается через устройство 1, обеспечивающее равномерное распределение эмульсии по сечению аппарата. Во время движения эмульсии по аппарату взвешенные капли воды оседают и могут покинуть зону отстоя. Пусть нефть движется в зоне отстоя ламинарно. ПФ для этого случая легко получить, рассуждая следующим образом. Выделим мысленно в зоне отстоя некоторый объем, расположенный перпендикулярно направлению движения потока и движущийся вместе с ним (см. рис. 7.4). Во время движения в выделенном объеме эмульсия отстаивается в условиях покоя. При этом длительность отстоя будет равна характерному времени пребывания эмульсии в зоне отстоя. Подобный случай был уже рассмотрен в предыдущем разделе и была получена передаточная функция вида (7.15). Таким образом, ПФ отстойного аппарата с торцевым вводом и выводом сырья полностью совпадает с предельной ПФ отстойника с распределенным вводом сырья*.

Рассмотрим теперь отстойник с вводом сырья через щелевые распределительные головки (рис. 7.5). В этой конструкции в области

* Предполагается, что поперечное сечение отстойной зоны отстойника имеет прямоугольную форму.

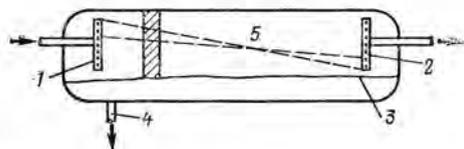
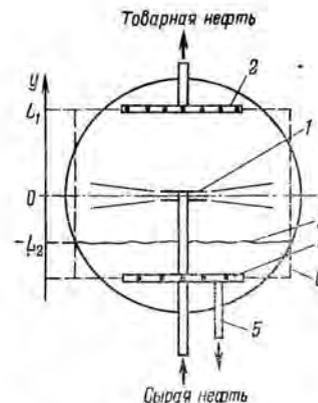


Рис. 7.4. Горизонтальный отстойник с торцевым вводом сырья: 1, 2 — соответственно входное и выходное распределительные устройства; 3 — граница раздела фаз; 4 — дренаж; 5 — зона отстоя.

Рис. 7.5. Отстойник со щелевыми распределительными головками:

1 — распределительная головка; 2 — выводной распределитель; 3 — граница раздела фаз; 4 — дренажное распределительное устройство; 5 — дренаж; 6 — условная граница отстойной зоны, рассматриваемой в расчетах.



ввода сырья всегда образуется зона интенсивного турбулентного перемешивания. Если предположить, что интенсивность перемешивания однородна по поперечному сечению аппарата, то распределение частиц по его высоте будет удовлетворять следующему однородному стационарному уравнению диффузии с переменным коэффициентом диффузии

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[D(y) \frac{\partial n(V, y)}{\partial y} - (v_n - v_k(V)) n(V) \right] = 0 \quad (7.16)$$

с граничными условиями $n(V, 0) = n_0$, $n(V, L_1) = n_1$, $n(V, L_2) = n_2$ и дополнительным условием $n_{\text{вых}}(V) = n_1 v_n$, которое показывает, что поток капель воды, уходящих с товарной нефтью, полностью определяется их концентрацией и скоростью потока в верхней части аппарата. Если считать, что сечение дегидратора по высоте постоянно и направлена вверх при $y > 0$ и равна нулю при $y < 0$. Решим уравнение (7.16) отдельно для верхней и нижней частей аппарата, а затем произведем «сшивку» этих решений при $y = 0$. Из общего решения определим потоки частиц, уходящих из аппарата в дренаж и с товарной нефтью. Подставляя эти потоки в определение передаточной функции, получим*

$$\mathcal{L}(V) = \left[1 + \frac{v_k}{v_n - v_k} \left(1 - \frac{v_n}{v_n} e^{-(v_n - v_k)\alpha} \right) \right]^{-1}, \quad \alpha = \int_0^{L_1} \frac{dy}{D(y)} \quad (7.17)$$

Для двух интересующих нас предельных случаев это равенство можно существенно упростить. Так, для случая, когда отстойник будет обладать «лучшей» ПФ, в его верхней зоне должна существовать область невозмущенного ламинарного движения жидкости. Следовательно, в этой области величина $D(y)$ будет малой, а интегральная величина α соответственно большой. В другом предельном случае, когда реализуется самая «плохая» ПФ, эмульсия в отстойнике будет интенсивно перемешиваться, вплоть до верхних маточников. При этом величина $D(y)$ будет везде большой, а величина α соответ-

* Для упрощения расчетов отстойная зона считается прямоугольной, концентрация дисперсной фазы — малой.

ственно малой. Для этих предельных случаев (3.17) можно записать в виде

$$\mathcal{L}(V) = \begin{cases} 1 - \frac{v_k(V)}{v_n}, & \text{если } \frac{v_k(V)}{v_n} < 1 \\ 0, & \text{если } \frac{v_k(V)}{v_n} > 1 \end{cases} \quad (7.18)$$

$$\mathcal{L}(V) = \left(1 + \frac{v_k(V)}{v_n}\right)^{-1} \quad (7.19)$$

Формула (7.18) полностью совпадает с (7.12), соответствующей ПФ для отстойников с торцевым и распределенным вводами сырья.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ОТСТОЙНЫХ АППАРАТАХ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ИХ РАБОТЫ

Во всех предыдущих расчетах ПФ предполагалось, что в зоне отстоя или в отдельных ее частях (отстойники со щелевыми распределительными головками) соблюдается ламинарный гидродинамический режим. При работе на малых производительностях это предположение, вероятно, всегда будет выполняться. С увеличением производительности в аппаратах могут возникнуть конвективные и турбулентные перемешивания, которые, очевидно, не будут способствовать улучшению качества отстоя. Момент перехода от ламинарного режима к турбулентному зависит не только от производительности, но и от геометрии потока, его вязкости и различного рода возмущений. Критерием оценки перехода ламинарного режима в турбулентный будет служить число Рейнольдса, которое можно вычислить по формуле [125]

$$Re = \frac{v_n d_э}{\nu}, \quad d_э = \frac{4S}{L} \quad (7.20)$$

где v_n — средняя скорость течения нефти в отстойнике; ν — вязкость нефти; $d_э$ — эквивалентный (или гидравлический) диаметр; S — площадь поперечного (по отношению к течению жидкости), сечения аппарата; L — смоченный периметр сечения S .

Заменяя v_n в (7.20) на основании равенства $v_n = Q/S$ и выражая Q в единицах объема отстойника, получим

$$Re = \frac{4mU}{\nu L} \quad (7.21)$$

Если d — диаметр отстойника, а l — его длина, то для отстойника с горизонтальным потоком жидкости $L \approx \pi d$, а для отстойника с вертикальным потоком сырья $L \approx 2(l + d)$. Подставляя значения L в (7.21) и считая, что $U = \pi l d^2/4$, получим следующие равенства для оценки чисел Рейнольдса для отстойников с горизонтальным и вертикальным потоками

$$Re_{гор} \approx \frac{\pi l d}{\nu}, \quad Re_{верт} \approx \frac{\pi l d}{\nu} \cdot \frac{\pi}{2\left(1 + \frac{l}{d}\right)} \quad (7.22)$$

Для существующих конструкций горизонтальных отстойников отношение l/d изменяется в пределах от трех до шести. Учитывая это в (7.22), получим, что для отстойника с вертикальной подачей сырья число Рейнольдса примерно в 2,5—5 раз меньше, чем для отстойника таких же размеров, работающего при тех же условиях и производительностях, но оборудованного торцевыми входными и выходными маточниками. Другими словами, в отстойнике с горизонтальным потоком сырья при повышении производительности момент перехода от ламинарного режима к турбулентному наступит быстрее.

Оценим значение числа Рейнольдса для аппарата с горизонтальным потоком сырья, если $d = 3$ м, $l = 18$ м, $m = 1$ об/ч, $\nu = 0,1$ см²/с. Подставляя эти значения в (7.22), получим $Re_{гор} = 1330$. Поскольку автору неизвестны исследования по определению критического числа Рейнольдса для течения жидкости через емкости типа рассматриваемых отстойников, нельзя точно установить, насколько найденная величина числа Re далека от критической. Однако в первом приближении $Re_{кр}$ можно принять равным $Re_{кр}$ для течения жидкости в круглых трубах, которое примерно равно 2300. Таким образом, когда ламинарный режим отстоя может смениться турбулентным, режимы нормальной эксплуатации отстойников довольно близки к критическим. Этому переходу будут способствовать неоднородность течения вдоль отстойника (особенно в районе входного и выходного маточника) и различного рода гидравлические возмущения, поступающие по системе подачи сырья.

Одновременно со сменой гидродинамического режима изменяется и ПФ отстойника, которая будет ухудшаться и стремиться к некоторой предельной ПФ, характерной для развитого турбулентного режима в отстойнике. Очевидно, что если не ввести никаких дополнительных предположений, то можно всегда обеспечить такой режим перемешивания, при котором отстоя не будет. Поэтому введем необходимое для реальных конструкций условие — в области промежуточного эмульсионного слоя сохраняется область невозмущенного турбулизацией режима. Это условие будем считать выполненным при анализе схем конструкций отстойников.

Для дегидраторов с нижней подачей сырья наличие турбулентного перемешивания в верхней его зоне не будет влиять на вид ПФ, так как крупные капли не могут пройти нижнюю ламинарную зону и поэтому не попадают в область турбулентного перемешивания. Таким образом, ПФ отстойника с нижней подачей сырья нечувствительна к нарушению ламинарного течения жидкости в верхней зоне аппарата.

Для определения «наихудшей» ПФ для дегидратора с горизонтальным потоком сырья при интенсивном турбулентном перемешивании в рабочей зоне аппарата рассмотрим модель отстоя при следующих предположениях. Будем считать, что интенсивность перемешивания однородна по длине аппарата и может меняться только по его высоте. При этом коэффициент турбулентной диффузии является функцией

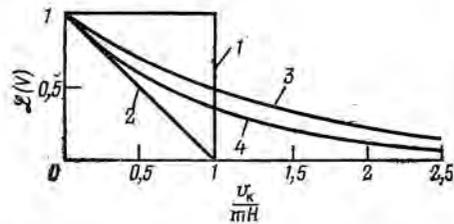


Рис. 7.6. Передаточные функции отстойников:

1 — с нижним вводом сырья; 2 — с объемным распределением эмульсии, торцевым вводом и вводом через щелевые распределительные головки; 3 — вводом через щелевые распределительные головки при условии развитой турбулентности в зоне отстоя; 4 — с торцевым вводом при условии развитой турбулентности в зоне отстоя, m — производительность отстойника в единицах его объема.

только одной поперечной координаты y . Примем среднюю скорость потока по рабочему сечению аппарата постоянной.

Если не учитывать продольное перемешивание, то интенсивность осаждения частиц вдоль оси аппарата можно найти, определив изменение во времени концентрации частиц в некотором поперечном сечении аппарата, движущемся с жидкостью (см. рис. 7.4). Распределение концентрации в этом сечении определяется двумерным диффузионным уравнением с переменным коэффициентом диффузии, решить которое аналитически не удастся. Однако если предположить, что профиль концентрации частиц остается по длине аппарата постоянным, то диффузионное уравнение можно заменить следующими двумя уравнениями с соответствующими граничными условиями

$$D(y) \frac{\partial n(V, y)}{\partial y} - v_{kn}(V, y) = -v_{kn}n_0, \quad n(V, 0) = n_0$$

$$\frac{\partial N(V, t)}{\partial t} = -v_{kn} \frac{n_0}{v_H}, \quad N(V, 0) = N_0, \quad N = \int_0^H n(V, y) dy \quad (7.23)$$

Из совместного решения этих уравнений определим поток частиц, уходящих из аппарата с товарной нефтью, как долю частиц, приходящих с сырой нефтью, т. е. передаточную функцию, которую можно записать в виде

$$\mathcal{L}(V) = e^{-\frac{v_{kn}(V)}{v_H} \beta t}, \quad \beta = \int_0^H \left[1 - \exp\left(-\int_0^y \frac{v_{kn}}{D(y)} dy\right) \right] dy \quad (7.24)$$

При возрастании интенсивности перемешивания, что ведет к увеличению $D(y)$, β стремится к значению H^{-1} , а $\mathcal{L}(V)$ — к функции $\exp\left(-\frac{v_{kn}(V)t}{v_H H}\right)$. График этой предельной ПФ изображен на рис. 7.6, на котором m соответствует производительности отстойника, выраженной в единицах его объема.

Для отстойника со щелевыми распределительными головками, работающего в режиме полного перемешивания в верхней отстойной зоне, ПФ (кривая 3) была получена в предыдущем разделе (см. уравнение 7.18).

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ И СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ НА ПЕРЕДАТОЧНУЮ ФУНКЦИЮ ОТСТОЙНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрим отстойник с нижним вводом сырья, поступающего под слой дренажной воды; схема торцевого сечения отстойника изображена на рис. 7.7. Пусть в процессе работы отстойника образовался промежуточный слой, верхняя граница которого на величину $(H - h)$ выше среднего сечения аппарата. В промежуточном слое реализуются стесненные условия движения эмульгированных капель. Если не учитывать возможные витания капель на верхней границе слоя, то выше этой границы будут попадать только капли, скорость осаждения которых меньше скорости сплошной фазы. Эти капли захватываются потоком нефти и выносятся из аппарата. Так как промышленные отстойники рассчитываются на работу с малым остаточным содержанием воды в товарной продукции, то можно считать, что скорость оседания капель в верхней зоне аппарата подчиняется закону Стокса. Скорость потока сплошной фазы в этой области определяется равенством

$$v_H = v_H^{(0)} / \xi, \quad v_H^{(0)} = \frac{Q(1 - W_{вх})}{S_0}, \quad \xi = \frac{S_h}{S_0} \left[1 - 4 \left(\frac{H - h}{D} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.25)$$

где Q — производительность отстойника по сырой нефти; S_0 — среднее сечение отстойника; $v_H^{(0)}$ — скорость сплошной фазы в расчете на среднее сечение; S_h — сечение отстойника на уровне верхней границы промежуточного слоя; ξ — коэффициент, учитывающий уменьшение сечения отстойника на расстоянии $(H - h)$ выше среднего сечения. При $(H - h) < d/6$ коэффициент ξ с точностью 5% можно заменить единицей.

Подставляя (7.25) в определение ПФ для отстойника с нижней подачей сырья (7.11) и выражая производительность отстойника в единицах его объема, получим

$$\mathcal{L}(V) = \operatorname{sgn} \left(1 - \frac{4v_{kn}\xi}{\pi d m (1 - W_{вх})} \right), \quad m = \frac{4Q}{\pi d^2 L} \quad (7.26)$$

Эта ПФ учитывает высоту промежуточного слоя, концентрацию входной эмульсии и геометрию аппарата, но не учитывает эффекта фильтрации мелких капель при прохождении промежуточного слоя. Поэтому ее можно рассматривать только как верхнюю оценку для истинной ПФ.

Для отстойников с объемным вводом эмульсии выше границы

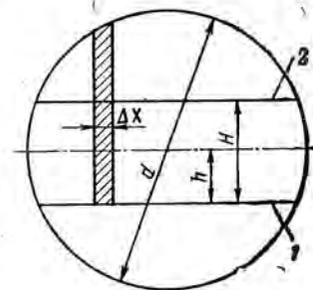


Рис. 7.7. Схема торцевого сечения горизонтального отстойника с нижней подачей сырья: 1 — граница раздела фаз; 2 — верхняя граница эмульсионного слоя.

раздела фаз концентрация эмульсии в основной части промежуточного слоя будет близка к входной концентрации. Для определения скорости осаждения капель в этом слое воспользуемся результатами Моде и Уитмера (1.6).

Будем считать, что эмульсия вводится в концентрационную часть промежуточного слоя. Мысленно разделим объем аппарата, через который проходит подготавливаемая эмульсия, на две непересекающиеся области: промежуточный слой и отстойная зона, расположенная выше верхней границы промежуточного слоя (см. рис. 7.7). Каждая из этих областей может иметь свою ПФ. Произведение этих ПФ определит ПФ отстойника в целом (см. с. 126).

ПФ зоны промежуточного слоя для рассматриваемого случая ввода будет определяться так же, как и для отстойника с объемным вводом сырья условиями

$$\mathcal{L}(V) = \left(1 - \frac{v_k}{v_H}\right) \operatorname{sgn} \left(1 - \frac{v_k}{v_H}\right) \quad (7.27)$$

где v_k и v_H должны определяться с учетом стесненных условий осаждения. ПФ для зоны выше верхней границы промежуточного слоя определяется равенством (7.26).

Считая, что в зоне промежуточного слоя скорость осаждения капель определяется из уравнения (7.25), а скорость сплошной фазы — равенством $v_H = \pi d n / 4$, перемножением (7.26) и (7.27) получим ПФ для отстойника с распределенным вводом сырья

$$\mathcal{L}^{(2)}(V) = \left(1 - \frac{4v_k(1-W_{\text{вх}})^\beta}{\pi d m}\right) \operatorname{sgn} \left(1 - \frac{4v_k \xi}{\pi d m(1-W_{\text{вх}})}\right) \quad (7.28)$$

Как и для предыдущего случая, здесь не учитывается эффект фильтрации дисперсной фазы в промежуточном слое. Поэтому (7.28) является верхней оценкой для истинной ПФ. Графики функций (7.26) и (7.28) представлены на рис. 7.8.

Наличие промежуточного слоя и стесненные условия осаждения, вероятно, вносят поправку и в передаточную функцию отстойника с горизонтальным потоком сырья. Однако, в отличие от уже рассмотренных конструкций, для которых она определялась довольно просто, записать ее в формульном виде пока не удается. Поэтому можно только предполагать, что причиной нарушения устойчивости работы

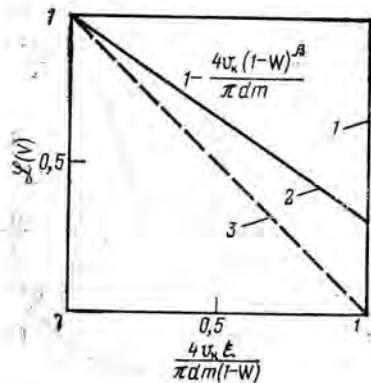


Рис. 7.8. Графики передаточных функций отстойных аппаратов с учетом стесненных условий осаждения и концентрации исходной эмульсии:

1 — нижняя подача сырья; 2 — объемная подача сырья; 3 — объемная подача без учета его обводненности.

отстойника с горизонтальным потоком сырья является захват и унос с товарной нефтью верхней части промежуточного слоя при его нарастании.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ВОДЫ В ПОДГОТОВЛЕННОЙ НЕФТИ

Для удобства дальнейших вычислений запишем ПФ, определенные в предыдущих разделах, в следующем виде (табл. 7.1).

$$X_1 = \frac{4k\bar{V}^{2/3}}{\pi d m (1 - W_{\text{вх}})}, \quad k = \frac{2\Delta\rho g}{9\mu} \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{2/3}, \quad X_3 = X_1 (1 - W_{\text{вх}})^{\beta+1}$$

\bar{V} — средний объем капель.

Определение остаточной воды в подготовленной нефти эквивалентно вычислению коэффициента усиления отстойного аппарата по воде [см. (7.4)]. При заданных ПФ отстойника и плотности распределения $p(V)$ эмульгированных капель по размерам в сырой нефти. Последняя функция определяется экспериментально методами седиментационного анализа или прямого счета частиц различных фракций (см. с. 172). Получаемые численные значения обычно неудобны для дальнейшего анализа и использования при расчетах, поэтому их, как правило, аппроксимируют каким-либо известным параметрическим распределением.

В качестве аппроксимирующего распределения в литературе часто используют гамма-распределение и логарифмически нормальное распределение. В ряде случаев оба эти распределения приводят к удовлетворительным результатам одновременно, что довольно просто можно объяснить на основе диаграмм Джонсона — Пирсона [122].

Таблица 7.1

Номер ПФ	Отстойник	ПФ	Примечание
1	С восходящим потоком сырья	$\mathcal{L}^{(1)} = \operatorname{sgn} \left[1 - X_1 \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^{2/3}\right]$	Промежуточный слой не учитывается
2	С горизонтальным потоком сырья без учета промежуточного слоя	$\mathcal{L}^{(2)} = \left[1 - X_1 \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^{2/3}\right] \times \operatorname{sgn} \left[1 - X_1 \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^{2/3}\right]$	То же
3	С распределенным вводом сырья	$\mathcal{L}^{(3)} = \left[1 - X_3 \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^{2/3}\right] \times \operatorname{sgn} \left[1 - X_1 \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^{2/3}\right]$	С учетом промежуточного слоя

Пусть распределение капель эмульсии в сырой нефти является гамма-распределением с параметром формы β

$$\rho(V) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \left(\frac{\beta}{V}\right)^\beta V^{\beta-1} \exp\left(-\frac{\beta}{V} V\right) \quad (7.29)$$

Подставляя (7.29) и ПФ из табл. 7.1 в (7.4) и вычисляя интеграл, получим

$$\mathcal{K}_W^{(1)} = \frac{1}{\Gamma(\beta+1)} \gamma\left(\beta+1, \frac{\beta}{X_1^{3/2}}\right) \quad (7.30)$$

$$\mathcal{K}_W^{(2)} = \mathcal{K}_W^{(1)} - \frac{X_1}{\beta^{2/3}\Gamma(\beta+1)} \gamma\left(\beta+\frac{5}{3}, \frac{\beta}{X_1^{3/2}}\right) \quad (7.31)$$

$$\mathcal{K}_W^{(3)} = \mathcal{K}_W^{(1)} - \frac{X_3}{\beta^{2/3}\Gamma(\beta+1)} \gamma\left(\beta+\frac{5}{3}, \frac{\beta}{X_1^{3/2}}\right) \quad (7.32)$$

где $\gamma(\alpha, Z) = \int_0^Z t^{\alpha-1} e^{-t} dt$ — неполная гамма-функция.

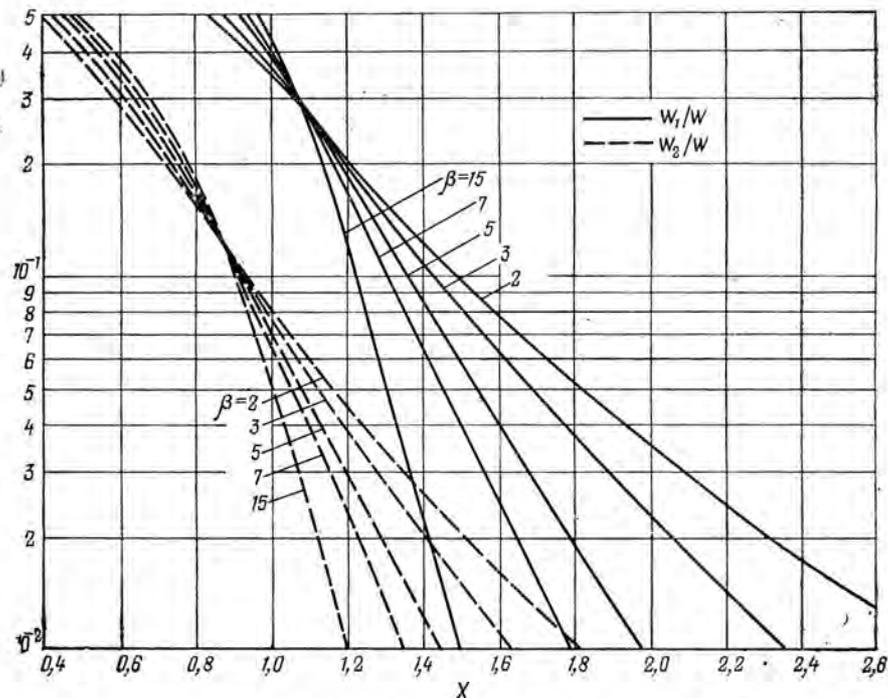
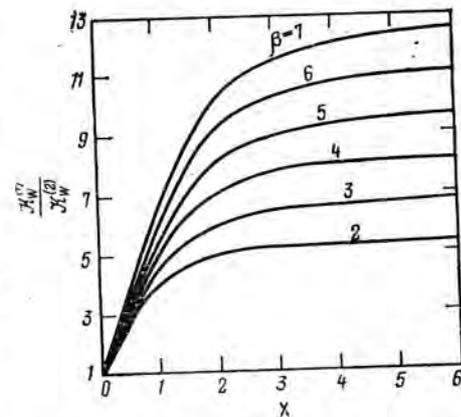


Рис. 7.9. Зависимости коэффициентов усиления отстойников с разными передаточными функциями от безразмерных переменных X_1 и β при гамма-распределении капель эмульсии по объемам.

Рис. 7.10. Зависимость отношения остаточных обводненностей нефтей на выходе отстойников с различными передаточными функциями от безразмерных параметров X и β при гамма-распределении капель по объемам.



Зависимости $\mathcal{K}_W^{(1)}$ и $\mathcal{K}_W^{(2)}$ от X_1 при различных значениях β представлены на рис. 7.9. Верхний индекс у коэффициента усиления соответствует номеру ПФ в табл. 7.1.

Для сравнения по остаточной воде отстойников с разными передаточными функциями рассмотрим отношение

$$\frac{\mathcal{K}_W^{(1)}}{\mathcal{K}_W^{(2)}} = \frac{\gamma\left(\beta+1, \frac{\beta}{X_1^{3/2}}\right)}{\gamma\left(\beta+1, \frac{\beta}{X_1^{3/2}}\right) - \frac{X_1}{\beta^{2/3}} \gamma\left(\beta+\frac{5}{3}, \frac{\beta}{X_1^{3/2}}\right)} \quad (7.33)$$

Графики зависимости этого отношения от X_1 при различных значениях β представлены на рис. 7.10.

Рассмотрим теперь случай, когда распределение частиц эмульсии по объемам на входе в отстойник аппроксимируется логарифмически нормальным распределением. Для безразмерной величины y это распределение обычно записывается в виде

$$\rho(y) = \frac{1}{y\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} (\ln y - \mu)^2\right\} \quad (7.34)$$

Здесь μ и σ не являются параметрами среднего и дисперсии, как в нормальном распределении, а связаны с ними взаимнооднозначными соотношениями

$$\bar{y} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}, \quad D(y) = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1) \quad (7.35)$$

Чтобы перейти от записи логнормального распределения для безразмерной величины (7.34) к распределению для размерной величины объемов частиц положим $y = V/\bar{V}$ и, пользуясь правилом преобразования для определения плотности распределения функции случайной величины [122], получим

$$\rho(V) = \frac{1}{V\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\ln \frac{V}{\bar{V}} - \mu\right)^2\right\} \quad (7.36)$$

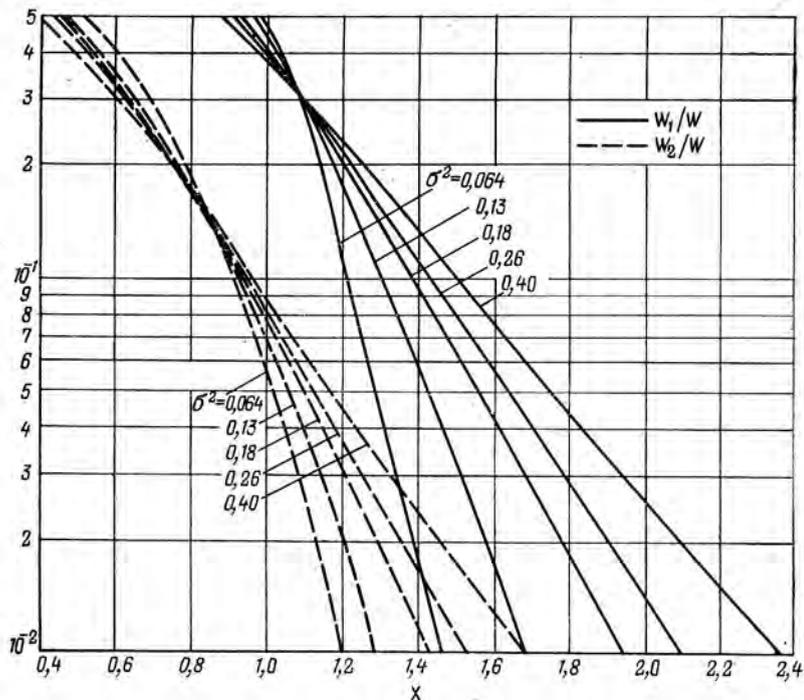


Рис. 7.11. Зависимости коэффициентов усиления отстойников с разными передаточными функциями от безразмерных переменных X и σ^2 при логнормальном распределении капель эмульсии по объемам.

Параметры μ и σ безразмерные. Первые два момента этого распределения определяются соотношениями

$$\bar{V} = \bar{V} e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}, \quad \mu_2 = \int_0^{\infty} V^2 \rho(V) dV = \bar{V}^2 e^{2(\mu + \sigma^2)} \quad (7.37)$$

из которых получаем

$$\mu + \frac{\sigma^2}{2} = 0, \quad \mu_2 = \bar{V}^2 e^{\sigma^2} \quad (7.38)$$

Подставляя (7.36) и ПФ из таблицы (7.1) в (7.4) и вычисляя интеграл, получим

$$\mathcal{K}_W^{(1)} = F \left[-\frac{1}{\sigma} \left(1,5 \ln X_1 + \frac{\sigma^2}{2} \right) \right] \quad (7.39)$$

$$\mathcal{K}_W^{(2)} = \mathcal{K}_W^{(1)} - X_1 e^{\frac{5}{9}\sigma^2} F \left[-\frac{1}{\sigma} \left(1,5 \ln X_1 + \frac{7\sigma^2}{6} \right) \right] \quad (7.40)$$

$$\mathcal{K}_W^{(3)} = \mathcal{K}_W^{(1)} - X_3 e^{\frac{5}{9}\sigma^2} F \left[-\frac{1}{\sigma} \left(1,5 \ln X_1 + \frac{7}{6} \sigma^2 \right) \right] \quad (7.41)$$

где $F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ — интеграл вероятности.

На рис. 7.11 приведены зависимости $\mathcal{K}_W^{(1)}$ и $\mathcal{K}_W^{(2)}$ от X_1 при различных параметрах σ , связанных с параметром β в предыдущих расчетах равенством

$$\ln \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) = \sigma^2 \quad (7.42)$$

Выполнение этого равенства эквивалентно сохранению для обеих распределений отношения μ_2/\bar{V}^2 .

Полученные соотношения позволяют не только оценить остаточное содержание воды в подготовленной нефти, но и исследовать чувствительность процесса обезвоживания к различным технологическим параметрам его ведения, а также к дисперсному составу и обводненности сырой нефти.

При определении ПФ отстойников эффект от процесса межкапельной коалесценции, который может существенно влиять на качество обезвоживания, не учитывался. Интенсивность коалесценции капель при прочих равных условиях определяется временем их пребывания в отстойнике, которое можно оценить.

Для отстойника с горизонтальным потоком сырья время пребывания капли объема V зависит от высоты h ее начального положения над уровнем раздела фаз и от скорости осаждения. Численно это время можно оценить из равенства

$$t = \begin{cases} \frac{h}{v_K}, & \text{если } \frac{h}{v_K} < t_0 \\ t_0, & \text{если } \frac{h}{v_K} \geq t_0 \end{cases} \quad (7.43)$$

где t_0 — время пребывания сплошной фазы в зоне отстоя. Отсюда видно, что с увеличением размера капли, время ее пребывания в зоне отстоя уменьшается.

Для отстойника с восходящим потоком сырья время пребывания капли в зоне отстоя определяется следующим уравнением

$$\frac{dh}{dt} = v_{II}(h) - v_K \quad (7.44)$$

где h — расстояние от границы раздела фаз, а v_{II} — скорость вос-

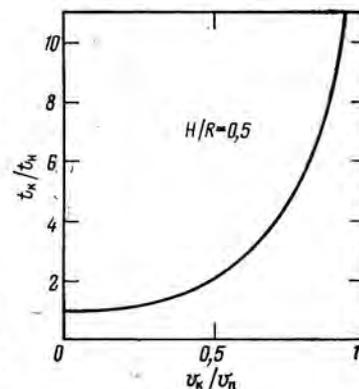


Рис. 7.12. Зависимость отношения длительностей подъема на высоту H от середины отстойника с восходящим потоком сырья капли и нефти от отношения скоростей осаждения капли и подъема нефти.

ходящего потока сырья на этой высоте. Решая это уравнение и отсчитывая h от середины аппарата, где реализуется минимальная величина $v_{\pi}(0)$, получим, что время, в течение которого капля проходит со скоростью свободного осаждения v_k расстояние h от середины аппарата, определяется равенством

$$\frac{y}{A} + \frac{1}{A^2} \left(\frac{\pi}{2} - \arccos y \right) + \frac{2}{A^2 \sqrt{1-A^2}} \operatorname{arctg} \frac{1 - \sqrt{\frac{1+y}{1-y}}}{1 + \sqrt{\frac{1+y}{1-y}}} \sqrt{\frac{1+A}{1-A}} =$$

$$= 2 \frac{v_{\pi}(0)}{d} t_k, \quad y = \frac{2h}{d}, \quad A = \frac{v_k}{v_{\pi}(0)} \quad (7.45)$$

Время, за которое это же расстояние проходит сплошная фаза, определяется уравнением

$$\frac{1}{2} (y \sqrt{1-y^2} + \arcsin y) = 2 \frac{v_{\pi}(0)}{d} t_{\pi} \quad (7.46)$$

На рис. 7.12 приведен расчетный график зависимости отношения t_k/t_{π} при $y = 0,5$ от относительной скорости оседания капель. (При меньших значениях y графики практически совпадают с приведенным.) Из графика видно, что в данном случае, в отличие от отстойника с горизонтальным потоком сырья, время пребывания капель возрастает одновременно с увеличением их размера, или точнее — скорости оседания. Увеличение времени пребывания капель в отстойной зоне приводит к их накоплению и, как следствие, к увеличению межкапельной коалесценции, что способствует улучшению ПФ и КУО по сравнению с рассмотренными.

ОСНОВЫ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕССОЛИВАНИЯ НЕФТЕЙ

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВОК ОБЕССОЛИВАНИЯ ПО ДАННЫМ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В настоящее время практически единственным параметром, по которому оценивается работа установок обессоливания, является остаточное содержание солей в товарной нефти. Однако такую оценку нельзя считать удовлетворительной, поскольку важно знать не только остаточное содержание солей в нефти, но и как оно получено; для этого нужно учитывать качество сырья, поступающего на обессоливание, число ступеней в установке, расход промывочной воды и т. д. Рассмотрим методику оценки эффективности установок обессоливания, которая позволяет получить объективные характеристики их работы.

Вначале рассмотрим работу одной ступени обессоливания. Если на вход i -й ступени обессоливания поступает нефть, содержащая $W_{\text{вх}}^{(i)}$ воды и $S_{\text{вх}}^{(i)}$ солей, то, обобщая результаты гл. IV, можно записать следующее уравнение для определения остаточного содержания солей в подготовленной нефти

$$S_{\text{вых}}^{(i)} = S_{\text{вх}}^{(i)} m_{\text{об}}^{(i)} m_{\text{см}}^{(i)}, \quad m_{\text{об}}^{(i)} = \frac{W_{\text{вых}}^{(i)}}{W_{\text{вх}}^{(i)}} \quad (8.1)$$

Здесь $m_{\text{об}}^{(i)}$ — безразмерный коэффициент, показывающий степень обезвоживания исходной эмульсии; $W_{\text{вых}}^{(i)}$ — содержание воды в подготовленной нефти; $m_{\text{см}}^{(i)}$ — безразмерный коэффициент, характеризующий степень снижения средней концентрации солей в воде на выходе установки по сравнению со средней концентрацией на входе. Этот коэффициент зависит от количества промывочной воды от обводненности сырья и от качества смешения пластовой и промывочной воды на данной ступени обессоливания.

При полном смешении пластовой и промывочной воды величина $m_{\text{см}}^{(i)}$ определяется соотношением

$$m_{\text{см}}^{(i)} = \left(1 + \frac{W_{\text{пр}}^{(i)}}{W_{\text{вх}}^{(i)}} \right)^{-1} \quad (8.2)$$

$m_{\text{см}}^{(i)}$ — это минимальная величина при заданных $W_{\text{пр}}^{(i)}$ и $W_{\text{вх}}^{(i)}$. В практических условиях $m_{\text{см}}^{(i)}$ может изменяться в пределах от вели-

чины, определяемой равенством (8.2), до 1. При $m_{см}^{(i)} = 1$ промывочная вода либо не подается, либо процесс смешения исходной воды, содержащейся в нефти, с промывочной водой полностью отсутствует.

Минимальное значение остаточного содержания солей в нефти при заданных величинах $S_{вх}^{(i)}$, $W_{вх}^{(i)}$ и $W_{пр}^{(i)}$, как видно из (8.1), достигается при минимальных значениях $m_{об}^{(i)}$ и $m_{см}^{(i)}$, которые можно реализовать на данной установке. Однако если минимальное значение $m_{см}^{(i)}$ можно вычислить по формуле (8.2), то минимальное значение $m_{об}^{(i)}$ нельзя определить теоретически, поскольку нет данных о минимальном значении $W_{вх}^{(i)}$. Тем не менее эту величину можно задать, зная качество обезвоживания на существующих установках.

Подставляя в (8.1) минимальное значение $m_{см}^{(i)}$ (8.2) и минимальное значение выходной воды, которое обозначим через $\hat{W}_{вх}^{(i)}$, вычислим минимальное значение остаточного содержания солей в нефти на выходе одной ступени обессоливания*. Обозначая эту величину $\hat{S}_{вх}^{(i)}$, получим

$$\hat{S}_{вх}^{(i)} = S_{вх}^{(i)} \hat{m}_{об}^{(i)} \hat{m}_{см}^{(i)}, \quad \hat{m}_{об}^{(i)} = \frac{W_{вх}^{(i)}}{W_{вх}},$$

$$\hat{m}_{см}^{(i)} = \left(1 + \frac{W_{пр}^{(i)}}{W_{вх}^{(i)}}\right)^{-1} \quad (8.3)$$

Отношение $\hat{S}_{вх}^{(i)}$ к $S_{вх}^{(i)}$ для рассматриваемой ступени, которое характеризует долю использования потенциальных возможностей ступени обессоливания, назовем коэффициентом использования потенциальных возможностей (КИПВ) i -й ступени и обозначим его $\kappa_S^{(i)}$.

Из определения КИПВ получаем

$$\kappa_S^{(i)} = \frac{\hat{m}_{об}^{(i)}}{m_{об}^{(i)}} \cdot \frac{\hat{m}_{см}^{(i)}}{m_{см}^{(i)}} \quad (8.4)$$

где $m_{об}^{(i)}$ и $m_{см}^{(i)}$ — реальные величины для рассматриваемой ступени обессоливания.

Величина $m_{см}^{(i)}$ может быть определена из соотношения (8.1), в котором все остальные величины известны.

Вводя КИПВ аппарата (или блока) для отделения воды и КИПВ блока смешения, которые определим как

$$\kappa_{об}^{(i)} = \frac{\hat{m}_{об}^{(i)}}{m_{об}^{(i)}} = \frac{\hat{W}_{вх}^{(i)}}{W_{вх}^{(i)}}, \quad \kappa_{см}^{(i)} = \frac{\hat{m}_{см}^{(i)}}{m_{см}^{(i)}} \quad (8.5)$$

запишем (8.4) в виде

$$\kappa_S^{(i)} = \kappa_{об}^{(i)} \kappa_{см}^{(i)} \quad (8.6)$$

т. е. КИПВ ступени обессоливания численно равен произведению величин КИПВ блока отделения воды и блока смешения.

* Здесь и далее символ $\hat{\ } ($ «крышечка» $)$ обозначает минимальную величину.

Рассмотрим теперь, как можно записать КИПВ двух последовательных ступеней обессоливания или, другими словами, КИПВ двухступенчатой схемы обессоливания, который мы обозначим через $\kappa_S^{(1,2)}$. Содержание солей на выходе II ступени обессоливания определяется соотношением (8.1), если вместо $S_{вх}^{(2)}$ и $W_{вх}^{(2)}$ подставить величины $S_{вх}^{(1)}$ и $W_{вх}^{(1)}$. При этом получим

$$S_{вх}^{(2)} = S_{вх}^{(1)} m_{об}^{(1)} m_{см}^{(1)} m_{об}^{(2)} m_{см}^{(2)} \quad (8.7)$$

Учитывая, что

$$m_{об}^{(1)} m_{об}^{(2)} = \frac{W_{вх}^{(2)}}{W_{вх}^{(1)}} = m_{об}^{(1,2)} \quad (8.8)$$

для вычисления КИПВ двухступенчатой установки обессоливания получим выражение*

$$\kappa_S^{(1,2)} = \frac{\hat{m}_{об}^{(1,2)}}{m_{об}^{(1,2)}} \cdot \frac{\hat{m}_{см}^{(1)}}{m_{см}^{(1)}} \cdot \frac{\hat{m}_{см}^{(2)}}{m_{см}^{(2)}} = \kappa_{об}^{(1,2)} \kappa_{см}^{(1)} \tilde{\kappa}_{см}^{(2)} \quad (8.9)$$

Величина коэффициента смешения $\tilde{\kappa}_{см}^{(2)}$ в общем случае не превышает величины $\kappa_{см}^{(2)}$, которая была нами определена без учета работы ступени обессоливания. Различие между ними хорошо видно из их отношения

$$\frac{\tilde{\kappa}_{см}^{(2)}}{\kappa_{см}^{(2)}} = \frac{(W_{вх}^{(1)} + W_{пр}^{(1)}) \hat{W}_{вх}^{(1)}}{(W_{вх}^{(1)} + W_{пр}^{(1)}) W_{вх}^{(1)}} \quad (8.10)$$

Для практического случая, когда выполняется условие $W_{пр}^{(2)} \gg \gg W_{вх}^{(1)}$ (8.10), можно записать в виде

$$\tilde{\kappa}_{см}^{(2)} = \kappa_{см}^{(2)} \kappa_{об}^{(1)} \quad (8.11)$$

Подставляя (8.11) в (8.9) получим

$$\kappa_S^{(1,2)} = \kappa_{об}^{(1)} \kappa_{см}^{(1)} \kappa_{об}^{(2)} \kappa_{см}^{(2)} \kappa_{об}^{(1)} = \kappa_S^{(1)} \kappa_S^{(2)} \kappa_{об}^{(1)} \quad (8.12)$$

Значения КИПВ блоков обезвоживания и смешения двухступенчатой схемы обессоливания будут определяться равенствами

$$\kappa_{об}^{(1,2)} = \kappa_{об}^{(1)} \kappa_{об}^{(2)}, \quad \kappa_{см}^{(1,2)} = \kappa_{см}^{(1)} \kappa_{см}^{(2)} \kappa_{об}^{(1)} \quad (8.13)$$

Проводя аналогичные выкладки, можно получить следующее выражения для вычисления общего КИПВ трехступенчатой схемы обессоливания, а также суммарных КИПВ блоков обезвоживания и смешения:

$$\kappa_S^{(1,2,3)} = \kappa_S^{(1)} \kappa_S^{(2)} \kappa_S^{(3)} \kappa_{об}^{(1)} \kappa_{об}^{(2)}$$

$$\kappa_{об}^{(1,2,3)} = \kappa_{об}^{(1)} \kappa_{об}^{(2)} \kappa_{об}^{(3)} \quad (8.14)$$

$$\kappa_{см}^{(1,2,3)} = \kappa_{см}^{(1)} \kappa_{см}^{(2)} \kappa_{см}^{(3)} \kappa_{об}^{(1)} \kappa_{об}^{(2)} \quad (8.15)$$

* Верхний значок \sim («волна») показывает, что на этот параметр может влиять качество работы предыдущей ступени обессоливания.

Таблица 8.1

НПЗ	Номер Уста- новки	Сырая нефть		Промывочная во- да, %, по сту- пеням			Подготовленная нефть по ступеням						
		Т, °С	S _{вх} , мг/л	W _{вх} , %	I	II	III	S _{вых} ⁽¹⁾ , мг/л	W _{вых} ⁽¹⁾ , %	S _{вых} ⁽²⁾ , мг/л	W _{вых} ⁽²⁾ , %	S _{вых} ⁽³⁾ , мг/л	W _{вых} ⁽³⁾ , %
Киряшский	1	70	1051	0,9	5,1	7,0	779	0,52	141	0,32	14	0,1	
	2	140	1152	0,9	4,5	—	81	0,45	8	0,16	—	—	
	3	140	658	0,57	4,0	—	25	0,37	10,2	0,15	—	—	
Ангарский	1	70	378	2,2	5	3	291	2,2	41	0,4	10,2	0,1	
	2	110	378	2,2	5	3	140	0,8	17	0,18	8,2	0,1	
Рязанский	1	80—	1366	1,37	4	6	361	0,8	72	0,46	11	0,1	
	2	115	—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	
Московский	1	90	1129	1,33	3	5	101	0,2	7	0,1	—	—	
	2	90	970	1,4	3,3	2,6	150	0,28	25	0,1	4,6	0,1	

Таблица 8.2**

Завод НПЗ	Номер Уста- новки	КИПВ Уста- новки	КИПВ блока обезво- живания	КИПВ блока смешива- ния	КИПВ по ступеням									
					K _{об} ⁽¹⁾	K _{см} ⁽¹⁾	K _{об} ⁽²⁾	K _{см} ⁽²⁾	K _{об} ^(1,2)	K _{см} ^(1,2)	K _{об} ⁽³⁾	K _{см} ⁽³⁾		
Киряшский	1	0,003	0,59	0,47	19	12	2,3	28	0,86	0,59	3,36	100	14	14
	2	6,6*	13,6	49*	22	128*	22*	49	30	13,6	49*	6,6*	14	14
	3	3,9*	17,8	22*	27	224*	27	66	14	17,8	22*	3,9*	100	14
Ангарский	1	0,06	1,8	3,2	4,5	40	67	67	27	1,8	26,8	1,0	14	14
	2	0,07	9,1	0,76	12	30	3,6	38	29	9,1	11,4	1,0	100	6,7
Рязанский	1	0,08	1,6	5,1	12,5	56	7	54	12	2,7	30,2	0,8	58	9,8
	1	7,1	50	14,2	50	51	26	28	28	50	14,2	7,1	100	6
Московский	1	0,16	36	0,45	36	38	13,7	20	20	36	7,6	2,7	100	6

* Для приведения K_{см}⁽¹⁾ к 100% на ЭЛОУ-1 и ЭЛОУ-2 Киряшского НПЗ были сделаны поправки на S_{вых}⁽¹⁾ по этим установкам и в расче-
тах они принимались равными соответственно 114 и 54 мг/л. Поэтому общие КИПВ установок завышены не менее чем в 1,5—2 раза.

** Значения всех КИПВ в табл. 8.2 даны в %.

Воспользуемся этой методикой для сравнения работы различных установок обессоливания по данным квартальных отчетов заводов, приведенным в табл. 8.1. Непосредственное сравнение между собой отдельных показателей не позволяет прийти к какому-либо однозначному заключению о качестве их работы.

Остаточное содержание воды в нефти после I и II ступеней обессоливания для нормально функционирующих установок обычно имеет величину 0,1—0,2%. Будем считать, что на существующих установках реально можно достигнуть остаточного содержания воды 0,1%. Принимая это значение за минимальную величину остаточной воды, рассчитаем КИПВ работы отдельных ступеней установок, данные о которых приведены в табл. 8.1. Результаты этих расчетов сведены в табл. 8.2, где все величины приведены в %. Величины K_S⁽ⁱ⁾ вычисляем по формуле (8.6), в которой величины K_{об}⁽ⁱ⁾ и K_{см}⁽ⁱ⁾ рассчитывали по формулам:

$$K_{об}^{(i)} = \frac{0,1}{W_{вых}^{(i)}} 100\%, \quad K_{см}^{(i)} = \frac{S_{вх}^{(i)} W_{вых}^{(i)}}{(W_{вх}^{(i)} + W_{пр}^{(i)}) S_{вых}^{(i)}} 100\% \quad (8.16)$$

В табл. 8.2 приведены также результаты расчета КИПВ установок в целом и суммарных КИПВ блоков обезвоживания и смешения, рассчитанных по формулам (8.9), (8.10), (8.13), (8.14) и (8.15). Данные табл. 8.2 наглядно показывают эффективность работы отдельных установок и их блоков обезвоживания и смешения.

Метод расчета КИПВ отдельных ступеней и всей установки в целом позволяет не только объективно количественно оценить эффективность работы установки, но и выявить слабые звенья, лимитирующие дальнейшее улучшение ее работы.

Рассмотренная методика может быть полезна и для анализа отчетных данных заводов в министерствах и ведомствах, когда желательно сравнение эффективности работы различных установок.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РАЗРУШЕНИЯ БРОНИРУЮЩИХ ОБОЛОЧЕК

Низкая эффективность процесса смешения может определяться как плохой организацией транспортной стадии коалесценции дисперсной фазы в этом процессе, (см. гл. 7) так и наличием бронирующих оболочек на каплях пластовой воды. Степень разрушения бронирующих оболочек можно оценить по суммарному количеству солей в нескоалесцировавших каплях после длительного и интенсивного смешения пластовой и промывочной воды. Допустим, что для проведения опыта взята навеска нефти с исходным содержанием солей и воды соответственно S_{вх} и W_{вх}. После добавления к нефти промывочной воды W_{пр} и последующего длительного смешения часть мелких капель пластовой воды суммарным объемом Δ и с содержанием S_Δ солей не смешивается с промывочной водой из-за наличия на каплях пластовой воды неразрушенных бронирующих оболочек. Остальная часть пла-

стовой воды объемом $W_{вх} - \Delta$ полностью смешивается с промывочной водой и образует эмульсию с концентрацией солей в отдельных каплях, удовлетворяющей соотношению

$$C = \frac{S_{вх} - S_{\Delta}}{W_{пр} + W_{вх} - \Delta} \quad (8.17)$$

Эту концентрацию солей можно замерить в воде, отделяющейся при отстое исследуемой пробы после смешения. Учитывая условие $W_{пр} \gg \Delta$, которое всегда выполняется на практике, определяем из (8.17) количество солей в несмешавшейся части пластовой воды

$$S_{\Delta} = S_{вх} - C (W_{пр} + W_{вх}) \quad (8.18)$$

В дальнейшем величина S_{Δ} иногда будет называться количеством остаточных, или невымытых солей, а величина $(S_{вх} - S_{\Delta})$ — количеством вымытых солей. Более показательной величиной для процесса смешения является не абсолютная величина S_{Δ} , а относительная

$$\delta = \frac{S_{\Delta}}{S_{вх}} = 1 - \frac{C (W_{пр} + W_{вх})}{S_{вх}} \quad (8.19)$$

которую можно рассматривать как долю, или полноту вымывания солей.

Содержание солей в некоалесцировавшей части пластовой воды определяли экспериментально в пробах нефти, которые отбирали после I ступени ЭЛОУ-1 на МНПЗ. Такое место отбора проб было выбрано на основании следующих соображений. Как отмечалось ранее, на выход I ступени проходит вся мелкодисперсная составляющая пластовой воды, которая не скоалесцировала с промывочной водой либо из-за неразрушенных бронирующих оболочек, либо вследствие плохой эффективности процесса смешения (малая интенсивность, малая длительность смешения и др.) перед I ступенью. Бронирующие оболочки продолжают разрушаться деэмульгатором и при прохождении эмульсии через водоотделитель, где она находится около 1 ч. В водоотделителе пластовая и промывочная вода могут также частично смешиваться при прохождении эмульсии через зону электрообработки. Если на выходе из первого аппарата на части каплей бронирующие оболочки не будут разрушены, то эти капли не скоалесцируют при смешении эмульсии с промывочной водой перед II ступенью, а также и при лабораторном смешении *. Определение содержания солей в этих каплях позволяет судить об эффективности работы процесса разрушения бронирующих оболочек при помощи деэмульгатора.

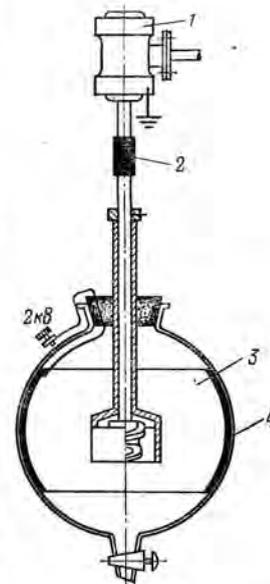
Пластовую и промывочную воды смешивали на лабораторной мешалке ** (рис. 8.1). Конструкция мешалки позволяет проводить смешение в электрическом поле, которое создается в пространстве между

* Длительность движения эмульсии от выхода из первого водоотделителя до смесительного устройства перед II ступенью — обычно несколько десятков секунд.

** Такая мешалка (без внутреннего электрода) используется в методике определения солей в нефти по ГОСТ 2401—62 (см. [1]).

Рис. 8.1. Конструкция мешалки, используемой в опытах по смешению пластовой и промывочной воды:

1 — двигатель; 2 — гибкая соединительная муфта; 3 — электрод; 4 — стеклянная колба.



корпусом смесительного элемента и внешним электродом, расположенным на внутренней стенке корпуса мешалки.

Было проведено несколько серий опытов. В первой серии определяли содержание солей в каплях с неразрушенными оболочками и проверяли влияние электрического поля на коалесценцию капель с неполностью разрушенными оболочками. В этой серии одновременно отбирали две пробы нефти по 250 см³ и одну пробу 50 см³ *. К первым двум пробам добавляли по 25 см³ горячей дистиллированной воды и в течение 30 мин смешивали при 60 °С. Одну пробу перемешивали при выключенном поле, вторую — при включенном электрическом поле напряженностью около 0,5 кВ/см. Третью пробу использовали для определения солей в нефти методом вымывания **. После смешения первые две пробы 30 мин отстаивали при 60 °С. За это время отделялось около 20 см³ воды. В отстаившейся воде определяли концентрацию солей и пересчитывали на количество солей, вымытых из 1 л нефти. Результаты опытов приведены в табл. 8.3.

В этой таблице $S_{вх}$ — исходное содержание солей в нефти, определенное по методике ГОСТ 2401—62; S_1 и S_2 — соответственно коли-

Таблица 8.3

Обозначения	Номер опыта									Средняя величина
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
$S_{вх}$	19,7	38,6	49,3	33,4	18,6	24,0	27,2	16,3	42,0	29,90
S_1	9,1	28,0	42,4	17,4	8,5	9,5	13,9	10,2	36,8	19,50
S_2	6,6	27,6	41,0	16,9	5,4	8,1	9,4	7,1	30,2	16,90
$S_{вх} - S_1$	10,6	10,6	8,9	16,0	10,1	4,5	13,3	6,1	5,2	9,47
$S_{вх} - S_2$	13,1	11,0	8,3	16,5	13,2	15,9	17,8	9,2	11,8	12,98
δ_1	0,54	0,27	0,14	0,48	0,54	0,6	0,49	0,37	0,12	0,39
δ_2	0,66	0,28	0,17	0,49	0,71	0,7	0,65	0,56	0,28	0,50

* Содержание воды в пробах $W_{вх} \approx$ от 0,1 до 0,15%.

** Методы измерения солей и воды в нефти изложены в гл. 9.

чества солей, вымытые из нефти при смешении в электрическом поле

$$\text{и без него; } \delta_1 = \frac{S_{\text{ВХ}} - S_1}{S_{\text{ВХ}}}; \quad \delta_2 = \frac{S_{\text{ВХ}} - S_2}{S_{\text{ВХ}}}.$$

Из данных табл. 8.3 видно, что несмотря на достаточно длительное время смешения нефти с промывочной водой все соли удалить из нефти не удается. В отдельных опытах доля невымытых солей достигает 70% от их исходного содержания. При смешении в электрическом поле во всех опытах удается вымыть больше солей, однако, «эффект поля» достаточно слаб и в среднем вымывание увеличивается всего лишь на 10%.

Для прослеживания динамики разрушения бронирующих оболочек были определены зависимости количества вымываемых солей от времени смешения. Во всех опытах смешение проводили в электрическом поле. Режимы смешения были такие же, как и в предыдущих опытах. На рис. 8.2 приведены две типовые зависимости количества солей, вымытых из нефти, от времени перемешивания. Там же приведены количества солей, вымытых из той же нефти по методике ГОСТ.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. На начальном участке смешения, примерно до 2—3 мин на первой кривой и до 5—7 мин на второй кривой, процесс коалесценции идет на транспортной стадии. Уменьшение количества солей, вымываемых в единицу времени на этом участке, обуславливается уменьшением общего количества мелкодисперсной составляющей пластовой воды в нефти. При дальнейшем смешении процесс коалесценции мелкодисперсной составляющей переходит на кинетическую стадию, что обуславливает малую, но почти постоянную производную на этом участке кривой. Разница между количеством солей в исходных пробах, определяемом по методике ГОСТ, и количеством солей, вымытых из нефти в рассматриваемых опытах, определяется количеством мелкодисперсной составляющей пластовой воды с неразрушенными бронирующими оболочками. Если проведенное рассуждение верно и процесс смешения

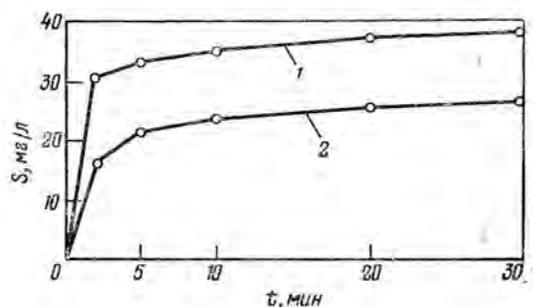


Рис. 8.2. Зависимость количества вымываемых солей из пробы нефти от длительности смешения. Исходное содержание солей в пробах:

1 — 45,4 мг/л; 2 — 34,3 мг/л.

Таблица 8.4

Обозначения	Номер опыта							Среднее значение
	1	2	3	4	5	6	7	
$S_{\text{ВХ}}$	60	24,2	14,8	17,4	18,6	16,4	16,3	23,9
S_1	56,4	24,8	13,2	18	17,2	16,5	15,8	23,1
S_2	48,6	20,6	9,5	14,6	13,7	13,3	12,1	18,9
$S_{\text{ВХ}} - S_1$	3,6	-0,6	1,6	-0,6	1,4	-0,2	0,6	0,8
$S_{\text{ВХ}} - S_2$	11,4	3,6	5,3	2,8	4,9	3,0	4,3	5,0
δ_1	0,6	-0,025	0,10	-0,03	0,07	-0,01	0,03	0,03
δ_2	0,19	0,15	0,36	0,16	0,26	0,18	0,26	0,22

действительно идет на кинетической стадии коалесценции мелкодисперсной составляющей, то разрушение бронирующих оболочек должно произойти за то же время, что и в рассмотренных опытах, и вымыть из пробы все соли.

Для проверки этой гипотезы была проведена серия опытов, в которой бронирующие оболочки разрушали при помощи бензола. В отличие от опытов первой серии навески брали не по 250 см³, а по 150 см³, и к ним добавляли 100 см³ бензола. Все остальные условия опытов такие же, как и в первой серии.

Результаты опытов приведены в табл. 8.4; обозначения в табл. аналогичны обозначениям в табл. 8.3.

Данные таблицы полностью подтверждают, что неполное вымывание солей в предыдущих опытах обусловлено плохим разрушением бронирующих оболочек. Однако полностью соли вымываются только при смешении в электрическом поле. Причем эффект поля в этой серии опытов проявляется сильнее, чем при смешении без бензола (см. табл. 8.3). Для выяснения причины такого явления проведем качественный анализ процесса коалесценции в этой серии опытов. Так как в пробы перед смешением одновременно добавляли бензол и промывочную воду, процесс разрушения бронирующих оболочек проходил во время смешения. Пока оболочки на мелких каплях не разрушены бензолом, процесс вымывания солей идет так же, как и в опытах, результаты которых представлены на рис. 8.2, — вначале быстрое вымывание солей за счет идущей на транспортной стадии коалесценции капель пластовой и промывочной воды, затем процесс вымывания солей переходит на кинетическую стадию коалесценции, в результате чего его скорость резко уменьшается. Влияние бензола на начальном этапе смешения еще не сказывается. Затем оболочки начинают разрушаться, и скорость процесса вымывания солей опять должна возрасти.

Для экспериментального подтверждения такой модели динамики процесса смешения были сняты временные зависимости количества вымытых солей в опытах, аналогичных предыдущим. Смешение проводилось при включенном электрическом поле. Перед смешением в пробы добавляли бензол. На рис. 8.3 представлены два типовых графика, полученные в этих опытах. Из этих графиков видно, что предполагаемая модель смешения полностью подтверждается.

Проанализируем организацию процесса смешения в методике ГОСТ, служащей для определения остаточных солей в нефти методом вымывания [136]. В лабораторную мешалку отбирают 50 см³ нефти, к ней добавляют 50 см³ бензола и 100 см³ горячей дистиллированной воды. Все тщательно перемешивают 5—7 мин. Воду отстаивают, сливают и определяют в ней количество вымытых солей. Затем в мешалку добавляют новую порцию — 100 см³ горячей воды, и операцию повторяют. Порции воды добавляют до тех пор, пока соли перестанут вымываться. Общее количество солей в нефти определяют как сумму вымытых солей.

На основе проведенного ранее разбора механизма смешения пластовой и промывочной воды можно утверждать, что многократный процесс вымывания солей в рассмотренной методике обусловлен некачественной организацией процессов разрушения бронирующих оболочек и транспортной стадии коалесценции. Так как процесс разрушения бронирующих оболочек при помощи бензола длится 20—30 мин, то, даже если хорошо организовать транспортную стадию процесса коалесценции, нельзя полностью «вымывать» соли из нефти за первые 5—10 мин смешения. Бронирующие оболочки могут быть разрушены за время отстоя пробы после первого смешения (обычно 15—25 мин). За время второго смешения соли уже могут быть вымыты полностью. Если это не происходит, то либо плохо организована транспортная стадия процесса коалесценции, либо мала эффективность применяемого растворителя.

Было проведено несколько серий опытов по установлению зависимости количества вымытых солей от длительности смешения. Определение проводили по методике ГОСТ 2401—62. Смешение осуществляли в сферической мешалке (см. рис. 8.1) при 3000 об/мин и 60 °С. Принимая такую длительность смешения как необходимую, была проведена

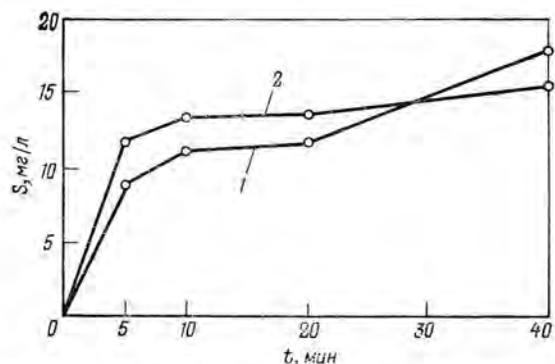


Рис. 8.3. Зависимость количества вымываемых солей из пробы нефти от длительности смешения. Исходное содержание солей в пробах:
1 — 16,5 мг/л; 2 — 16,2 мг/л.

Таблица 8.5

Обозначения	Номер опыта							Средняя величина
	1	2	3	4	5	6	7	
$S_{вх}$	14,8	16	10,7	17,6	10,5	21	12,5	14,73
S_1	13,8	15,8	10,5	15,8	10,4	20,4	13	14,24
$S_{вх} - S_1$	1	0,2	0,2	1,8	0,1	0,6	-0,5	0,485
δ	0,067	0,012	0,019	0,102	0,009	0,029	-0,040	0,028

контрольная сравнительная серия опытов. Для каждого опыта брали две пробы. Из одной пробы содержание солей $S_{вх}$ определяли по методике ГОСТ — с помощью многократного (трехкратного) вымывания. Из другой пробы соли S_1 вымывали путем однократного 40-минутного перемешивания. Результаты опытов приведены в табл. 8.5.

Величина $\delta = \frac{S_{вх} - S_1}{S_{вх}}$ характеризует расхождение измерений при однократном и многократном вымывании. Небольшое превышение величины $S_{вх}$ по сравнению с S_1 можно объяснить ошибками титрования при определении малых солей, вымываемых вторым и третьим смешением.

ПОДБОР И ПРИМЕНЕНИЕ ДЕЭМУЛЬГАТОРА

В предыдущих разделах теоретически и экспериментально было показано, что основным процессом, определяющим глубину обессоливания, является смешение пластовой и промывочной воды, которое, в свою очередь, существенно зависит от степени разрушения бронирующих оболочек на каплях пластовой воды. В связи с этим деэмульгаторы по их эффективности для процессов обессоливания можно сравнивать по их влиянию на процесс смешения (или на степень вымывания солей из нефти).

В настоящее время эффективность деэмульгаторов в процессе обессоливания сравнивают в основном двумя методиками: испытанием в «бомбе» и обессоливанием на лабораторных электрообессоливающих установках. В СССР наиболее широко используется второй метод. При создании аппаратуры для этого метода его авторы уделили много внимания конструированию малогабаритных электрообессоливающих отстойников [5]. Было предложено и запатентовано несколько типов оригинальных электродов для этих аппаратов, позволяющих обеспечивать остаточное содержание воды в подготовленной нефти не выше 0,1—0,15%.

На этих установках смешение осуществляется в мешалках. Длительность смешения определяется производительностью установки и объемом мешалки. Процесс идет непрерывно; средняя длительность пребывания эмульсии в мешалке, т. е. отношение объема мешалки V к производительности установки Q 10—15 мин. В отличие от промышленных установок эмульсия в транспортных трубопроводах макета движется при ламинарном режиме, и смешения в них практически не

происходит. Поскольку мешалку можно рассматривать как реактор с полным перемешиванием, распределение времени пребывания в ней эмульсии подчиняется закону Пуассона, и вероятность нахождения какой-то частицы эмульсии в мешалке не больше времени t определяется равенством

$$P(\tau \leq t) = 1 - \exp\left(-\frac{Q}{V} t\right) \quad (8.20)$$

Долю эмульсии q , которая будет находиться в мешалке время $\tau \leq t$, можно определить из уравнения $q = P(\tau \leq t)$. Так, например, десятая доля эмульсии будет находиться в мешалке не более $0,1 \left(\frac{V}{Q}\right)$ мин,

что для типового случая $\left(\frac{V}{Q}\right) = 15$ мин будет равно 1,5 мин. Поскольку в мешалках объемом в несколько литров организовать однородное интенсивное перемешивание достаточно трудно, для части мелкодисперсной составляющей пластовой воды ни транспортная стадия коалесценции, ни стадия разрушения бронирующих оболочек не обеспечиваются. Поэтому соли, остающиеся в нефти после II ступени обессоливания, уже не могут быть вымыты из нее на III, IV и т. д. ступенях обессоливания. Имеющиеся экспериментальные данные о многоступенчатом (больше двух) обессоливания «стойких» нефтей полностью подтверждают изложенное. Избавиться от рассмотренных выше эффектов неоднородности в процессе смешения можно двумя способами: периодическим смешением в мешалке; смешением на потоке в устройствах, которые можно рассматривать как реакторы идеального вытеснения. Для лабораторного исследования первый способ, по-видимому, удобней, он более прост и более гибок в связи с возможностью варьировать различные параметры.

После того как процесс смешения будет хорошо организован, дальнейшее обезвоживание эмульсии можно проводить любыми известными способами и затем определять количество остаточных или вымытых солей. Чтобы повысить чувствительность методики к малым количествам остаточных солей в нефти желательнее проводить опыты с хорошо обезвоженной или даже с частично обессоленной нефтью*.

Рассмотрим ошибки при приготовлении и подаче деэмульгатора, которые могут снизить его эффективность. В основном — это неправильный выбор мест подачи деэмульгатора и промывочной воды. Места подачи определяются закономерностями транспортной стадии деэмульгатора, его типом («водорастворимый» или «нефтерастворимый») и способом приготовления. Чтобы облегчить выбор мест ввода деэмульгатора и промывочной воды, рассмотрим последовательность этапов процесса разрушения бронирующих оболочек на каплях эмульгированной воды.

* Мелкодисперсная составляющая, которая ограничивает допустимую глубину обессоливания и для разрушения которой мы подбираем деэмульгатор остается в такой нефти практически неизменной.

1. После введения деэмульгатора его необходимо как можно мельче механически раздробить и образовавшиеся частицы равномерно размешать по объему нефти.

2. После механического размешивания деэмульгатора по объему нефти нужно обеспечить его растворение в нефти.

3. В процессе растворения деэмульгатора и после его окончания идет доставка деэмульгатора на капли эмульгированной воды.

Пусть деэмульгатор подается в растворе, капли которого могут коалесцировать с каплями промывочной воды. Если промывочную воду подать до того, как деэмульгатор из капель раствора попадет в нефть, то в результате коалесценции капель раствора с каплями промывочной воды деэмульгатор будет захватываться ими и распределяться по всему объему промывочной воды. Так, при одновременной подаче 2%-ного раствора деэмульгатора из расчета 20 г/т и 5% промывочной воды на прием сырьевого насоса исходная концентрация деэмульгатора за счет разбавления его промывочной водой может быть снижена в 50 раз.

Разберем последствия такого «разбавления» деэмульгатора на диффузионной модели десорбции деэмульгатора из капли. В результате десорбции начальная концентрация деэмульгатора в капле C_0 может быть снижена до некоторой минимальной концентрации C_1 , определяемой предельной концентрацией деэмульгатора в поверхностном слое. Поэтому поток деэмульгатора при десорбции будет зависеть не от C_0 , а от разности $(C_0 - C_1)$, и изменение во времени средней концентрации вещества в капле будет удовлетворять следующему соотношению

$$C_0 - C_1(t) = (C_0 - C_1) \Phi(V, D, t) \quad (8.21)$$

где Φ — функция, зависящая только от размера капли V , коэффициента диффузии D и времени t и стремящаяся к единице при $t \rightarrow \infty$. Обозначая суммарный объем капель через W , а плотность их распределения по размерам через $p(V)$ и учитывая соотношение (8.21), можно записать следующее равенство для количества десорбированных молекул деэмульгатора к моменту времени t

$$N_d(t) = \frac{N_0 - WC_1}{V} \int_0^{\infty} \Phi(V, D, t) p(V) V dV \quad (8.22)$$

где N_0 — начальное количество молекул деэмульгатора. Из (8.22) видно, что при разбавлении деэмульгатора эффективность его использования снижается, так как он в количестве WC_1 остается в исходном растворе. Скорость десорбции деэмульгатора также снижается при его разбавлении. Это хорошо видно из отношения количества десорбированного деэмульгатора за время t из диспергированных растворов с объемами W_1 и W_2 , в которых были растворены одинаковые количества деэмульгатора. На основании (8.22) это отношение можно записать в виде

$$\frac{N_d(t, W_1)}{N_d(t, W_2)} = \frac{N_0 - W_1 C_1}{N_0 - W_2 C_2} \quad (8.23)$$

Полученные выводы о снижении эффективности использования деэмульгатора при его разбавлении водой полностью совпадают с существующими рекомендациями по применению деэмульгаторов, в которых особо подчеркивается, что деэмульгатор должен подаваться в концентрированном растворе. Чтобы избежать разбавления деэмульгатора промывочную воду надо подавать после растворения деэмульгатора и разрушения им бронирующих оболочек на каплях пластовой воды.

Наиболее удаленной и удобной точкой подачи деэмульгатора в промышленных условиях является прием сырьевого насоса. Деэмульгатор дробится, и образующиеся макрочастицы перемешиваются с нефтью в насосе и в транспортном трубопроводе. Растворение деэмульгатора в основном протекает в теплообменной аппаратуре, когда нефть нагревается до нескольких десятков градусов. Время, необходимое для растворения деэмульгатора, можно оценить по среднему времени выхода, которое, как показано в работе [133], определяется по формуле

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{R^2}{15D_d} + \frac{R\gamma\Delta l}{3D_n} \quad (8.24)$$

где D_d и D_n — коэффициенты диффузии в капле и в жидкости; R — радиус капли; Δl — толщина диффузионного подслоя; γ — коэффициент сорбции. Для величин $R \in (20-50) \cdot 10^{-4}$ см; $\Delta l = 10^{-4}$ см; $\gamma \approx 1$; $D_n \approx 10^{-7}$ см²/с; $D_d \approx 10^{-6}$ см²/с, которые характерны для рассматриваемой ситуации*; среднее время выхода, рассчитываемое по (8.24), равно нескольким секундам. Увеличивая это время в несколько раз, получаем, что растворение деэмульгатора происходит за время порядка десятка секунд. В гл. 4 указывалось, что бронирующие оболочки на каплях пластовой воды разрушаются за время порядка минуты. Поскольку время прохождения нефти по теплообменникам также порядка минуты, получаем, что промывочную воду нужно подавать после теплообменной аппаратуры.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Всякое устройство, в котором коалесцируют пластовая и промывочная вода, является смесительным. Поэтому кроме специальных конструкций, называемых смесителями, к смесительным устройствам следует отнести и любой выделенный участок транспортного трубопровода (от места подачи в сырьевой поток промывочной воды вплоть до ввода сырья в электродегидратор). Процесс смешения, очевидно, продолжается и внутри электродегидратора. Поскольку степень смешения является одним из основных показателей, определяющих про-

* Порядок величины Δl оценивали из неравенства $D_T \leq D_0$ внутри диффузионного подслоя.

цесс обессоливания, необходимо иметь возможность сравнивать эффективность работы различных смесительных устройств.

Согласно теории процесса смешения, экспериментальная методика определения эффективности работы любого устройства для смешения пластовой и промывочной воды должна основываться на измерении количества (или доли) мелких капель пластовой воды, которые при движении через это устройство не коалесцируют с промывочной водой. Экспериментально удобнее определять не количество мелких капель, а содержание солей в этих каплях. Практически это можно сделать следующим образом. Отберем две одинаковые по объему пробы нефти в начале и в конце смесительного устройства и проведем обезвоживание этих проб путем длительного отстаивания. Количество солей, которое будет удалено из исходной эмульсии в этих пробах вместе с дренажной водой, равно

$$\begin{aligned} S_1 &= C_1 (W_{\text{пр}} + W_{\text{вх}} - W_{\text{вых}}^{(1)}) \\ S_2 &= C_2 (W_{\text{пр}} + W_{\text{вх}} - W_{\text{вых}}^{(2)}) \end{aligned} \quad (8.25)$$

где S_1 и S_2 — содержание солей в дренажной воде проб, отобранных соответственно до и после обследуемого смесительного устройства; C_1 и C_2 — концентрация солей в дренажной воде этих проб; $W_{\text{пр}}$ и $W_{\text{вх}}$ — количество промывочной воды и исходная обводненность нефти; $W_{\text{вых}}^{(1)}$ и $W_{\text{вых}}^{(2)}$ — остаточные количества воды в пробах. Если качество обезвоживания будет таково, что $(W_{\text{пр}} + W_{\text{вх}}) \gg \max(W_{\text{вых}}^{(1)}, W_{\text{вых}}^{(2)})$, то различие между S_1 и S_2 будет определяться только концентрациями C_1 и C_2 . А поскольку концентрация солей в дренажной воде определяется полнотой смешения пластовой и промывочной воды, то по разности между S_1 и S_2 (или между C_1 и C_2) можно судить о количестве солей, вымытых из нефти при прохождении эмульсии через смесительное устройство. Однако разность $(S_1 - S_2)$ * еще не позволяет судить об эффективности смесительного устройства, поскольку даже при хорошем его качестве она может быть близкой к нулю, если смешение было проведено эффективно до этого устройства.

Для устранения такой неопределенности надо отобрать еще одну пробу после смесительного устройства, обеспечить для этой пробы качественное смешение и после отстоя определить количество вымытых солей S_3 . Это количество солей будет максимальным, которое можно вымыть из исследуемой эмульсии. Величина S_3 будет отличаться от полного количества солей в исследуемой эмульсии** только на количество солей, содержащихся в мелких каплях пластовой воды с неразрушенными бронирующими оболочками. Зная величину S_3 , можно эффективность смесительного устройства выразить как долю вымываемых на нем солей, рассчитываемую по соотношению

$$\delta = \frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_1} \quad (8.26)$$

* $(S_1 - S_2) \geq 0$.

** Полное количество солей в пробе можно определить по методике ГОСТ.

Таблица 8.6

Обозначения	Номер опыта			
	1	2	3	4
S_1	486	817	325	518
S_2	491	824	323	621
S_3	615	976	410	830
δ	0,039	0,044	-0,024	0,34

При сравнении эффективности двух смесительных устройств, на которые поступает одинаковая эмульсия, в качестве S_3 можно принять количество солей, вымываемых из нефти при прохождении через одно из сравниваемых устройств.

В качестве примера применения изложенной методики проанализируем качество работы смесительного устройства, установленного перед первой ступенью ЭЛОУ на одном из отечественных заводов*. Это устройство состоит из двух одинаковых секций труб длиной по 1 м и диаметром 250 мм с вставленными в них поперечными перегородками из вытяжно-просечного железа. В каждой секции для повышения турбулизации потока установлено по 14 перегородок с целью интенсификации процесса смешения. Перепад давления на этом устройстве при производительности установки около 400 м³/ч составляет примерно 1,5 атм. Промывочную воду подавали в сырьевой поток на расстоянии 2 м от смесителя через распределитель, который выполнен в виде перфорированного патрона, установленного на входе двухметрового отрезка сырьевого трубопровода диаметром 150 мм. Транспортный трубопровод от смесителя до аппарата имеет диаметр 300 мм и длину 90 м. После установки в транспортную линию смесителя работа I ступени несколько улучшилась, что было установлено по количеству остаточных солей. Чтобы установить причину такого улучшения, смеситель и участок транспортного трубопровода от смесителя до ввода в аппарат были обследованы параллельно.

Пробы непосредственно перед смесительным устройством и после него отбирали в разделительные сосуды емкостью по 2,5 л, изготовленные на базе типовых разделительных бачков КИП. Аналогичный разделительный сосуд был установлен и непосредственно перед дегидратором. После одновременного (с учетом транспортного запаздывания) заполнения разделительных сосудов нефть в них отстаивали 2 ч. После отстоя проводили дренирование и замеряли количество отстоявшейся воды. Дополнительные измерения показали, что после такого отстоя остаточное количество воды в нефти 0,1—0,2%. В дренажной воде, взятой из каждого разделительного сосуда, определяли количество солей и пересчитывали на количество солей, вымытых из 1 л нефти. Результаты опытов сведены в табл. 8.6.

* Аналогичная конструкция смесительного устройства имеется и на ряде установок других заводов.

Здесь S_1 , S_2 , S_3 — соответственно содержание солей в пробах, отобранных перед смесителем, после смесителя и перед отстойником.

Как видно из данных табл. 8.6, эффективность обследованного смесительного устройства невысока, а процесс смешения происходит в транспортном трубопроводе. Поэтому улучшение качества работы I ступени после установки смесительного устройства обусловлено не самим устройством, а дополнительным трубопроводом длиной 40 м, диаметром 300 мм, который был проложен для привязки смесителя. Причиной низкой эффективности процесса смешения на обследуемом устройстве является малая длительность смешения.

Рассмотренная методика определения качества смешения построена на измерении интегральной характеристики процесса смешения — количества вымываемых солей. Однако знание лишь одной этой величины может быть недостаточным для выявления причин, определяющих качество смешения; для этого в ряде случаев необходимо знать количественные данные о фракционном составе эмульсии и о распределении концентрации солей по фракциям.

Такие характеристики эмульсии можно определить с помощью седиментационного анализа. Для этого весь промежуток времени отстоя пробы делят на определенное число интервалов. Определяя объемы порций воды, отстоявшейся за каждый из этих интервалов, можно построить седиментационные кривые, а измерив количество солей, содержащихся в каждой порции, получим кривые, характеризующие распределение солей по фракциям диспергированной воды.

При проведении соответствующих опытов полный промежуток времени отстоя эмульсии разбивали на семь интервалов: 0—2, 2—5, 5—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—120 мин. Отстаивающуюся за каж-

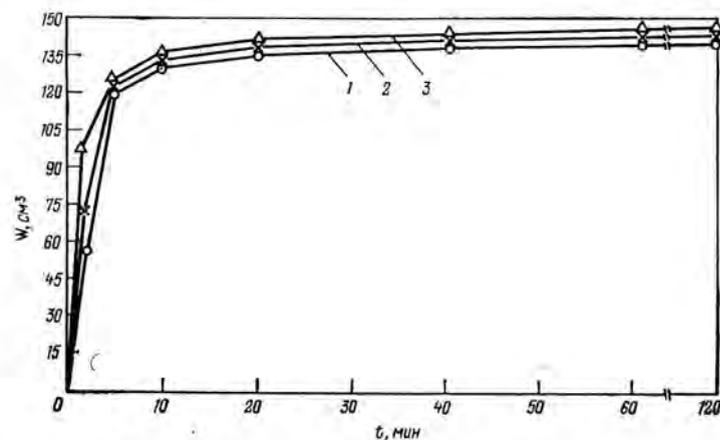


Рис. 8.4. Седиментационные кривые, снятые:

1 — перед смесительным устройством; 2 — после смесительного устройства; 3 — перед электродегидратором.

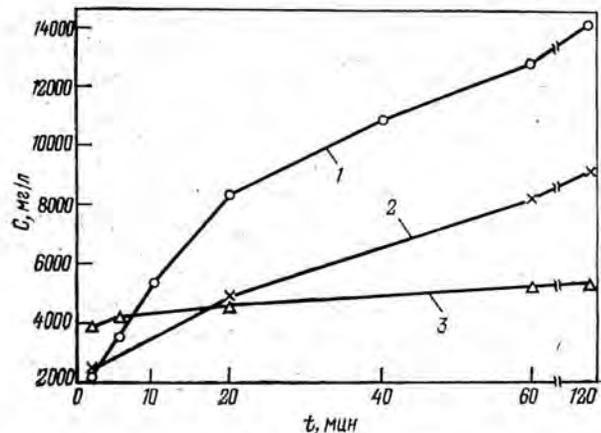


Рис. 8.5. Зависимость от времени концентрации солей в отстаивающейся воде в пробах нефти, отобранных:

1 — перед смесительным устройством; 2 — после смесительного устройства; 3 — перед электродегидратором.

дый интервал времени воду сливали в мерные цилиндры, причем для устранения эффекта задержания оседающих капель воды в промежуточном эмульсионном слое при дренировании воды сливали и небольшую порцию нефти. На основе полученных данных строили седиментационные кривые и кривые распределения количества солей в дренажных пробах, изображенные соответственно на рис. 8.4 и 8.5.

Из рис. 8.4 и 8.5 видно, что перед электродегидратором $C(t) \approx \text{const}$; это показывает почти полную завершенность процесса смешения. Перед и после смесителя седиментационные пробы весьма неоднородны по солености, что характеризует начало процесса смешения.

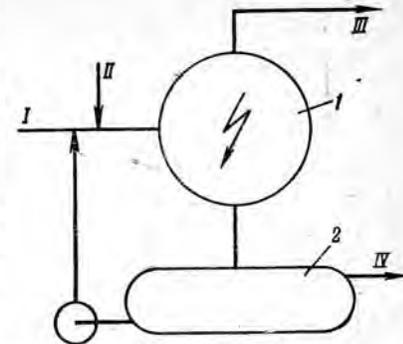
Как неоднократно отмечалось ранее, при полном смешении должно выполняться условие равномерности распределения солей по объему диспергированной воды. Невыполнение этого условия будет характеризовать незаконченность процесса смешения. В практической ситуации даже можно утверждать, что незаконченность процесса смешения определяется плохой организацией транспортной стадии коалесценции, поскольку основную трудность для смешения представляет мелкодисперсная составляющая пластовой воды, которая не оседает при снятии седиментационных кривых.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПОДАЧИ ПРОМЫВОЧНОЙ ВОДЫ ДЛЯ ОБЕССОЛИВАНИЯ И ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

В гл. 4 было показано, что минимально необходимый расход промывочной воды при обессоливании нефти в несколько раз меньше практического расхода воды в этом процессе. Однако формально умень-

Рис. 8.6. Принципиальная схема подачи промывочной воды с рециркуляцией дренажной воды при одноступенчатом обессоливании:

1 — электродегидратор; 2 — емкость для дренажной воды. I — сырая нефть; II — пресная вода; III — обессоленная нефть; IV — дренажная вода.



шить расход пресной промывочной воды без ухудшения качества обессоливания обычно нельзя. Это связано с тем, что количество промывочной воды обратно пропорционально длительности смешения (см. с. 123), а следовательно, ее уменьшение всегда будет приводить к ухудшению качества смешения. Однако связь между качеством смешения и расходом промывочной воды можно значительно ослабить или даже полностью исключить, если снижение расхода пресной промывочной воды компенсировать подачей дренажной воды*. Капли дренажной воды способствуют увеличению суммарной межфазной поверхности, с которой коалесцируют капли пластовой воды. Крупные же капли пресной и дренажной воды коалесцируют между собой значительно быстрее, чем с мелкими пластовыми каплями. Поэтому концентрация солей в них быстро выравнивается.

Рассмотрим, как влияет такая схема подачи промывочной воды на остаточное содержание солей в подготовленной нефти после I ступени обессоливания при условии полного перемешивания (рис. 8.6). Остаточное содержание солей в нефти в этом случае определяется равенством

$$S_{\text{ВЫХ}} = \frac{S_{\text{ВХ}} + S_{\text{ПР}}}{W_{\text{ВХ}} + W_{\text{ПР}}} W_{\text{ВЫХ}} \quad (8.27)$$

Обозначая через W_1 и W_2 количества пресной и дренажной воды, подаваемой на смешение, и учитывая, что содержание солей в промывочной воде определяется равенством $S_{\text{ПР}} = S_{\text{ВЫХ}} W_2 / W_{\text{ВЫХ}}$, из уравнения (8.27) получим

$$S_{\text{ВЫХ}} = \frac{S_{\text{ВХ}}}{W_{\text{ВХ}} + W_1} W_{\text{ВЫХ}} \quad (8.28)$$

Отсюда видно, что остаточное содержание солей в подготовленной нефти даже при полном смешении не зависит от количества дренажной воды. Для реального случая неполного смешения, когда концентрация солей в дренажной воде меньше, чем при полном смешении, подача воды на повторное смешение будет способствовать некоторому снижению остаточного содержания солей.

* Подобная схема подачи промывочной воды без теоретического ее анализа приведена в работе [5].

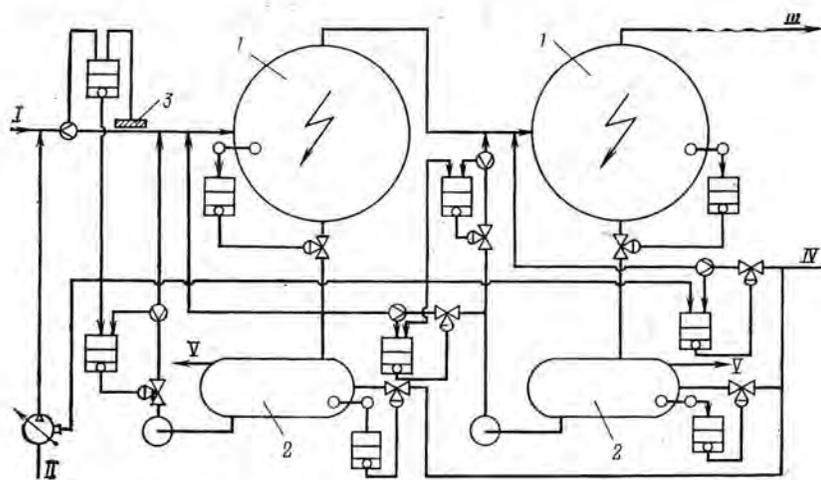


Рис. 8.7. Схема противоточной подачи промывочной воды с рециркуляцией дренажной воды при двухступенчатом обессоливании:

1 — электродегидратор; 2 — емкость для дренажной воды. I — сырая нефть; II — деэмульгатор; III — обессоленная нефть; IV — пресная вода; V — дренажная вода.

На основе рассмотренной схемы подачи промывочной воды при одноступенчатом обессоливании можно построить схему для двухступенчатого процесса обессоливания (рис. 8.7). В ней осуществлена противоточная подача промывочной воды с учетом добавления дренажной воды на I и II ступенях. Подача промывочной воды и деэмульгатора регулируется в соответствии с результатами гл. 3 и 4.

В настоящее время известно следующее типовое решение для выбора температуры ведения процесса обессоливания нефти изложенное в работе [5, с. 77]. «При проектировании ЭЛОУ не нужно стремиться к чрезмерно высоким температурам и давлениям*, так как многие нефти хорошо обессоливаются при 70—90 °С. Обессоливание нефти при более высоких температурах (100—160 °С) выгодно лишь в том случае, если при этом в нефти уменьшается содержание остаточных солей и увеличивается пропускная способность электродегидраторов».

Полностью соглашаясь с авторами этих рекомендаций, рассмотрим возможность экспериментального уточнения температурного режима установок для обессоливания конкретных нефтей. При этом в качестве критерия оптимальности будем рассматривать только качество обессоливания, поскольку пропускную способность электродегидраторов можно увеличивать не только за счет температурного режима,

* Здесь учитывается, что при повышении рабочих температур технологические аппараты надо рассчитывать на более высокие давления, а это может существенно увеличить стоимость оборудования.

но и путем конструктивных усовершенствований аппаратов и применения блоков предварительного укрупнения эмульсии.

На основании полученных ранее результатов процесса смешения пластовой и промывочной воды, который определяет качество обессоливания существующих установок, можно прийти к заключению, что наиболее чувствителен к изменению температурного режима процесс разрушения бронирующих оболочек на мелкодисперсной составляющей пластовой воды. А поскольку процесс разрушения бронирующих оболочек определяется еще и «активностью» применяемого деэмульгатора, оптимальную температуру ведения процесса обессоливания следует выбирать экспериментально с учетом не только типа нефти, но и типа применяемого деэмульгатора. Оптимальной следует, очевидно, считать температуру, при которой обеспечивается наиболее полное вымывание солей при смешении. Экспериментальная методика такого определения была рассмотрена в предыдущих разделах.

ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ. ПРЯМЫЕ МЕТОДЫ

Содержание воды в веществе характеризуется влажностью (или влагосодержанием). Абсолютная влажность U определяет содержание воды, отнесенное к единице массы (или объема) сухого вещества, а относительная влажность W — содержание воды, отнесенное к единице массы (или объема) влажного материала. Величины абсолютной и относительной влажности связаны между собой равенством

$$W = \frac{U}{1+U} \quad (9.1)$$

Существующие методы измерения влагосодержания в жидких средах основаны на различных физических и химических принципах: они имеют разные пределы измерений и разные точности и перекрывают диапазон измерений от 10^{-4} до 60÷70% объемн. Следуя классификации И. С. Лидермана [135], разделим все методы измерения влагосодержания на шесть групп, две из которых объединяют прямые*, а остальные четыре — косвенные методы**. Для измерения влажности наиболее часто применяют методы, отмеченные на рис. 9.1 пунктирной линией.

Метод азеотропной дистилляции, или, как его часто называют, метод Дина и Старка (ГОСТ 2477—65). Относится к прямым методам измерений. Принципиальная схема прибора, применяемого для этого метода, представлена на рис. 9.2. Пробу нефти заливают в колбу 1 и к ней добавляют осушенный растворитель — обычно бензин «Галоша». В колбу вставляют водоловушку 2 с обратным холодильником 3. Все это устанавливают на нагреватель 4. В процессе нагревания вода в парообразном состоянии вместе с растворителем попадает в обратный холодильник 3. В нем пары воды и растворителя конденсируются и стекают в ловушку 2, где и разделяются на два слоя за счет разности плотностей. Избыток растворителя возвращается из ловушки в колбу

* Определение величины ее непосредственным сравнением с эталоном единицы измерения называют прямым (например, измерение длины метром, измерение массы на рычажных весах и т. д.).

** Определение величины путем вычисления по некоторой формуле $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_1, x_2, \dots, x_n — величины, определенные ранее прямыми измерениями, называют косвенным (например, определение плотности вещества по измерениям его массы и объема; измерение расхода жидкости или газа по перепаду давления на сужающем устройстве и т. д.).

по трубке 5. Перегонку продолжают до тех пор, пока уровень воды в ловушке перестанет изменяться. Указания на методологические тонкости проведения подобных измерений можно найти в работах [139, 140].

Точность метода Дина и Старка существенно зависит от тщательности подготовки к процессу измерения аппаратуры; такая подготовка заключается в основном в герметизации ее шлифовых соединений. Исследования точности этого метода, проводимого в [139, 140], пока-

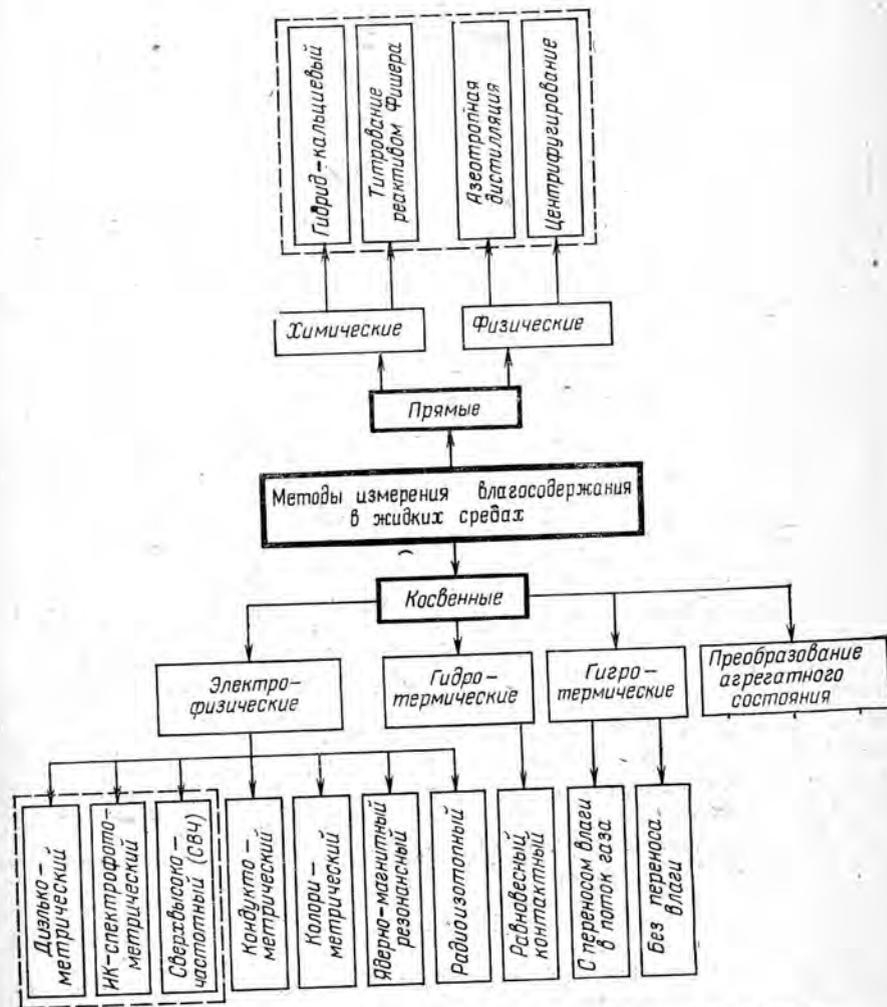


Рис. 9.1. Методы измерения влагосодержания в жидких средах.

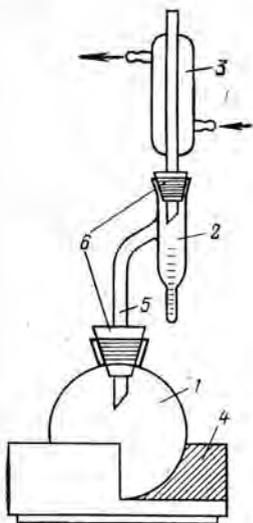
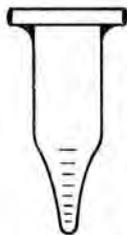


Рис. 9.2. Прибор Дина и Старка:
1 — колба; 2 — водоловушка; 3 — обратный
холодильник; 4 — нагреватель; 5 — соеди-
нительная трубка; 6 — пробки со шлифами.

Рис. 9.3. Контейнер для центрифуги.



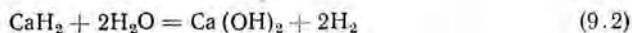
зали, что он имеет систематическую отрицательную погрешность, приводящую к занижению результата измерения и обусловленную частичной потерей влаги на стенках холодильника и растворением ее в бензине. При влажности 0,1—1% эта погрешность может достигать 7% [135]. Точность метода может быть повышена путем увеличения объема пробы нефти, в которой определяется влагосодержа-

ние. Однако такой прием приводит к увеличению продолжительности анализа, который и без того может достигать 1—1,5 ч.

Метод центрифугирования. Пробу нефти заливают в стеклянный контейнер для центрифуги с оттянутым носиком (рис. 9.3), на котором нанесена градуировка в % так же, как и на ловушке в методе Дина и Старка. Время до отделения воды имеет порядок нескольких минут и подбирается экспериментально, так как зависит от вязкости нефти, числа оборотов центрифуги и расстояния контейнера от центра вращения. Этот метод не гостирован, однако он довольно удобен для экспресс-анализов, не требующих большой точности.

Метод объемного титрования реактивом Фишера. В отличие от двух предыдущих методов он обладает высокой точностью и может служить эталонным. По данным работы [35], его максимальная погрешность при измерении влагосодержания нефтей в диапазоне 0,041—0,562% объема составляет 0,017%. Пробу нефти разбавляют растворителем из смеси метанола или этанола с бензолом, а затем титруют реактивом Фишера с электрометрическим определением конечной точки титрования по заданному значению потенциала. Недостаток метода — высокая токсичность реактива Фишера, в состав которого входят метанол и пиридин.

Гидрид-кальциевый метод. Основан на реакции взаимодействия воды с гидридом кальция.



Предварительно обезвоженный путем прокаливании гидрид кальция добавляют в измеряемую пробу, которую затем нагревают в колбе, закрытой обратным холодильником. Содержание воды в пробе определяют по количеству (или давлению) выделяющегося водорода. Основ-

ные недостатки метода: длительность анализов (1,5—2 ч); необходимость тщательной подготовки аппаратуры к каждому анализу; нечеткость конца реакции (9.2).

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ

Из косвенных методов измерения влагосодержания в нефтях в настоящее время применяют в основном три электрофизических метода: диэлектрический, ИК-спектрофотометрический и метод, основанный на измерении диэлектрических постоянных в сверхвысокочастотном диапазоне.

Диэлектрический метод. Основан на использовании зависимости диэлектрической проницаемости (ДП) нефтяной эмульсии от содержания в ней воды [139]. При разборе электрических свойств эмульсий в гл. 1 было рассмотрено несколько моделей для описания зависимости ДП эмульсии от ее обводненности, которые в общей функциональной записи можно представить в виде

$$\varepsilon_a = f_\varepsilon(\varepsilon_W, \varepsilon_H, W) \quad (9.3)$$

Вследствие взаимной однозначности этих зависимостей по ε_a и W существует и обратное соотношение

$$W = f_W(\varepsilon_W, \varepsilon_H, \varepsilon_a) \quad (9.4)$$

которое и является основой для измерения влажности нефти.

Поскольку величины ε_W и ε_H постоянны при неизменных внешних условиях, f_W можно рассматривать как функцию одной переменной ε_a . Если известен вид этой зависимости и величины ε_W и ε_H , то измеряя и подставляя эти значения в (9.4), можно вычислить значение W .

Практическая реализация этого метода затруднена прежде всего вследствие отсутствия теоретических моделей для определения функции f_W в (9.4). Это связано с тем, что в реальных условиях ДП эмульсий может зависеть не только от перечисленных выше параметров, но и от флокуляции дисперсных частиц, приводящей к образованию пространственных структур, что нарушает однородность эмульсии. А поскольку интенсивность флокуляции определяется индивидуальными свойствами нефти*, в общем случае при определении f_W надо учитывать эти особенности измеряемой эмульсии. Рассмотрим возможные варианты проведения подобных поправок.

Пусть нет никаких априорных данных о функциональном виде зависимости f_W . Тогда единственным способом ее определения является поточечное снятие всей зависимости в координатах (W , ε_a), начиная с безводной нефти при последующем добавлении к ней воды**. Полученные результаты могут быть аппроксимированы аналитическим выражением.

* Явления флокуляции и цепочкообразования могут порождаться также внешним электрическим полем напряженностью 20—30 В/см.

** Температурные условия во время тарировки и последующих измерений предполагаются постоянными.

Для уменьшения количества тарировочных точек функция f_w может выбираться из некоторого параметрического класса, например из класса полиномиальных функций

$$W = \alpha_1 \varepsilon_3 + \alpha_2 \varepsilon_3^2 + \alpha_3 \varepsilon_3^3 + \dots \quad (9.5)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ — неизвестные коэффициенты, определяемые экспериментально. В этом случае число необходимых опытов будет равно числу неизвестных коэффициентов.

Использование подходящих теоретических моделей для определения f_w позволяет еще больше уменьшить число параметров, определяемых из опыта, сводя их в пределе к одному. Таким параметром остается ДП сухой нефти, которая должна определяться экспериментально. Все рассмотренные в гл. 1 модели для ДП эмульсий приводят к таким однопараметрическим зависимостям.

Для учета явления флуктуации И. Ю. Клугман [26] рассмотрел модель эмульсии, состоящей из двух сортов частиц — отдельных капель и образованных из них за счет флуктуации агрегатов. В отличие от рассмотренных ранее однопараметрических моделей для ДП новая модель двухпараметрическая. Вторым параметром в нее входит доля сфлуктуированной части эмульсии, или ее отношение к общему содержанию воды, называемое коэффициентом флуктуации. Таким образом, эта модель имеет дополнительную степень свободы по сравнению с предыдущими, что и обеспечивает ее большую общность.

Достоинства диалкометрических методов измерения влажности: они легко поддаются автоматизации, требуют мало времени для измерения (порядка минуты) и отличаются широким диапазоном измерений; серийно выпускают приборы для измерения влажности нефти от 0 до 60%.

Сверхвысокочастотный метод определения влажности нефти. Основан на зависимости затухания или фазового сдвига сигнала

в области сверхвысоких частот (СВЧ) при прохождении его через эмульсию от количества дисперсной фазы [141, 142]. Несмотря на перспективность, широкого распространения этот метод пока не получил.

Инфракрасный спектрофотометрический метод измерения влажности. Основан на зависимости между содержанием воды в эмульсии и ее спектральными свойствами [144]. Характерные спектрограммы коэффициентов пропускания для воды и нефти приведены на рис. 9.4 (кривые 3 и 4). Метод измерения состоит в следующем. Измеряемую пробу нефти заливают в прозрачную кювету и через нее пропускают световой луч, получаемый при помощи узкополосного оптического фильтра. Спектральные характеристики двух таких фильтров даны на рис. 9.4 (кривые 1 и 2). Интенсивность светового сигнала, прошедшего через кювету, измеряют фотоэлементом. Если обозначить через I_0 и I_1 интенсивности светового потока до и после прохождения через нефть, а через k_1 и k_2 — коэффициенты поглощения воды и нефти в измеряемом спектральном диапазоне с учетом толщины слоя нефти в кювете, то можно записать следующее равенство

$$I_1 = I_0 [1 - Wk_1 - (1 - W)k_2] \quad (9.6)$$

Если величины k_1 и k_2 известны, то отсюда можно определить W . Спектральный диапазон измерения нужно выбирать, учитывая следующие соображения: 1) величины k_1 и k_2 в нем должны как можно меньше зависеть от индивидуальных свойств пластовых вод и нефтей; 2) для повышения чувствительности метода желательно выбрать диапазон измерения с максимальным значением разности $(k_2 - k_1)$. Учесть эти требования не просто, так как они противоречивы.

Чтобы исключить возможные помехи при измерениях, возникающие вследствие рассеяния света на каплях воды и других оптических неоднородностях, иногда используют величину разности оптической плотности эмульсии в двух близко расположенных спектральных областях.

Недостаток метода — зависимость коэффициентов k_1 и k_2 от индивидуальных свойств пластовых вод и нефтей. Поэтому так же, как ε_3 и коэффициент флуктуации в диалкометрическом методе, величины этих коэффициентов должны заново определяться при переходе от одной нефти к другой.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОЛЕСОДЕРЖАНИЯ В НЕФТЯХ

В отличие от измерения влажности арсенал методов измерения солесодержания в жидких средах не так велик. Среди них нет прямых методов, а косвенные методы можно разделить на две группы (рис. 9.5).

Группа химических методов основана на определении содержания солей при помощи титрования солевого раствора реактивом, взаимодействующим с ионами хлора. Поэтому в указанных методах определяют только содержание хлорных солей, которое пересчитывают на NaCl. Поскольку в нефть соли попадают в основном с пластовой водой,

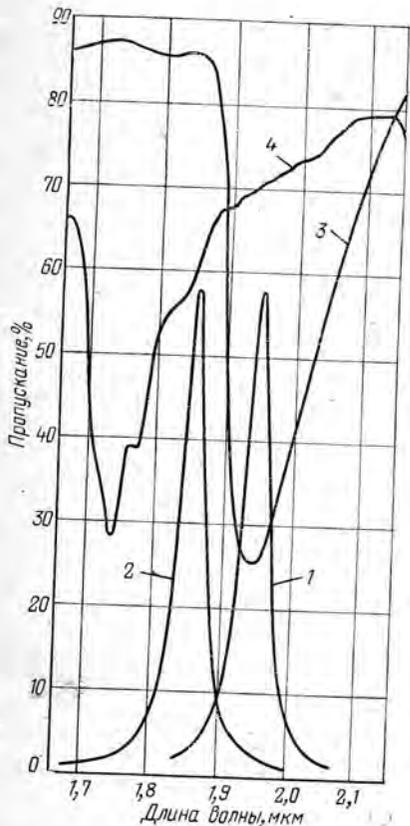


Рис. 9.4. Типовая спектрограмма коэффициентов пропускания воды и нефти: 1, 2 — спектральные характеристики интерференционных светофильтров; 3, 4 — спектрограммы коэффициентов пропускания для воды и нефти.



Рис. 9.5. Методы измерения соледержания в нефтях.

в которой хлорные соли преобладают над остальными (за исключением солей временной жесткости — см. гл. 1), такую интегральную характеристику для соледержания в нефти и в пластовой воде можно считать удовлетворительной.

Метод титрования водной вытяжки солей (ГОСТ 2401—65) является, пожалуй, наиболее старым и в то же время наиболее широко распространенным в промышленности [136]. Вытяжку получают длительным и интенсивным перемешиванием пробы нефти с горячей водой при добавлении бензола или ПАВ. Этот процесс экстрагирования подробно разбирается в гл. 8. Недостаток метода — большая продолжительность анализов (1—1,5 ч) и возможные систематические ошибки вследствие неполного вымывания солей в процессе экстрагирования. Точность метода при условии правильной организации процесса экстрагирования пропорциональна объему нефти, взятой для измерения. Это следует учитывать особенно при измерении малых соледержаний.

Метод прямого, или объемного титрования [146]. Основан на прямом титровании навески нефти, предварительно разбавленной органическим растворителем (ГОСТ 10097—62). Применяется потенциометрическое титрование азотнокислым серебром. Большим недостатком метода является его чувствительность к сероводороду и меркаптанам. В присутствии этих соединений либо полностью невозможно проведение потенциометрического титрования, либо существенно увеличивается ошибка в определении соледержания. По этой причине с увеличением в общем объеме добычи нефти доли сернистых нефтей метод прямого титрования применяется все реже. Химические методы измерения соледержания являются лабораторными методами и плохо поддаются автоматизации.

Во второй группе, объединяющей физические методы, можно выделить четыре основные. Первые два являются аналогами химических

методов, в которых процесс титрования заменен измерением электропроводности водной вытяжки [145, 146] или всего объема нефти после предварительного ее разбавления органическим растворителем. Поскольку электропроводность любого раствора определяется количеством и подвижностью всех диссоциированных ионов, оба метода, основанные на измерении электропроводности, дают более обобщенную характеристику солевого состава нефти, чем химические методы, в которых измеряется только содержание ионов хлора. Однако вследствие преобладающего содержания хлорных солей в солевом составе пластовых вод между электропроводностью и количеством ионов хлора в растворе существует достаточно тесная корреляционная связь, которая позволяет проводить их тарировку по одному из химических методов, выбираемому в качестве эталонного.

Зависимость корреляционной связи между электропроводностью и содержанием хлорных солей от типа нефти является одним из основных недостатков физических методов. Их преимуществом, по сравнению с химическими, является меньшая продолжительность процесса измерения. Они более удобны также для создания автоматических поточных анализаторов соледержания в нефти. Особенно это относится к методу измерения проводимости разбавленной нефтяной среды, который положен в основу серии автоматических анализаторов типа «ИОН».

В начале 70-х годов был разработан метод измерения соледержания, основанный на измерении тангенса угла диэлектрических потерь нефтяной эмульсии. Основная идея этого метода заключается в следующем. Известно (см. гл. 1), что ДП эмульсии может быть представлена в виде комплексного числа, мнимая часть которого ϵ'' характеризует потери на частоте ω . В функциональной записи ϵ'' можно представить в виде

$$\epsilon'' = \varphi_{\epsilon}(\epsilon_w, \epsilon_n, \omega, \sigma_w, W, F) \quad (9.7)$$

Исследование (9.7) для конкретных моделей ДП эмульсий показывает, что зависимость ϵ'' от ω носит экстремальный характер, достигая максимума на частоте ω_m . Приравняв первую частную производную по ω от правой части (9.7) нулю и определяя из этого уравнения значение ω в точке максимума, получим

$$\omega_m = \varphi_{\omega}(\epsilon_w, \epsilon_n, \sigma_w, W, F) \quad (9.8)$$

Если учесть, что проводимость воды линейно зависит от концентрации в ней солей и записать ее в виде

$$\sigma_w = \gamma \frac{\lambda}{10^3} \quad (9.9)$$

где λ — эквивалентная электропроводность соли; γ — концентрация солей в дисперсной фазе, то из (9.8) и (9.9) можно выразить γ . Для исследованных моделей [147] величина γ пропорциональна ω_m .

$$\gamma = \varphi_{\gamma}(\epsilon_w, \epsilon_n, W, F) \omega_m \quad (9.10)$$

Это соотношение является основой частотно-диэлкометрического метода измерения соледержания в нефти.

Чтобы потери в непрерывной среде не влияли на величину ω_m , необходимо, чтобы они были значительно меньше потерь в дисперсной фазе. Для обеспечения этого условия авторы метода [147] рекомендуют перед измерением исследуемую пробу нефти тщательно перемешивать с равным количеством дистиллированной воды. При этом соли из нефти будут экстрагироваться добавляемой водой, объем которой значительно превышает исходное содержание воды в нефти. При изменении исходной обводненности от 0 до 2% обводненность разбавленной эмульсии будет меняться от 50 до 51%, т. е. будет практически постоянной, что и учитывается при вычислении (9.10).

Исследования авторов по выявлению зависимости величины φ_γ от ε_n и F показали, что она изменяется в пределах $(1,6-0,8) \cdot 10^{-9}$ кг/м³. Поэтому значение φ_γ должно определяться экспериментально для каждого сорта нефти. В отличие от диэлкометрического метода измерения влажности, в котором для тарировки требуется обязательно сухая нефть, величина φ_γ может быть определена более просто. Пусть для нефти с неизвестным соледержанием γ определена частота $\omega_m^{(1)}$, соответствующая максимуму потерь. Тогда на основании (9.10)

$$\gamma = \varphi_\gamma \omega_m^{(1)} \quad (9.11)$$

Добавляя в имеющуюся эмульсию соль, повышающую ее концентрацию на $\Delta\gamma$, и опять определяя частоту максимума потерь, получим

$$\gamma + \Delta\gamma = \varphi_\gamma \omega_m^{(1)} + \varphi_\gamma \Delta\omega_m, \quad \Delta\omega_m = \omega_m^{(2)} - \omega_m^{(1)} \quad (9.12)$$

Из этих уравнений определяем

$$\varphi_\gamma = \frac{\Delta\omega_m}{\Delta\gamma} \quad (9.13)$$

Из проведенного разбора частотно-диэлкометрического метода измерения солей нетрудно убедиться в его общности с ранее рассмотренными методами определения соледержания по проводимости среды. Разница только в том, что в тех случаях ее измеряли прямым методом, а здесь — косвенным, — по частоте максимума тангенса угла потерь.

Метод пламенной фотометрии. Основан на регистрации интенсивности излучения линии Na (или K) в общем спектре, получаемом от введения в пламя горелки аэрозоля исследуемой нефти [148]. Метод обладает высокой абсолютной чувствительностью и разрешающей способностью. Однако из-за сложности аппаратного оформления он не получил широкого распространения в нефтяной промышленности.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ КРИВЫХ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО АНАЛИЗА

В настоящее время существует много методов определения дисперсного состава веществ [149—152]. При исследовании водонефтяных эмульсий довольно часто используют метод седиментационного анали-

за, что обусловлено простотой и доступностью его аппаратного оформления. В последние годы метод был несколько усовершенствован [140], но сущность его от этого не изменилась. Все также в результате измерения получается выпуклая вверх интегральная седиментационная кривая, в которой заключена вся информация о распределении диспергированных частиц по размерам.

Методы обработки седиментационных кривых можно разбить на две группы. Первая из них объединяет непараметрические дифференциальные методы, основанные на кусочно-линейной аппроксимации исходной кривой. Недостаток этих методов — малая точность восстановления исходной плотности распределения, особенно в области мелкодисперсной составляющей. Вторая группа объединяет параметрические методы, которые основаны на априорном предположении о параметрическом виде седиментационной кривой или отыскиваемой плотности распределения. Из-за трудностей обоснования этих предположений далеко не всегда можно гарантировать получение результатов заданной точности.

Интегральный метод обработки седиментационных кривых устраняет не полностью перечисленные выше недостатки известных методов, но в ряде случаев он позволяет значительно их ослабить.

Пусть седиментационная кривая $Q(t)$ снимается для эмульсии с исходной плотностью распределения частиц по радиусам $\rho_0(R)$. Обозначим через H высоту слоя эмульсии, в которой происходит отстой, а через N_0 — общее число частиц дисперсной фазы, находящейся в слое единичной высоты в начальный момент времени.

За время $(t, t+dt)$ через нижнее сечение отстойника пройдет объем дисперсной фазы, удовлетворяющий равенству

$$dQ = N_0 \int_0^{R(t)} Vvp(R) dR dt \quad (9.14)$$

где V — объем частицы радиусом R ; v — скорость ее осаждения; $R(t)$ — максимальный радиус частиц, не осевших полностью из объема дисперсной фазы к моменту времени t . Деление соотношения (9.14) на dt с последующим дифференцированием по времени приводит к выражению

$$\frac{d^2Q}{dt^2} = N_0 V \rho_0(R) v \frac{dR}{dt} \quad (9.15)$$

откуда получим для определения $\rho_0(R)$ соотношение вида

$$\rho_0(R) = \frac{\ddot{Q}}{N_0 V v \dot{R}(t)} \quad (9.16)$$

Здесь и в дальнейшем точки над буквами обозначают производные по времени. Как видно из (9.16), для вычисления $\rho_0(R)$ необходимо знать вторую производную по времени от седиментационной кривой $Q(t)$. Функции V , v и $R(t)$ известны, а величину N_0 можно определить

из условия нормирования плотности распределения $\rho_0(R)$ к единице. Так, например, для случая сферических частиц, оседающих по закону Стокса

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3, \quad R(t) = \left(\frac{H}{kt} \right)^{1/2}, \quad v = kR^2, \quad k = \frac{2\Delta\rho g}{9\rho\nu} \quad (9.17)$$

Подставляя (9.14) в (9.16) для случая стоксовского осаждения сферических частиц, получим

$$\rho_0 \left[\left(\frac{H}{kt} \right)^{1/2} \right] = -At^4 \ddot{Q}(t), \quad A = \frac{3k^2}{2\pi N_0 H^3} \quad (9.18)$$

Чтобы обойти трудности, связанные с получением оценки второй производной $\ddot{Q}(t)$, воспользуемся методом восстановления $\rho_0(R)$ по ее моментам, которые можно вычислить только на основе интегральных соотношений для $Q(t)$.

Доумножая правую и левую часть (9.18) на R^i и интегрируя по всей области определения этой величины, получим следующую систему уравнений для определения начальных моментов искомого плотности распределения

$$\mu_i = -\frac{A}{2} B^{i+1} \int_0^T t^{5-i} \ddot{Q}(t) dt, \quad B = \left(\frac{H}{k} \right)^{1/2} \quad (9.19)$$

Здесь T — время до полного осаждения самых мелких капель. Для нулевого и первых целых четырех моментов эти уравнения можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \frac{5A}{4} B \left[Q(T) T^{3/2} - \frac{3}{2} \int_0^T Q(t) t^{1/2} dt \right] = 1 \\ \mu_1 &= AB^2 \left[Q(T) T - \int_0^T Q(t) dt \right] \\ \mu_2 &= \frac{3}{4} AB^3 \left[Q(T) T^{1/2} - \frac{1}{2} \int_0^T Q(t) t^{-1/2} dt \right] \\ \mu_3 &= \frac{1}{2} AB^4 Q(T) \\ \mu_4 &= \frac{1}{4} AB^5 \left[Q(T) T^{-1/2} + \frac{1}{2} \int_0^T Q(t) t^{-3/2} dt \right] \end{aligned} \quad (9.20)$$

Уравнение для нулевого момента является нормировочным. Из него определяем величину N_0 или целиком коэффициент A

$$A = 0,8B^{-1} \left[Q(T) T^{3/2} - \frac{3}{2} \int_0^T Q(t) t^{1/2} dt \right]^{-1} \quad (9.21)$$

Интегралы в правых частях (9.20) могут быть вычислены с помощью известных методов численного или графического интегрирования.

Аналогичным образом могут быть определены и дробные моменты распределения $\rho_0(R)$.

Знание первых моментов плотности распределения часто бывает достаточным для ответа на большинство практических и теоретических вопросов. Если же требуется восстановить все распределение частиц по размерам, то для этого удобно воспользоваться методом диаграмм Пирсона [122].

До сих пор мы рассматривали случай, когда вся кривая $Q(t)$ была известна. Если фракционный состав исследуемой эмульсии очень широк, снять всю кривую $Q(t)$ на одном приборе бывает затруднительно, так как чувствительность аппаратуры, необходимая для снятия распределения в области крупнодисперсной составляющей, недостаточна для снятия распределения в области мелкодисперсной составляющей. Иногда распределение крупнодисперсной составляющей эмульсии с размерами частиц больше некоторого критического радиуса $R_{кр}$ может вообще не представлять интереса. В обоих случаях эксперимент проводят следующим образом. Исходную эмульсию отстаивают в течение некоторого времени T_0 . Затем берут верхний слой эмульсии высотой H , перемешивают и в нем определяют остаточное распределение мелкодисперсной составляющей. Обозначим это распределение через $p_1(R)$. Очевидно, оно будет отличаться от начального распределения этих частиц, так как часть их оседает за время отстаивания. Найдем поправку для распределения $p_1(R)$, которая обеспечит его однозначное соответствие исходному распределению в области мелкодисперсной составляющей.

Пусть при определении плотности распределения $p_1(R)$ в эмульсии оставалось N_1 частиц. При этом число частиц с размерами в интервале $(R, R+dR)$ будет равно $dn = N_1 p(R) dR$. Доля осевших капель из этой фракции при первом отстаивании будет равна $T/t_{кр}(R)$, где $t_{кр}(R) = H/kR^2$ — время, которое требуется частице радиуса R для прохождения слоя эмульсии высотой H . С учетом доли частиц, осевших за время T , количество частиц размера R в исходной эмульсии будет равно

$$dn_0(R) = N_1 p_1(R) \frac{t_{кр}(R)}{t_{кр}(R) - T} dR \quad (9.22)$$

Учитывая равенство $n_0(R) = N_0 p_0(R)$, получим

$$p_0(R) = \frac{N_1}{N_0} \cdot \frac{t_{кр}(R)}{t_{кр}(R) - T} p_1(R) \quad (9.23)$$

Подставляя сюда $p_1(R)$ в виде (9.18) и учитывая (9.17), получим следующее выражение для определения исходной плотности распределения в области размеров частиц $R < R_{кр}$

$$p_0(R) = \frac{A}{1 - \frac{T}{H}} \left(\frac{H}{kR^2} \right)^4 \ddot{Q}_1 \left(\frac{H}{kR^2} \right) \frac{N_1}{N_0}, \quad R < R_{кр} \quad (9.24)$$

Так же, как и раньше, можно построить систему уравнений для вычисления моментов этого распределения. Постоянный множитель AN_1/N_0 определится из условия нормировки распределения.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Определение турбулентности и структуры турбулентного потока

Термин «турбулентность» употребляется для определения явления, которое заключается в том, что при определенных условиях гидродинамические и термодинамические характеристики течений жидкостей и газов (такие, как температура, давление, плотность) начинают изменяться во времени и пространстве хаотическим образом. Беспорядочный характер движения — основная особенность турбулентности. Скорость турбулентного движения, в отличие от ламинарного, не является однозначной функцией пространственно-временных координат — она становится случайной. Поэтому турбулентность описывается статическими методами, основой которых является выявление и исследование различных статических взаимосвязей между отдельными параметрами потока.

При турбулентном движении вязкой жидкости ее кинетическая энергия вследствие вязкого трения преобразуется в тепло. Поэтому турбулентный поток вязкой жидкости является диссипативным, и для его поддержания необходим постоянный подвод энергии извне. В противном случае турбулентность вырождается. С другой стороны, влияние вязкости как бы «усредняет» турбулентность по объему, делает ее более однородной. В предельном случае, когда структура турбулентности во всех точках исследуемого объема количественно одинакова, она называется однородной.

Если основные статистические характеристики турбулентности во всех точках исследуемого объема не зависят от направления движения жидкости, турбулентность называется изотропной. В остальных случаях турбулентность будет не изотропной, или анизотропной.

Структуру турбулентного потока можно представить в виде совокупности турбулентных вихрей различного размера, или, как часто говорят, масштаба. Крупномасштабные вихри, обладающие значительной кинетической энергией, являются неустойчивыми образованиями и распадаются на более мелкие, распределяя между ними свою кинетическую энергию. За время жизни крупномасштабного вихря только незначительная часть его энергии расходуется на трение, основная же часть передается более мелкомасштабным вихрям, которые в свою очередь также могут дробиться с образованием более мелких вихрей и т. д. Таким образом, в турбулентном потоке идет непрерывная перекачка энергии от крупномасштабных вихрей к более мелким.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока для вновь образовавшихся вихрей диссипируемая ими энергия не будет примерно равна их кинетической энергии. Подобные вихри постепенно затухают, расходуя всю свою энергию на преодоление вязкого трения, т. е. превращая ее в тепло. Размер такого минимального гипотетического вихря называется внутренним масштабом турбулентности и обозначается λ_0 . Если турбулентный вихрь представить как некоторое локализованное за счет его движения образование жидкости сферической формы, а масштаб вихря принять за диаметр этого «шарика», то для вихря масштаба λ можно ввести понятие числа Рейнольдса по аналогии с этим числом для движущейся сферы

$$Re_\lambda = \frac{v_\lambda \lambda}{\nu} \quad (\text{П.1.1})$$

Здесь v_λ — скорость вихря масштаба λ ; ν — кинематическая вязкость жидкости.

По смыслу определения число Рейнольдса равно отношению сил инерции к вязким силам. Поскольку для вихрей масштаба λ_0 эти силы уравниваются, число Рейнольдса для них будет примерно равно единице. Следовательно, приравнивая правую часть (П.1.1) единице, можно выразить порядок величины внутреннего масштаба турбулентности в виде

$$[\lambda_0 = \frac{\nu}{v_\lambda} \quad (\text{П.1.2})$$

Скорость движения вихря масштаба λ в условиях свободной турбулентности в общем случае должна зависеть от вязкости жидкости ν , ее плотности ρ , диссипации энергии в единице объема ε и масштаба λ . При $\lambda \gg \lambda_0$ зависимость скорости от вязкости должна вырождаться, так как кинетическая энергия этих вихрей значительно больше энергии, затрачиваемой на преодоление сил трения [82]. Из остающихся величин можно составить только единственную комбинацию с размерностью скорости

$$v_\lambda \approx (\varepsilon_0 \lambda)^{1/3}, \quad \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (\text{П.1.3})$$

Величина ε_0 называется удельной диссипацией энергии и имеет размерность (длина)²/время³. При уменьшении λ характер зависимости v_λ от λ меняется и при $\lambda \sim \lambda_0$, как видно из П.1.2,

$$v_{\lambda_0} \sim \frac{\nu}{\lambda_0} \quad (\text{П.1.4})$$

Путем решения уравнений (П.1.3) при $\lambda = \lambda_0$ и (П.1.4) можно выразить связь v_{λ_0} и λ_0 с параметрами потока в виде

$$\lambda_0 \approx \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon_0} \right)^{1/4}, \quad v_{\lambda_0} \approx (\varepsilon_0 \nu)^{1/4} \quad (\text{П.1.5})$$

Спектр турбулентных пульсаций не заканчивается на размере λ_0 ; существуют пульсации и значительно меньшего размера. Однако еди-

ная точка зрения на механизм их возникновения в настоящее время отсутствует.

Период пульсации размера $\lambda \leq \lambda_0$ не зависит от общего масштаба турбулентного движения и по порядку величины равен [82]

$$T_\lambda \approx \frac{\lambda}{v_\lambda} \quad \lambda \leq \lambda_0 \quad (\text{П.1.6})$$

Скорости этих пульсаций пропорциональны скорости пульсаций λ_0 , и их можно записать в виде

$$v_\lambda \approx v_{\lambda_0} f\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) \quad (\text{П.1.7})$$

Функциональный множитель в правой части должен относиться к классу функций, удовлетворяющих следующим очевидным условиям:

$$\text{при } \lambda \rightarrow \lambda_0, \quad f\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) \rightarrow 1; \quad \text{при } \lambda \rightarrow 0, \quad f\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) \rightarrow 0$$

В теории турбулентности употребляется наиболее простая функция из этого класса — линейная; поэтому (П.1.7) записывается в виде

$$v_\lambda \approx v_{\lambda_0} \frac{\lambda}{\lambda_0}, \quad \lambda \leq \lambda_0 \quad (\text{П.1.8})$$

Скорости затухания пульсаций $\lambda \leq \lambda_0$ характеризуются их ускорением, которое с учетом (П.1.7) можно записать в виде

$$\omega_\lambda \approx \frac{v_\lambda}{T_\lambda} \approx \left(\frac{v_{\lambda_0}}{\lambda_0}\right)^2 \lambda, \quad \lambda \leq \lambda_0 \quad (\text{П.1.9})$$

Период, скорость и ускорение пульсаций масштаба λ можно выразить через основные параметры потока. Подставляя в их выражения значения λ_0 и v_{λ_0} из (П.1.5), получим

$$T_\lambda \approx \left(\frac{v}{\varepsilon_0}\right)^{1/2}, \quad v_\lambda \approx \lambda \left(\frac{\varepsilon_0}{v}\right)^{1/2}, \quad \omega_\lambda \approx \lambda \left(\frac{\varepsilon_0}{v}\right), \quad \lambda \leq \lambda_0 \quad (\text{П.1.10})$$

Отсюда видно, что период мелкомасштабных пульсаций не зависит от их размера.

Изложенная схема турбулентности лежит в основе теории локально-изотропной турбулентности А. Н. Колмогорова. При использовании ее результатов следует помнить, что эта теория асимптотическая, т. е. соответствующая весьма большим числам Рейнольдса для основного потока.

Турбулентное течение в трубах

Основным параметром, определяющим характер движения жидкости в прямой круглой трубе диаметра d , является число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{v} \quad (\text{П.1.11})$$

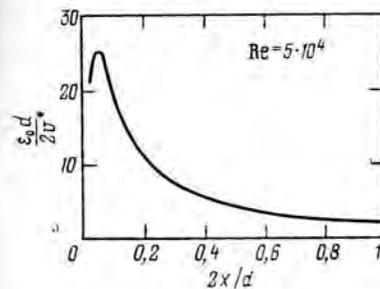


Рис. П.1.1. Зависимость диссипации энергии в круглой трубе от расстояния до стенки трубы.

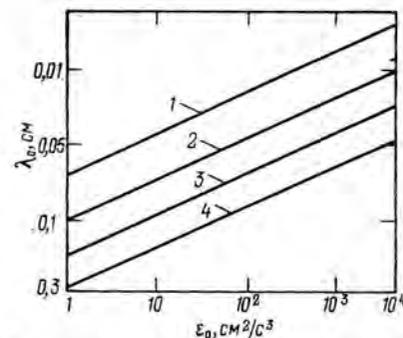


Рис. П.1.2. Зависимость внутреннего масштаба турбулентности от удельной диссипации энергии:

1 — $v = 0,01$ см²/с; 2 — $v = 0,05$ см²/с; 3 — $v = 0,01$ см²/с; 4 — $v = 0,2$ см²/с.

При числах Рейнольдса, превышающих критическое значение $Re_{кр} = 2300$, движение жидкости становится турбулентным. При этом средняя удельная диссипация энергии для чисел Рейнольдса до 10^5 определяется соотношением

$$\varepsilon_0 = 0,158 \frac{v^3 Re^{11/4}}{d^4}, \quad Re \leq 10^5 \quad (\text{П.1.12})$$

которое следует из закона сопротивления Блазиуса [125].

Локальная диссипация энергии по сечению трубы существенно неоднородна: она минимальна в центре трубы (в ядре потока), монотонно возрастает при удалении от него, достигает максимума, а затем опять уменьшается при приближении к стенке трубы. На рис. П.1.1. показано характерное изменение диссипации энергии по сечению трубы; кривая построена на основе измерений Лауфера [153] при $Re = 5 \cdot 10^4$ в безразмерных координатах, в которых $v^* = \sqrt{\tau_c \rho}$ — динамическая скорость, определяемая напряжением трения на стенке трубы τ_c и плотностью жидкости ρ .

В отличие от средней удельной диссипации энергии (см. П.1.12) зависимость, представленная на рис. П.1.1, не имеет универсального аналитического описания.

Удельная диссипация энергии является определяющим параметром для внутреннего масштаба турбулентности [см. (П.1.5)]. Для оценки порядка ее величины в транспортных трубопроводах на рис. П.1.2 приведена зависимость λ_0 от ε_0 при различных значениях v , рассчитанных по (П.1.5). Из рис. П.1.2 видно, что порядок величины λ_0 в широком диапазоне изменения ε_0 и v исчисляется сотнями микрон, что значительно превышает размеры капель мелкодисперсной составляющей водонефтяной эмульсии, которые исчисляются единицами и десятками микрон.

2. ДВИЖЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ КАПЕЛЬ ЭМУЛЬСИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Поведение диспергированных частиц в турбулентном потоке жидкости в значительной степени определяется их концентрацией и отношением размера частиц к внутреннему масштабу турбулентности. При высокой концентрации частиц вследствие их взаимодействия и дополнительной диссипации энергии, обусловленной относительным движением частиц и жидкости, турбулентность подавляется. В предельном случае — при приближении концентрации частиц к их концентрации при плотной упаковке — турбулентность может даже полностью выродиться, или, как говорят, «вымерзнуть».

При малой концентрации частиц, когда их взаимодействием можно пренебречь, поведение каждой из частиц можно рассматривать как если бы в турбулентном потоке она была единственной. Если при этом частицы крупные, по сравнению с внутренним масштабом турбулентности, то они будут увлекаться в основном только крупномасштабными пульсациями. Если же частицы меньше λ_0 , что характерно для рассматриваемых нами задач, то основное влияние на их движение будут оказывать пульсации порядка внутреннего масштаба турбулентности. Увлекаемые этими пульсациями капли дисперсной фазы движутся вместе с ними. При этом вследствие неполного увлечения возникает относительное движение капель и жидкости. Для определения закономерностей этого относительного движения мы будем исходить из уравнения медленного относительного движения сферической частицы, выведенного Бассэ, Буссинеском и Озееном для случая покоящейся жидкости и обобщенного Ченом для случая жидкости, движущейся с переменной скоростью [153]

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_R \frac{dv_R}{dt} &= 6\pi\mu R (v_H - v_R) + \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_H \frac{dv_H}{dt} + \\ &+ \frac{2}{3} \pi R^3 \rho_H \left(\frac{dv_R}{dt} - \frac{dv_H}{dt} \right) + \\ &+ 6R^2 (\pi \rho_H \mu)^{1/2} \int_0^t \frac{dv_H}{d\tau} - \frac{dv_R}{d\tau} d\tau + F \end{aligned} \quad (\text{П.2.1})$$

Здесь v_H — скорость жидкости в окрестности движущейся частицы, достаточно удаленной от нее, чтобы не испытывать возмущений; связанных с относительным движением этой частицы; v_R — скорость частицы; ρ_H и ρ_R — плотности соответственно жидкости и частицы; R — радиус частицы; μ — динамическая вязкость жидкости; F — внешняя потенциальная сила.

Когда внешняя потенциальная сила имеет постоянную величину, как, например, в случае гравитационного поля, движение частицы в установившемся состоянии представляет собой суперпозицию постоянной скорости, равной скорости свободного падения в жидкости и скорости, определяемой движением жидкости. Вследствие линей-

ности уравнения (П.2.1) скорость свободного падения не зависит от движения жидкости.

Корсин и Ламли показали, что второй член в правой части уравнения (П.2.1) должен быть изменен, если это уравнение применять к турбулентному движению жидкости, при котором скорость жидкости зависит от времени и пространства. Для нас эта поправка несущественна, так как мы будем рассматривать движение частиц только за период одной пульсации с характерным размером порядка внутреннего масштаба турбулентности.

Вводя относительную скорость и не учитывая внешнюю силу, уравнение (П.2.1) можно записать в виде

$$\dot{u} + \alpha u + \gamma \int_0^t \frac{\dot{u}}{(t-\tau)^{1/2}} d\tau = \beta \dot{v}_H \quad (\text{П.2.2})$$

где точкой обозначены производные по времени

$$\begin{aligned} u &= v_H - v_R, \quad \alpha = \frac{9\nu\rho_H}{R^2(2\rho_R + \rho_H)}, \quad \beta = \frac{2(\rho_R - \rho_H)}{2\rho_R + \rho_H}, \\ \gamma &= \frac{9\rho_H}{R(2\rho_R + \rho_H)} \left(\frac{\nu}{\pi} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

Найдем решение этого уравнения с начальными условиями $u=v_H$ при $t=0$. Это решение будет соответствовать тому, когда покоящаяся частица захватывается некоторой пульсацией с начальной скоростью v_H .

Поскольку нас интересуют только капли с размерами гораздо меньшими внутреннего масштаба турбулентности, можно считать, что основное влияние на относительное движение дисперсной частицы оказывают пульсации порядка внутреннего масштаба турбулентности λ_0 . От интегро-дифференциального уравнения (П.2.2) можно перейти к обыкновенному дифференциальному уравнению, если воспользоваться соотношением для решения интегрального уравнения Абеля, которое можно записать в виде [154]

$$\int_0^t \int_0^X \frac{u(z)}{(X-z)^{1/2}} dz \frac{dX}{(t-X)^{1/2}} = \pi \int_0^t u(X) dX \quad (\text{П.2.3})$$

Умножая правую и левую часть уравнения (П.2.2) на $(z-t)^{-1/2}$ и интегрируя по t в пределах от 0 до z , получим

$$\int_0^z \frac{\dot{u}(t)}{(z-t)^{1/2}} dt + \alpha \int_0^z \frac{u(t)}{(z-t)^{1/2}} dt = 2\beta \dot{v}_H z^{1/2} - \gamma \pi [u(z) - u(0)] \quad (\text{П.2.4})$$

Заменяя здесь первое слагаемое в левой части на основании (П.2.3), получим

$$\alpha \int_0^z \frac{u(t) dt}{(z-t)^{1/2}} = \frac{\dot{u} - \alpha u - \beta \dot{v}_H}{\gamma} + 2\beta \dot{v}_H z^{-1/2} - \gamma \pi [u(z) - u(0)] \quad (\text{П.2.5})$$

Умножая правую и левую часть этого соотношения на $(X-z)^{1/2}$ и интегрируя по z в пределах от 0 до X с учетом соотношения (П.2.3), получим

$$[u(X) - u(0)] + \alpha \int_0^X u(z) dz - \gamma \int_0^X \frac{u(z)}{(X-z)^{1/2}} dz - 2\gamma u(0) X^{1/2} = \beta \dot{v}_H X \quad (\text{П.2.6})$$

Заменяя третье слагаемое в левой части на основании (П.2.5) и производя дифференцирование правой и левой части результирующего равенства, получим

$$\ddot{u} + (2\alpha - \pi\gamma^2) \dot{u} + \gamma^2 u = \beta \alpha \dot{v}_H - \gamma (\beta \dot{v}_H - \alpha v_H) t^{-1/2} \quad (\text{П.2.7})$$

Решение этого уравнения можно записать в виде

$$u = \frac{\beta \dot{v}_H}{\alpha} \left\{ 1 + \frac{\alpha v_H - \beta \dot{v}_H}{\beta \dot{v}_H (k_2 - k_1)} \left[(k_2 + \alpha) e^{k_1 t} - (k_1 + \alpha) e^{k_2 t} + \right. \right. \\ \left. \left. + \alpha \gamma \left(e^{k_2 t} \int_0^t t^{-1/2} e^{-k_2 t} dt - e^{k_1 t} \int_0^t t^{-1/2} e^{-k_1 t} dt \right) \right] \right\} \quad (\text{П.2.8})$$

где k_1 и k_2 — корни характеристического уравнения, представимые в виде

$$k_{1,2} = \frac{9v}{2 \left(1 + 2 \frac{\rho_K}{\rho_H} \right)^2 R^2} \left[7 - 4 \frac{\rho_K}{\rho_H} \pm 3 \left(5 - 8 \frac{\rho_K}{\rho_H} \right)^{1/2} \right] \quad (\text{П.2.9})$$

Поскольку для нашего случая плотности жидкости (нефти) и частиц (соленая вода) могут изменяться в пределах соответственно 800—900 кг/м³ и 1000—1200 кг/м³, а ρ_K/ρ_H — в пределах 1,1—1,5, корни характеристического уравнения будут комплексные. Записывая их в виде $k_{1,2} = R^* + i\omega$, где

$$R^* = \frac{9v}{2(1+2\kappa)^2 R^2} (7+4\kappa), \\ \omega = \frac{27v}{2(1+2\kappa)^2 R^2} (8\kappa-5)^{1/2}, \quad \kappa = \frac{\rho_K}{\rho_H} \quad (\text{П.2.10})$$

и подставляя в (П.2.9), получим

$$u = \frac{\beta \dot{v}_H}{\alpha} \left\{ 1 - \left(\frac{\alpha v_H}{\beta} - 1 \right) e^{R^* t} \left[\frac{\sin \omega t}{\left(\frac{4\alpha}{\pi\gamma^2} - 1 \right)^{1/2}} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi\gamma} \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \times \int_0^t t^{-1/2} e^{-R^* t} \cos \omega t dt \right) - \cos \omega t \left(1 - \frac{2\alpha}{\left(\frac{4\alpha}{\pi\gamma^2} - 1 \right)^{1/2} \pi\gamma} \int_0^t t^{-1/2} e^{-R^* t} \sin \omega t dt \right) \right] \right\} \quad (\text{П.2.11})$$

Второе слагаемое в фигурных скобках этого выражения определяет скорость выхода движения дисперсной частицы на стационарный

режим. Для оценки нижней границы времени выхода частицы на стационарный режим проведем численный анализ скорости частицы для максимального отношения плотностей $\rho_K/\rho_H = 1,5$, т. е. для случая частицы с максимальной инерцией. Вычисляя R^* и ω для этого соотношения, запишем (П.2.11) в виде

$$u = \frac{\dot{v}_H t}{32z^2} \left[1 + \left(32 \frac{v_H z^2}{\dot{v}_H t} - 1 \right) f(z) \right] \quad (\text{П.2.12})$$

где

$$z = \frac{3}{\sqrt{32}} R^{-1} (vt)^{1/2} \\ f(z) = e^{z^2} \left\{ \cos(3\sqrt{7}z^2) \left[1 - 4 \left(\frac{32}{7\pi} \right)^{1/2} \int_0^z e^{-z^2} \sin(3\sqrt{7}z^2) dz \right] - \right. \\ \left. - \frac{3}{\sqrt{7}} \sin(3\sqrt{7}z^2) \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{32}{7\pi} \right)^{1/2} \int_0^z e^{-z^2} \cos(3\sqrt{7}z^2) dz \right] \right\}$$

Функция $f(z)$ может быть мажорирована функцией $y = \exp(-1,1z)$. Заменяя в П.2.13 $f(z)$ ее мажорантой, получим следующую оценку для u

$$u \leq \frac{\dot{v}_H R}{9v} \left\{ 1 + 0,8 \left(\frac{9v v_H}{R^2 \dot{v}_H} - 1 \right) \exp[-0,53R^{-1}(vt)^{1/2}] \right\} \quad (\text{П.2.13})$$

Используя мажоранту функции $f(z)$, вычислим оценку для времени, которое необходимо для достижения относительной скорости, отличающейся от предельной не более чем на 10%. Приравнявая второе слагаемое в квадратных скобках соотношения (П.2.12) величине 0,1 и заменяя $f(z)$ ее мажорантой, получим

$$0,1 \leq \left(32 \frac{v_H z^2}{\dot{v}_H t} - 1 \right) \exp(-1,1z) \quad (\text{П.2.14})$$

Решая это неравенство относительно времени t , получим

$$t \leq 3,57 \frac{R^2}{v} \left[2,3 + \ln \left(\frac{9v v_H}{R^2 \dot{v}_H} - 1 \right) \right]^2 \quad (\text{П.2.15})$$

Вычисляя отношение периода пульсации с характерным размером λ_0 к времени, определяемому соотношением (П.2.15), получим следующее неравенство

$$\frac{T_{\lambda_0}}{t} \geq \frac{0,28X}{(3,9 + \ln X)^2}, \quad \text{где } X = R^{-2} \left(\frac{v^3}{\epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (\text{П.2.16})$$

Здесь учтено, что в интересующей нас области $X \gg 1$. При больших отношениях T_{λ_0}/t можно считать, что частица будет находиться в квазиравномерном относительном движении.

Размер частиц, которые еще можно считать находящимися в ква-

зравномерном движении, должен удовлетворять неравенству

$$R \leq X_{\text{гр}}^{-1/2} \left(\frac{v^3}{\varepsilon_0} \right)^{1/4} \quad (\text{П. 2.17})$$

где $X_{\text{гр}}$ определяется из (П.2.17) после приравнивания правой части этого соотношения к некоторому граничному значению отношения $(T_{\lambda_0}/t)_{\text{гр}}$.

Все предыдущие выкладки были проведены в предположении, что покоящаяся частица попадает в пульсацию масштаба λ_0 , когда последняя движется с максимальной скоростью. В действительности таких скачков относительной скорости быть не должно, поскольку пульсации обладают некоторым временем разгона. Поэтому частица будет быстрее выходить на стационарный режим. Это обстоятельство позволяет выбрать в качестве граничного значения $(T_{\lambda_0}/t)_{\text{гр}}$ величину порядка нескольких единиц. Полагая $(T_{\lambda_0}/t)_{\text{гр}}=5$ и определяя граничное значение X , получим $X_{\text{гр}}=3 \cdot 10^3$. Для круглой трубы диаметром d , которая является типовым элементом сырьевых трубопроводов, удельная диссипация энергии может быть вычислена на основании соотношения (П.1.12). Подставляя в (П.2.17) значение $X_{\text{гр}}=3 \cdot 10^3$ и ε_0 в виде (П.1.12), получим

$$R \leq 2 \cdot 10^{-2} \frac{d}{\text{Re}^{11/14}} \quad (\text{П. 2.18})$$

Для турбулентного потока с $\text{Re}=4 \cdot 10^4$ в транспортном трубопроводе диаметром 40 см из (П.2.18) получаем, что размер частиц, для которых справедливо предположение о квазиравномерном движении, удовлетворяет неравенству $R \leq 6 \cdot 10^{-4}$ см.

Увлекаемая турбулентными пульсациями частица постоянно меняет направление движения. При этом вследствие быстрого (по сравнению с периодом несущих частицу пульсаций) восстановления величины равномерной скорости относительное движение частицы является квазиравномерным со скоростью

$$u_1 = \frac{2\sqrt{3}(\rho_k - \rho_n)}{9\rho_n} R^2 \left(\frac{\varepsilon_0^3}{v^5} \right)^{1/4} \quad (\text{П. 2.19})$$

Помимо того, что частица движется со скоростью u_1 под действием турбулентных пульсаций, она еще движется под действием силы тяжести со скоростью u_2 , которую, как известно, при стоксовом законе обтекания можно записать в виде

$$u_2 = \frac{2(\rho_k - \rho_n)}{9\rho_n} R^2 \frac{g}{v} \quad (\text{П. 2.20})$$

Здесь g — ускорение силы тяжести. Отношение абсолютных величин скоростей u_1 и u_2 будет равно

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{g}{\sqrt{3}} \left(\frac{v}{\varepsilon_0^3} \right)^{1/4} \quad (\text{П. 2.21})$$

Учитывая слабую зависимость правой части этого отношения от v

Таблица П.2.1

Q, м³/ч	d, см		d, см					
	2,5		10	15	20	25	30	40
0,1	126	100	0,13	0,98	4,1	12,6	31,5	132,7
0,3	14	200	0,03	0,24	1,0	3,1	7,9	33,2
0,5	5	300	0,014	0,1	0,46	1,4	3,5	14,7
0,7	2,6	400	0,008	0,06	0,26	0,8	2	8,3
1	0,9	500	0,005	0,04	0,16	0,5	1,25	5,3

для оценки порядка его величины, положим $v=0,1$ см²/с. Тогда для круглой трубы его можно переписать в виде

$$\frac{u_2}{u_1} = 965 \frac{d^5}{Q^2} \quad (\text{П. 2.22})$$

Здесь числовой множитель имеет соответствующую размерность. В табл. (П.2.1) представлены значения этого отношения при различных значениях Q и d , характерных для сырьевых потоков при обессоливании нефтей в теплообменной аппаратуре и в транспортных трубопроводах. Эта таблица дает наглядное представление о соотношении абсолютных величин скоростей частиц, определяемых турбулентными пульсациями и полем силы тяжести.

Из данных табл. П.2.1 видно, что в теплообменной аппаратуре, а в ряде случаев при движении сырья по транспортным трубопроводам относительным движением дисперсных частиц под действием турбулентных пульсаций можно пренебречь и учитывать только их относительное движение за счет сил тяжести. Если скорости u_1 и u_2 могут быть величинами одного порядка, следует рассматривать результирующую скорость частицы, которую находят по правилу суперпозиции этих скоростей, вытекающему из линейности исходного уравнения движения частицы. Обозначая угол между направлениями скоростей u_1 и u_2 через α , запишем абсолютную величину результирующей скорости в виде

$$u = (u_1^2 + u_2^2)^{1/2} \left\{ 1 + 2 \frac{u_1}{u_2} \left[1 + \left(\frac{u_1}{u_2} \right)^2 \right]^{-1} \cos \alpha \right\}^{1/2} \quad (\text{П. 2.23})$$

По углу α можно провести усреднение.

3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДИФFUЗИОННЫХ ПРОЦЕССАХ В ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

Коэффициент диффузии

Теоретическое исследование диффузионных процессов основано на представлении о том, что взвешенная в жидкости или газе частица постоянно испытывает беспорядочные возмущения со стороны окружающей среды. В зависимости от природы этих возмущений разли-

чают молекулярную диффузию, при которой поведение частицы определяется ее столкновениями с молекулами окружающей среды, и турбулентную, при которой основное влияние на движение частицы оказывают турбулентные пульсации. Поскольку воздействия носят случайный характер, смещение частицы относительно некоторой начальной точки также будет случайным. Вследствие симметрии задачи среднее значение этого смещения будет равно нулю. Для определения среднего значения квадрата смещения разобьем его на две части по времени, т. е. представим как

$$S(t) = S(t_1) + S(t-t_1) \quad (\text{П.3.1})$$

Возводя обе части этого равенства в квадрат и проводя усреднение по множеству реализаций с учетом независимости величин $S(t_1)$ и $S(t-t_1)$, получим

$$\overline{S^2(t)} = \overline{S^2(t_1)} + \overline{S^2(t-t_1)} \quad (\text{П.3.2})$$

Решением этого уравнения является линейная по времени функция, равная нулю в начальный момент времени, которую можно записать в виде

$$\overline{S^2(t)} = \alpha D t \quad (\text{П.3.3})$$

где α — безразмерная величина, зависящая от размерности пространства; D — постоянная, называемая коэффициентом диффузии. Размерность D , как видно из (П.3.3), равна (длина)²/время. Если величине D придать смысл квадрата смещения частицы в фиксированном направлении за единицу времени, то легко определить коэффициент α . Так, для одномерного пространства $\alpha_1=2$, так как смещения вправо и влево эквивалентны, а при вычислении $S^2(t)$ они учитываются совместно. Для двухмерного пространства с независимыми смещениями по x и y вследствие симметрии $\overline{x^2(t)} = \overline{y^2(t)} = 2Dt$. Поэтому можно записать

$$\overline{S^2} = \alpha_2 D t = \overline{x^2(t)} + \overline{y^2(t)} = 4Dt \quad \text{или} \quad \alpha_2 = 4 \quad (\text{П.3.4})$$

Проводя аналогичное рассуждение для трехмерного пространства, получим $\alpha_3=6$.

Поскольку в (П.3.3) усреднение проведено по множеству реализаций, то, дифференцируя его по времени, получим

$$\overline{S \cdot \dot{S}} = \frac{\alpha}{2} D \quad (\text{П.3.5})$$

Левая часть этого равенства определяется характером движения диффундирующей частицы. Для случая молекулярной диффузии ее можно вычислить на основе усреднения уравнения движения частицы под действием случайной силы F . Считая, что коэффициент сопротивления h при движении частицы величина постоянная, получим

$$m\ddot{S} + h\dot{S} = F \quad (\text{П.3.6})$$

После умножения обеих частей этого уравнения на S его можно переписать в виде

$$\frac{d}{dt} (S\dot{S}) - (\dot{S})^2 + \frac{h}{m} S\dot{S} = \frac{F}{m} S \quad (\text{П.3.7})$$

Если усреднить это уравнение по множеству реализаций и учесть, что для системы, находящейся в термодинамическом равновесии, $\overline{(\dot{S})^2} = kT/m$, а $\overline{FS} = 0$ вследствие независимости S и F , то получим

$$\frac{d}{dt} (\overline{S\dot{S}}) + \frac{h}{m} \overline{S\dot{S}} = \frac{kT}{m} \quad (\text{П.3.8})$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\overline{S\dot{S}} = \frac{kT}{h} + C e^{-\frac{h}{m}t} \quad (\text{П.3.9})$$

где C — постоянная интегрирования.

При $t \gg \frac{m}{h}$, т. е. для времен, больших по сравнению с постоянной времени движения частицы, из (П.3.8) получим

$$\overline{S\dot{S}} = \frac{kT}{h} \quad (\text{П.3.10})$$

Для оценивания времени выхода на решение (П.3.10) запишем постоянную времени для сферической частицы в виде

$$\frac{m}{h} = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \frac{1}{6\pi\eta R} = \frac{2}{9} \cdot \frac{R^2}{\nu} \quad (\text{П.3.11})$$

Для $R=10^{-4}$ см, $\nu=0,01$ см²/с, $m/h=2 \cdot 10^{-7}$ с.

Из (П.3.10) и (П.3.4), при $\alpha=2$ для одномерного случая, получаем классическое соотношение Эйнштейна

$$D_M = \frac{kT}{h} \quad (\text{П.3.12})$$

При турбулентной диффузии, когда взвешенная частица переносится пульсациями масштаба λ , соотношение (П.3.12) для одномерного случая можно записать в виде

$$D_T \approx \Delta l v \quad (\text{П.3.13})$$

где Δl и v — характерное расстояние, которое проходит частица под действием этих пульсаций, и ее скорость. Если основное влияние на перемещение частицы оказывают крупномасштабные пульсации, которыми она захватывается, то инерционными членами в уравнении ее движения можно пренебречь, и в результате получим, что коэффициент диффузии для нее будет равен коэффициенту диффузии воздействующих на нее вихрей [82]. Это так называемый случай свободной турбулентной диффузии, который реализуется в процессах перемешивания диспергированного вещества в турбулентном потоке. отождествляя Δl с размером пульсации масштаба λ , а v с ее скоростью и учитывая соотношения (П.1.5) и (П.1.10), из (П.3.12) получим

$$D_T \approx \lambda v_\lambda = \begin{cases} \gamma (\varepsilon_0 \lambda^4)^{1/3} & \text{при } \lambda > \lambda_0 \\ \gamma \left(\frac{\varepsilon_0}{\nu}\right)^{1/2} \lambda^2 & \text{при } \lambda < \lambda_0 \end{cases} \quad (\text{П.3.14})$$

где γ — масштабный коэффициент.

Если нас интересует не свободная диффузия частиц, а их взаимная диффузия, влияющая на относительное положение частиц, как, например, в процессе коалесценции, то коэффициент взаимной диффузии под действием турбулентных пульсаций масштаба λ можно определить по аналогии с коэффициентом свободной диффузии в виде

$$D \approx \gamma \Delta S u \quad (\text{П. 3.15})$$

где u и ΔS — относительная скорость и расстояние, пройденное частицами при их сближении под действием пульсации масштаба λ . Полагая $\Delta S = T_\lambda u$ и учитывая независимость периода пульсаций от их масштаба (П.1.10), получим

$$D = \gamma \left(\frac{v}{\varepsilon_0} \right)^{1/2} u^2 \quad (\text{П. 3.16})$$

Для определения величины u введем подвижную координатную ось, проходящую через центры наблюдаемых частиц. Фиксируя на этой оси центр координат, запишем следующую систему уравнений для их движения

$$\begin{aligned} h^{(1)} (v_\lambda + u_1) + H_r^{(1)} u &= 0 \\ h^{(2)} (v_\lambda + u_2) + H_r^{(2)} u &= 0, \quad u = u_1 + u_2 \end{aligned} \quad (\text{П. 3.17})$$

u_1 и u_2 — скорости частиц, а $h^{(i)}$ и $H_r^{(i)}$ — соответственно сопротивления движению частиц вследствие вязкого обтекания при их движении и за счет гидродинамического взаимодействия при сближении на расстояние δ между их поверхностями. Решая эту систему относительно u , получим

$$u = -v_\lambda \left[1 + \frac{H_r^{(1)}}{h^{(1)}} + \frac{H_r^{(2)}}{h^{(2)}} \right]^{-1} \quad (\text{П. 3.18})$$

Величины $h^{(i)}$ и $H_r^{(i)}$ определяются равенствами

$$h^{(i)} = 6\pi\mu R_i, \quad H_r^{(i)} = 6\pi\mu \frac{R_1^2 R_2^2}{(R_1 + R_2)^2 \delta} \quad (\text{П. 3.19})$$

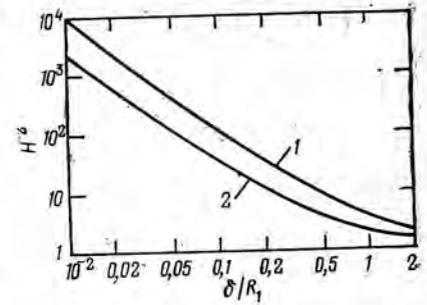
Подставляя (П.3.19) в (П.3.18), получим

$$u = -v_\lambda H, \quad H = \left[1 + \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2) \delta} \right]^{-1} \quad (\text{П. 3.20})$$

Таким образом, скорости относительного перемещения частиц под действием пульсации масштаба λ отличаются от скорости самой пульсации множителем H , учитывающим гидродинамическое торможение частиц при их сближении.

По мере изменения расстояния между частицами меняется и характерный масштаб пульсаций, оказывающий основное влияние на их относительное движение. Строго определить масштаб этих пульсаций не представляется возможным, хотя и можно предложить для него аппроксимирующую зависимость, удовлетворяющую следующей системе предельных условий.

Рис. П.3.1. Зависимость множителя H в коэффициенте турбулентной диффузии от относительного расстояния между частицами δ/R_2 для случаев: 1 — $R_1 = R_2$; 2 — $R_1 \gg R_2$.



Если расстояние между центрами частиц радиусов R_1 и R_2 равно r , а расстояние между их поверхностями δ , то:

- 1) $\lambda \approx r$ при $\delta \gg \max(R_1, R_2)$; 2) $\lambda \approx \min(R_1, R_2)$ при $\delta \ll \min(R_1, R_2)$;
- 3) $\lambda \approx R_2 + \delta$ при $R_1 \gg R_2$ и $\delta \ll R_1$; 4) $\lambda \approx R_1 + \delta$ при $R_2 \gg R_1$ и $\delta \ll R_2$;
- 5) $\lambda \approx r$ при $R_1 \approx R_2$

Этим условиям удовлетворяет функция

$$\lambda = \delta + \frac{(R_1 + R_2) R_1 R_2}{R_1^2 + R_2^2 - R_1 R_2} \quad (\text{П. 3.21})$$

Учитывая связь масштаба пульсации с ее скоростью (П.1.8) и подставляя (П.3.20) и (П.3.21) в (П.3.16), получим

$$D = \gamma \left(\frac{\varepsilon_0}{v} \right)^{1/2} \lambda^2 H^2 \quad (\text{П. 3.22})$$

При сравнении (П.3.22) и (П.3.14) видно, что коэффициент взаимной турбулентной диффузии двух частиц отличается от коэффициента свободной диффузии в случае $\lambda < \lambda_0$ только множителем H^2 . Порядок величины этого множителя можно оценить по рис. П.3.1, где приведены зависимости H^{-2} от δ/R_1 при $R_2 = R_1$ и $R_1 \gg R_2$.

Уравнение диффузии

Если в жидкости или газе взвешено большое количество идентичных частиц с локально изменяющейся плотностью $n(x, y, z)$, то за счет диффузии будет наблюдаться тенденция к выравниванию их плотности по объему. Возникающий при этом диффузионный поток определяется законом Фика

$$j_d = -D \text{grad } n(x, y, z, t) \quad (\text{П. 3.23})$$

Величина j_d численно равна количеству частиц, проходящих через единичную площадь в единицу времени, и имеет размерность [(длина)² · (время)]⁻¹.

Если среда, в которой происходит диффузия, сама движется с локальной скоростью $v(x, y, z, t)$, то она захватывает взвешенные в ней частицы и способствует их перемещению, которое порождает кон-

$$\begin{aligned} x &= c \frac{\sin \alpha}{\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha} \cos \varphi, & z &= c \frac{\operatorname{sh} \beta}{\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha} \\ y &= c \frac{\sin \alpha}{\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha} \sin \varphi \end{aligned} \quad (\text{П.4.1})$$

где c — константа, определяемая из геометрии задачи.

Коэффициенты Ламе и элемент площади в бисферической системе записываются в виде [157]

$$\begin{aligned} H_\alpha &= H_\beta = \frac{c}{\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha}, & H_\varphi &= \frac{c \sin \alpha}{\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha} \\ dS &= \frac{c^2 \sin \alpha}{(\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha)^2} d\alpha d\varphi \end{aligned} \quad (\text{П.4.2})$$

Радиусы капель и кратчайшее расстояние между ними δ удовлетворяют в бисферической системе следующим соотношениям

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{c}{\operatorname{sh} \beta_1}, & R_2 &= \frac{c}{\operatorname{sh} \beta_2}, \\ h_1 &= \frac{1}{2h} (h^2 + R_1^2 - R_2^2), & h_2 &= \frac{1}{2h} (h^2 + R_2^2 - R_1^2) \\ h_1 + h_2 &= R_1 + R_2 + \delta, & \beta_1 &= \ln(h_1 + c) - \ln R_1 \\ \beta_2 &= \ln(h_2 - c) - \ln R_2, & c &= (h_1^2 - R_1^2)^{1/2} = (h_2^2 - R_2^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (\text{П.4.3})$$

Граничные условия в бисферической системе координат запишутся для потенциалов капель в виде

$$V|_{\beta=\beta_1} = V_1, \quad V|_{\beta=\beta_2} = V_2 \quad (\text{П.4.4})$$

а для зарядов капель в виде

$$\begin{aligned} Q_1 &= -\frac{\varepsilon}{4\pi} \int_{S_1} \frac{1}{H_\beta} \cdot \frac{\partial V}{\partial \beta} dS \\ Q_2 &= -\frac{\varepsilon}{4\pi} \int_{S_2} \frac{1}{H_\beta} \cdot \frac{\partial V}{\partial \beta} dS \end{aligned} \quad (\text{П.4.5})$$

Здесь интегрирование ведется по поверхностям капель, обозначенным соответственно S_1 и S_2 ; ε — диэлектрическая постоянная.

Общее решение уравнения Лапласа в бисферической системе координат, согласно [157], можно записать в виде

$$\begin{aligned} V (\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha)^{1/2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} P_n^m(\cos \alpha) \left(A_n^m e^{-\frac{2n+1}{2}\beta} + B_n^m e^{\frac{2n+1}{2}\beta} \right) \times \\ \times (a_m \cos m\varphi + b_m \sin m\varphi) + V_0 \end{aligned} \quad (\text{П.4.6})$$

где P_n^m — присоединенные полиномы Лежандра; A_n^m, B_n^m, a_m и b_m — постоянные коэффициенты; V_0 — произвольная функция, удовлетворяющая уравнению Лапласа, которая в нашем случае просто

определяется и может быть представлена в виде

$$V_0 = -E (z \cos \theta + x \sin \theta) \quad (\text{П.4.7})$$

В дальнейших выкладках нам потребуются следующие соотношения

$$\begin{aligned} (\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha)^{-1/2} &= \sqrt{2} \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos \alpha) e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta|} \\ x &= 2\sqrt{2}c (\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha)^{1/2} \sum_{n=1}^{\infty} P_n^1(\cos \alpha) e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta|} \cos \varphi \\ z &= \sqrt{2}c (\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha)^{1/2} \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos \alpha) e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta|} (2n+1) \operatorname{sign} \beta \end{aligned} \quad (\text{П.4.8})$$

а также рекуррентные соотношения и специальные свойства полиномов Лежандра.

Подставляя (П.4.6) в граничные условия (П.4.4) и используя единственность разложения по полиномам Лежандра и линейную независимость синусов и косинусов с учетом соотношений (П.4.8), получим

$$\begin{aligned} V_i \sqrt{2} \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos \alpha) e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta_i|} &= \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos \alpha) \left[A_n e^{-\frac{2n+1}{2}\beta_i} + B_n e^{\frac{2n+1}{2}\beta_i} \right] + \\ &+ \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} P_n^1(\cos \alpha) \left[C_n e^{-\frac{2n+1}{2}\beta_i} + D_n e^{\frac{2n+1}{2}\beta_i} \right] - \\ &- Ec \sqrt{2} \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos \alpha) e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta_i|} (2n+1) \cos \theta \operatorname{sign} \beta - \\ &- 2Ec \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} P_n^1(\cos \alpha) e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta_i|} \sin \theta, \quad i=1, 2 \end{aligned} \quad (\text{П.4.9})$$

Здесь введены обозначения $A_n = A_n^0, B_n = B_n^0, C_n = A_n^1, D_n = B_n^1, a_0 = a_1 = 1$. Остальные коэффициенты, входящие в (П.4.6), обращаются в нуль.

Приводя подобные члены, получим следующую систему уравнений

$$\begin{aligned} A_n e^{-\frac{2n+1}{2}\beta_i} + B_n e^{\frac{2n+1}{2}\beta_i} - Ec \sqrt{2} e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta_i|} \times \\ \times (2n+1) \cos \theta \operatorname{sign} \beta = V_i \sqrt{2} e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta_i|} \\ C_n e^{-\frac{2n+1}{2}\beta_i} + D_n e^{\frac{2n+1}{2}\beta_i} - 2Ec \sqrt{2} e^{-\frac{2n+1}{2}|\beta_i|} \sin \theta = 0 \end{aligned} \quad (\text{П.4.10})$$

которую можно переписать в виде

$$A_n + B_n e^{(2n+1)\beta_i} = \sqrt{2} [V_i + Ec (2n+1) \cos \theta]$$

$$A_n e^{-(2n+1)\beta_2} + B_n = \sqrt{2} [V_2 - Ec(2n+1) \cos \theta] \quad (\text{П.4.11})$$

$$C_n + D_n e^{(2n+1)\beta_1} = 2\sqrt{2} Ec \sin \theta$$

$$C_n e^{-(2n+1)\beta_2} + D_n = 2\sqrt{2} Ec \sin \theta$$

Решая эту систему относительно A_n , B_n , C_n и D_n , получим

$$A_n = \sqrt{2} [-Ec(2n+1) \cos \theta (1 + e^{(2n+1)\beta_1}) - V_1 + V_2 e^{(2n+1)\beta_1}] b_{1n}$$

$$B_n = \sqrt{2} [Ec(2n+1) \cos \theta (1 + e^{-(2n+1)\beta_2}) + V_1 e^{-(2n+1)\beta_2} - V_2] b_{1n}$$

$$C_n = 2\sqrt{2} Ec \sin \theta [e^{-(2n+1)\beta_2} - 1] b_{1n} \quad (\text{П.4.12})$$

$$D_n = 2\sqrt{2} Ec \sin \theta [e^{-(2n+1)\beta_2} - 1] b_{1n}$$

где

$$b_{1n} = [e^{(2n+1)(\beta_1 - \beta_2)} - 1]^{-1}$$

Для определения неизвестных потенциалов капель V_1 и V_2 воспользуемся граничными условиями (П.4.5). Частная производная потенциала по параметру β , с учетом предыдущих результатов, может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \beta} \Big|_{\beta_i} &= (\text{ch } \beta_i - \cos \alpha)^{1/2} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos \alpha) \left(\frac{2n+1}{2} \right) \times \right. \\ &\times \left[A_n e^{-\frac{2n+1}{2} \beta_i} (1 - \text{sign } \beta_i) + B_n e^{\frac{2n+1}{2} \beta_i} (1 + \text{sign } \beta_i) \right] + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} P_n^1(\cos \alpha) \left(\frac{2n+1}{2} \right) \cos \varphi \left[-C_n e^{-\frac{2n+1}{2} \beta_i} (1 - \text{sign } \beta_i) + \right. \\ &\left. \left. + D_n e^{\frac{2n+1}{2} \beta_i} (1 + \text{sign } \beta_i) \right] \right\} \quad (\text{П.4.13}) \end{aligned}$$

Подставляя (П.4.13) в (П.4.5) и производя интегрирование, получим

$$Q_i = -\frac{\varepsilon c}{\sqrt{2}} \sum_{n=0}^{\infty} [A_n (1 - \text{sign } \beta_i) + B_n (1 + \text{sign } \beta_i)] \quad (\text{П.4.14})$$

Подставляя в (П.4.14) A_n и B_n из (П.4.12), получим следующую систему уравнений для определения потенциала капель

$$V_1 \Omega_1 - V_2 \Omega_2 = -\frac{Q_1}{2\varepsilon c} - Ec \cos \theta \Omega_3 \quad (\text{П.4.15})$$

$$V_1 \Omega_4 + V_2 \Omega_5 = \frac{Q_2}{2\varepsilon c} + Ec \cos \theta \Omega_6$$

где

$$\Omega_1 = \sum_{n=0}^{\infty} b_{1n} e^{-(2n+1)\beta_1}, \quad \Omega_2 = \sum_{n=0}^{\infty} b_{1n},$$

$$\Omega_3 = \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) [1 + e^{-(2n+1)\beta_2}] b_{1n}, \quad \Omega_4 = \Omega_2,$$

$$\Omega_5 = \sum_{n=0}^{\infty} b_{1n} e^{(2n+1)\beta_1}, \quad \Omega_6 = (2n+1) [1 + e^{(2n+1)\beta_1}] b_{1n}$$

Решая эту систему уравнений, получаем следующие соотношения для определения потенциалов капель

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{2\varepsilon \Delta c} (Q_2 \Omega_2 - Q_1 \Omega_5) + Ec \cos \theta \frac{\Omega_2 \Omega_6 - \Omega_3 \Omega_5}{\Delta} \\ V_2 &= \frac{1}{2\varepsilon \Delta c} (Q_2 \Omega_1 - Q_1 \Omega_2) + Ec \cos \theta \frac{\Omega_6 \Omega_1 - \Omega_3 \Omega_2}{\Delta} \quad (\text{П.4.16}) \end{aligned}$$

где

$$\Delta = \Omega_1 \Omega_5 - \Omega_2^2$$

Таким образом, мы определили потенциал в любой точке поля в виде следующего выражения

$$\begin{aligned} V &= (\text{ch } \beta - \cos \alpha)^{1/2} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} P_n(\cos \alpha) \left(A_n e^{-\frac{2n+1}{2} \beta} + B_n e^{\frac{2n+1}{2} \beta} \right) + \right. \\ &\left. + \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} P_n^1(\cos \alpha) \left(C_n e^{-\frac{2n+1}{2} \beta} + D_n e^{\frac{2n+1}{2} \beta} \right) \right\} + V_0 \quad (\text{П.4.17}) \end{aligned}$$

в котором постоянные коэффициенты определены в виде (П.4.12) и дополнительных соотношений (П.4.16).

Из (П.4.17) легко получить соотношение для определения средней величины напряженности поля между ближайшими точками сферондов. Учитывая, что для этого случая $\alpha = \pi$, $P_n(\cos \alpha) = (-1)^n$, $P_n^1(\cos \alpha) = 0$, получим

$$\begin{aligned} \frac{V_1^* - V_2^*}{\delta} &= \frac{1}{\delta} \left[(\text{ch } \beta_1 - 1)^{1/2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_n e^{-\frac{2n+1}{2} \beta_1} + B_n e^{\frac{2n+1}{2} \beta_1} \right) (-1)^n - \right. \\ &\left. - (\text{ch } \beta_2 - 1)^{1/2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(A_n e^{-\frac{2n+1}{2} \beta_2} + B_n e^{\frac{2n+1}{2} \beta_2} \right) (-1)^n \right] + E \cos \theta \quad (\text{П.4.18}) \end{aligned}$$

На рис. П.4.2 показана зависимость отношения разности потенциалов (П.4.18) к напряженности невозмущенного поля от безразмерной величины δ/R_2 при различных соотношениях радиусов капель

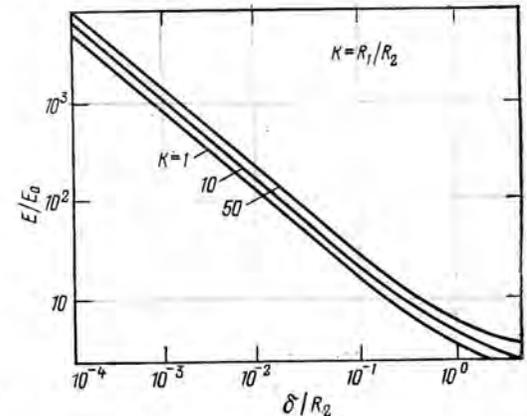


Рис. П.4.2. Зависимость средней напряженности между каплями от расстояния между ними и от отношения размеров капель $k=R_1/R_2$.

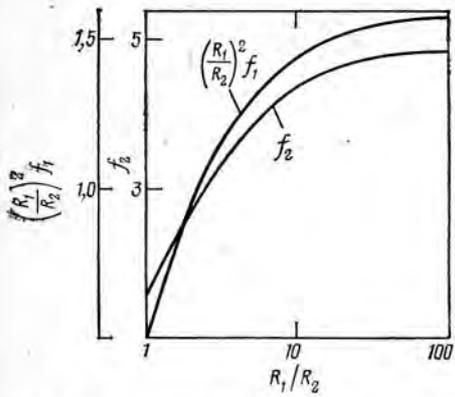


Рис. П.4.3. Зависимости функций f_1 и f_2 от отношения радиусов капель.

R_1/R_2 и при нулевых зарядах капель. Как видно из этого рисунка, при уменьшении расстояния между каплями напряженность поля между ними может на несколько порядков превысить напряженность исходного невозмущенного поля, так как при малых расстояниях

между каплями средняя напряженность поля растет как $(R_2/\delta)^{0,85}$. Такое повышение напряженности может привести к пробое между каплями, в результате чего потенциалы капель выравниваются и силовое взаимодействие между ними прекращается.

Происходящее при электрическом пробое между каплями перераспределение зарядов капель можно рассчитать на основании соотношений (П.4.16) и условия сохранения суммарного заряда на каплях. Отмечая звездочкой заряды капель после электрического пробоя между ними и используя равенство потенциалов V_1 и V_2 после электрического пробоя между каплями, получим

$$Q_1^* = (Q_1 + Q_2) f_1 - \varepsilon E R_2^2 f_2 \cos \theta \quad (\text{П.4.19})$$

$$Q_2^* = Q_1 + Q_2 - Q_1^*$$

$$f_1 = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_5 - \Omega_1}, \quad f_2 = \frac{\Omega_6 (\Omega_2 - \Omega_1) + \Omega_3 (\Omega_5 - \Omega_2)}{(\Omega_5 - \Omega_1) \Delta} \cdot \frac{C}{R_2^2}$$

Коэффициенты f_1 и f_2 были вычислены при различных значениях определяющих их параметров. Расчеты показали, что при $\delta/R_2 < 0,05$ значения f_1 и f_2 практически не зависят от расстояния между каплями, и их можно аппроксимировать следующими выражениями.

$$f_1 = 1,6 \frac{1}{k^2} \left(1 - \frac{0,96k}{0,4 + k^2} \right) \quad (\text{П.4.20})$$

$$f_2 = 1,64 \left[3 - 3,5 \frac{(k - 0,24)^2}{k^3} \right], \quad k = \frac{R_1}{R_2}$$

Зависимости f_1 и f_2 от k приведены на рис. П.4.3.

Перейдем к нахождению сил, действующих на капли. Как известно [159], выражение для силы, действующей на каплю в направлении единичного вектора k , можно записать в виде

$$F = \frac{\varepsilon}{8\pi} \int_S \left(\frac{1}{H\beta} \cdot \frac{\partial V}{\partial \beta} \right)^2 \bar{k} \bar{p} dS \quad (\text{П.4.21})$$

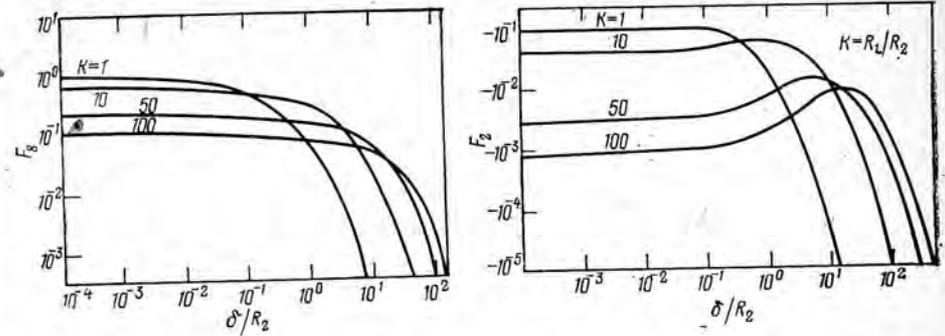


Рис. П.4.4. Зависимость функционального коэффициента F_2 от расстояния между каплями и от отношения их радиусов $k=R_1/R_2$.

Рис. П.4.5. Зависимость функционального коэффициента F_8 от расстояния между каплями и от отношения их радиусов $k=R_1/R_2$.

Здесь \bar{p} — единичный вектор внешней нормали к поверхности капли.

Для нахождения составляющих силы F по оси x и по оси z потребуются величины $\bar{k}_x \bar{p}$ и $\bar{k}_z \bar{p}$, которые в бисферической системе координат запишем в виде

$$\bar{k}_x \bar{p} = \frac{\text{ch } \beta \cos \alpha - 1}{\text{ch } \beta - \cos \alpha}, \quad \bar{k}_z \bar{p} = \frac{\sin \alpha \text{ sh } \beta \cos \varphi}{\text{ch } \beta - \cos \alpha} \quad (\text{П.4.22})$$

Найдем силу, действующую на каплю радиусом R_2 . Из (П.4.21), (П.4.22) и (П.4.12) получим следующее соотношение для вычисления ее составляющей

$$F_z = \frac{\varepsilon}{8\pi} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} \left(\sum_{n=0}^{\infty} P_n G_n + \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} P_n^1 G_n^1 \right)^2 \times \\ \times (1 - \text{ch } \beta_2 \cos \alpha) d \cos \alpha d\varphi \quad (\text{П.4.23})$$

где

$$G_n = (2n + 1) A_n e^{-\frac{2n+1}{2} \beta_2}, \quad G_n^1 = (2n + 1) C_n e^{-\frac{2n+1}{2} \beta_2}$$

Вычисляя интегралы с использованием рекуррентных соотношений и специальных свойств для полиномов Лежандра, получим

$$F_z = \frac{\varepsilon}{2} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (2n + 1) e^{-(2n+1) \beta_2} [2A_n^2 + n(n+1) C_n^2] - \right. \\ \left. - \text{ch } \beta_2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) e^{-(2n+1) \beta_2} [2A_n A_{n+1} + n(n+2) C_n C_{n+1}] \right\} \quad (\text{П.4.24})$$

Аналогичным образом для F_x получаем

$$F_x = \frac{\varepsilon}{2} \operatorname{sh} \beta_2 \sum_{n=0}^{\infty} \{A_n e^{-2n\beta_2} [(n+2)C_{n+1} e^{-\beta_2} - nC_{n-1}] (n+1)\} \quad (\text{П.4.25})$$

Подставляя в (П.4.24) и (П.4.25) значения A_n и C_n и производя хотя и простые, но очень громоздкие преобразования, можно привести их к виду

$$F_z = \varepsilon R_2^2 E^2 (F_1 \cos^2 \theta + F_2 \sin^2 \theta) + E \cos \theta (F_3 Q_1 + F_4 Q_2) + \frac{1}{\varepsilon R_2^2} (F_5 Q_1^2 + F_6 Q_1 Q_2 + F_7 Q_2^2) + E Q_2 \cos \theta \quad (\text{П.4.26})$$

$$F_x = \varepsilon R_2^2 E^2 F_8 \sin 2\theta + E \sin \theta (F_9 Q_1 + F_{10} Q_2) + E Q_2 \sin \theta$$

Функциональные коэффициенты F_i ($i=1, 2, \dots, 10$) были рассчитаны для различных значений определяющих их параметров. Результаты расчетов сведены в соответствующие таблицы (см. с. 199—205).

Аналитические выражения для этих коэффициентов довольно громоздки и мы их не приводим. На рис. 1.5, П.4.4 и П.4.5 показаны зависимости F_1 , F_2 и F_8 от относительного расстояния между каплями при различных отношениях их радиусов*. При малых относительных расстояниях между каплями F_1 растет как $(R_2/\delta)^{0,85}$, а при больших — F_1 убывает как $(R_2/\delta)^4$, что соответствует диполь-дипольному взаимодействию между каплями. Функция F_8 на больших расстояниях убывает как четвертая степень этого расстояния и растет как $(R_2/\delta)^0$,¹ на малых расстояниях.

* Остальные коэффициенты в расчетах настоящей работы не использовались.

Таблица значений F_1

δ/R_2	k									
	1	2	5	10	20	50	100			
10^4	390,7	839,3	1385	1648	1803	1907	1943			
10^{-3}	59,49	127,7	212,9	254,8	279,5	296	301,8			
$5 \cdot 10^{-3}$	16,54	35,55	59,70	71,49	78,35	82,83	84,39			
10^{-2}	9,55	20,59	34,63	41,39	45,23	47,70	48,54			
$4 \cdot 10^{-2}$	3,11	6,79	11,44	13,49	14,51	15,07	15,25			
$8 \cdot 10^{-2}$	1,71	3,8	6,42	7,46	7,88	8,04	8,06			
10^{-1}	1,40	3,13	5,31	6,127	6,41	6,48	6,48			
$2 \cdot 10^{-1}$	7,17 \cdot 10^{-1}	1,67	2,89	3,255	3,27	3,16	3,09			
$5 \cdot 10^{-1}$	2,52 \cdot 10^{-1}	6,54 \cdot 10^{-1}	1,25	1,391	1,29	1,08	9,70 \cdot 10^{-1}			
1	9,27 \cdot 10^{-2}	2,76 \cdot 10^{-1}	6,42 \cdot 10^{-1}	7,69 \cdot 10^{-1}	6,91 \cdot 10^{-1}	4,91 \cdot 10^{-1}	3,76 \cdot 10^{-1}			
2	2,53 \cdot 10^{-2}	9,1 \cdot 10^{-2}	2,87 \cdot 10^{-1}	4,24 \cdot 10^{-1}	4,27 \cdot 10^{-1}	2,91 \cdot 10^{-1}	1,90 \cdot 10^{-1}			
5	2,53 \cdot 10^{-3}	1,22 \cdot 10^{-2}	6,13 \cdot 10^{-2}	1,37 \cdot 10^{-1}	2,02 \cdot 10^{-1}	1,87 \cdot 10^{-1}	1,29 \cdot 10^{-1}			
10	2,9 \cdot 10^{-4}	1,69 \cdot 10^{-3}	1,21 \cdot 10^{-2}	3,76 \cdot 10^{-2}	8 \cdot 10^{-2}	1,14 \cdot 10^{-1}	9,75 \cdot 10^{-2}			
20	2,56 \cdot 10^{-5}	1,72 \cdot 10^{-4}	1,66 \cdot 10^{-3}	6,93 \cdot 10^{-3}	2,09 \cdot 10^{-2}	5,01 \cdot 10^{-2}	5,96 \cdot 10^{-2}			
50	8,21 \cdot 10^{-3}	6,08 \cdot 10^{-6}	7,64 \cdot 10^{-5}	4,37 \cdot 10^{-4}	1,97 \cdot 10^{-3}	8,96 \cdot 10^{-3}	1,82 \cdot 10^{-2}			
100	5,5 \cdot 10^{-8}	4,26 \cdot 10^{-7}	5,94 \cdot 10^{-6}	3,96 \cdot 10^{-5}	2,26 \cdot 10^{-4}	1,55 \cdot 10^{-3}	4,58 \cdot 10^{-3}			

Таблица значений F_2

δ/R_2	k									
	1	2	5	10	20	50	100			
10^4	1,04 \cdot 10^{-1}	1,51 \cdot 10^{-1}	1,02 \cdot 10^{-1}	4,63 \cdot 10^{-2}	1,61 \cdot 10^{-2}	3,17 \cdot 10^{-3}	8,51 \cdot 10^{-4}			
10^{-3}	1,04 \cdot 10^{-1}	1,51 \cdot 10^{-1}	1,02 \cdot 10^{-1}	4,63 \cdot 10^{-2}	1,61 \cdot 10^{-2}	3,17 \cdot 10^{-3}	8,53 \cdot 10^{-4}			
$5 \cdot 10^{-3}$	1,04 \cdot 10^{-1}	1,51 \cdot 10^{-1}	1,02 \cdot 10^{-1}	4,64 \cdot 10^{-2}	1,61 \cdot 10^{-2}	3,18 \cdot 10^{-3}	8,56 \cdot 10^{-4}			
10^{-2}	1,03 \cdot 10^{-1}	1,50 \cdot 10^{-1}	1,02 \cdot 10^{-1}	4,65 \cdot 10^{-2}	1,62 \cdot 10^{-2}	3,19 \cdot 10^{-3}	8,59 \cdot 10^{-4}			
$4 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	1,48 \cdot 10^{-1}	1,03 \cdot 10^{-1}	4,71 \cdot 10^{-2}	1,65 \cdot 10^{-2}	3,27 \cdot 10^{-3}	8,81 \cdot 10^{-4}			
$8 \cdot 10^{-2}$	9,65 \cdot 10^{-2}	1,45 \cdot 10^{-1}	1,03 \cdot 10^{-1}	4,79 \cdot 10^{-2}	1,69 \cdot 10^{-2}	3,37 \cdot 10^{-3}	9,1 \cdot 10^{-4}			
10^{-1}	9,45 \cdot 10^{-2}	1,44 \cdot 10^{-1}	1,03 \cdot 10^{-1}	4,83 \cdot 10^{-2}	1,71 \cdot 10^{-2}	3,43 \cdot 10^{-3}	9,25 \cdot 10^{-4}			

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
$2 \cdot 10^{-1}$	$8,52 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-1}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$5,02 \cdot 10^{-2}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$3,68 \cdot 10^{-3}$	$9,99 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-1}$	$6,04 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-1}$	$1,02 \cdot 10^{-1}$	$5,45 \cdot 10^{-2}$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$4,43 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$
1	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$7,59 \cdot 10^{-2}$	$9,27 \cdot 10^{-2}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$
2	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$3,50 \cdot 10^{-2}$	$6,72 \cdot 10^{-2}$	$5,58 \cdot 10^{-2}$	$2,88 \cdot 10^{-2}$	$7,55 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$
5	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$5,75 \cdot 10^{-3}$	$2,31 \cdot 10^{-2}$	$3,44 \cdot 10^{-2}$	$2,84 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
10	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$8,37 \cdot 10^{-4}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$5,31 \cdot 10^{-3}$
20	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$8,57 \cdot 10^{-5}$	$8,15 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$7,51 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$6,09 \cdot 10^{-3}$
50	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$3,04 \cdot 10^{-6}$	$3,81 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-4}$	$9,23 \cdot 10^{-4}$	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$4,09 \cdot 10^{-3}$
100	$2,77 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-7}$	$2,97 \cdot 10^{-6}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$	$6,95 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$

Таблица значений F_3

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
10^{-4}	237,8	135,1	36,67	10,96	3	$5,08 \cdot 10^{-1}$	$1,29 \cdot 10^{-1}$
10	36,39	20,59	5,64	1,69	$4,66 \cdot 10^{-1}$	$7,89 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-2}$
$5 \cdot 10^{-3}$	10,25	5,77	1,58	$4,76 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$2,21 \cdot 10^{-2}$	$5,63 \cdot 10^{-3}$
10^{-2}	5,99	3,36	$9,2 \cdot 10^{-1}$	$2,76 \cdot 10^{-1}$	$7,54 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$3,24 \cdot 10^{-3}$
$4 \cdot 10^{-2}$	2,04	1,13	$3,06 \cdot 10^{-1}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$2,42 \cdot 10^{-2}$	$4,07 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$
$8 \cdot 10^{-2}$	1,17	$6,46 \cdot 10^{-1}$	$1,73 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$2,14 \cdot 10^{-3}$	$5,38 \cdot 10^{-4}$
10^{-1}	$9,74 \cdot 10^{-1}$	$5,37 \cdot 10^{-1}$	$1,44 \cdot 10^{-1}$	$4,11 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$4,32 \cdot 10^{-4}$
$2 \cdot 10^{-1}$	$5,34 \cdot 10^{-1}$	$2,96 \cdot 10^{-1}$	$7,93 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$5,48 \cdot 10^{-3}$	$8,44 \cdot 10^{-4}$	$2,06 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-1}$	$2,17 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$3,57 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$	$6,47 \cdot 10^{-5}$
1	$9,51 \cdot 10^{-2}$	$5,76 \cdot 10^{-2}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-5}$
2	$3,42 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$9,08 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$	$7,54 \cdot 10^{-4}$	$7,95 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-5}$
5	$5,92 \cdot 10^{-3}$	$4,22 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$3,75 \cdot 10^{-4}$	$5,24 \cdot 10^{-5}$	$8,88 \cdot 10^{-6}$
10	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$9,27 \cdot 10^{-4}$	$5,63 \cdot 10^{-4}$	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$	$6,82 \cdot 10^{-6}$
20	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$7,84 \cdot 10^{-5}$	$4,59 \cdot 10^{-5}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-6}$
50	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$6,21 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^{-6}$	$1,42 \cdot 10^{-6}$
100	$1,88 \cdot 10^{-6}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$	$1,68 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$6,86 \cdot 10^{-7}$	$3,98 \cdot 10^{-7}$

Таблица значений F_4

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
10^{-4}	237,7	466,1	674,5	744,7	777	795	800,7
10^{-3}	36,39	71,46	1050	116,9	122,6	125,9	126,9
$5 \cdot 10^{-3}$	10,25	20,3	30,41	34,23	36,12	37,23	37,6
10^{-2}	5,99	11,96	18,16	20,59	21,82	22,55	22,8
$4 \cdot 10^{-2}$	2,04	4,23	6,749	7,83	8,41	8,78	8,9
$8 \cdot 10^{-2}$	1,17	2,52	4,20	4,98	5,43	5,71	5,81
10^{-1}	$9,74 \cdot 10^{-1}$	2,138	3,62	4,34	4,75	5,02	5,11
$2 \cdot 10^{-1}$	$5,34 \cdot 10^{-1}$	1,258	2,31	2,88	3,24	3,47	3,56
$5 \cdot 10^{-1}$	$2,17 \cdot 10^{-1}$	$5,88 \cdot 10^{-1}$	1,31	1,8	2,14	2,39	2,48
1	$9,51 \cdot 10^{-2}$	$3,06 \cdot 10^{-1}$	$8,54 \cdot 10^{-1}$	1,32	1,69	1,97	2,09
2	$3,42 \cdot 10^{-2}$	$1,37 \cdot 10^{-1}$	$5,14 \cdot 10^{-1}$	$9,50 \cdot 10^{-1}$	1,36	1,73	1,88
5	$5,92 \cdot 10^{-3}$	$3,16 \cdot 10^{-2}$	$1,89 \cdot 10^{-1}$	$4,91 \cdot 10^{-1}$	$9,15 \cdot 10^{-1}$	1,43	1,68
10	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$6,11 \cdot 10^{-2}$	$2,16 \cdot 10^{-1}$	$5,38 \cdot 10^{-1}$	1,1	1,46
20	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$6,71 \cdot 10^{-2}$	$2,32 \cdot 10^{-1}$	$6,98 \cdot 10^{-1}$	1,13
50	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$8,81 \cdot 10^{-3}$	$4,47 \cdot 10^{-2}$	$2,43 \cdot 10^{-1}$	$5,81 \cdot 10^{-1}$
100	$1,88 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$9,03 \cdot 10^{-3}$	$7,26 \cdot 10^{-2}$	$2,46 \cdot 10^{-1}$

Таблица значений F_5

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
10^{-4}	36,16	5,43	$2,43 \cdot 10^{-1}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$3,39 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-6}$
10^{-3}	5,551	$8,3 \cdot 10^{-1}$	$3,73 \cdot 10^{-2}$	$2,82 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$	$5,26 \cdot 10^{-6}$	$3,35 \cdot 10^{-7}$
$5 \cdot 10^{-3}$	1,57	$2,33 \cdot 10^{-1}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$7,92 \cdot 10^{-4}$	$5,44 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-6}$	$9,38 \cdot 10^{-8}$
10^{-2}	$9,26 \cdot 10^{-1}$	$1,36 \cdot 10^{-1}$	$6,11 \cdot 10^{-3}$	$4,59 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^{-5}$	$8,48 \cdot 10^{-7}$	$5,39 \cdot 10^{-8}$
$4 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$4,66 \cdot 10^{-2}$	$2,05 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$	$2,68 \cdot 10^{-7}$	$1,69 \cdot 10^{-8}$
$8 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-1}$	$2,69 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$8,37 \cdot 10^{-5}$	$5,49 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-7}$	$8,96 \cdot 10^{-9}$
10^{-1}	$1,53 \cdot 10^{-1}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$9,69 \cdot 10^{-4}$	$6,89 \cdot 10^{-5}$	$4,47 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
$2 \cdot 10^{-1}$	$8,26 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$5,42 \cdot 10^{-4}$	$3,71 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-6}$	$5,63 \cdot 10^{-8}$	$3,43 \cdot 10^{-9}$
$5 \cdot 10^{-1}$	$2,99 \cdot 10^{-2}$	$5,28 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-5}$	$9,21 \cdot 10^{-7}$	$1,93 \cdot 10^{-8}$	$1,08 \cdot 10^{-9}$
1	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$9,61 \cdot 10^{-6}$	$5,11 \cdot 10^{-7}$	$8,91 \cdot 10^{-9}$	$4,21 \cdot 10^{-10}$
2	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$6,87 \cdot 10^{-4}$	$6,39 \cdot 10^{-5}$	$5,64 \cdot 10^{-6}$	$3,31 \cdot 10^{-7}$	$5,42 \cdot 10^{-9}$	$2,16 \cdot 10^{-10}$
5	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	$1,92 \cdot 10^{-6}$	$1,69 \cdot 10^{-7}$	$3,66 \cdot 10^{-9}$	$1,52 \cdot 10^{-10}$
10	$8,12 \cdot 10^{-6}$	$5,43 \cdot 10^{-6}$	$1,92 \cdot 10^{-6}$	$4,91 \cdot 10^{-7}$	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$2,37 \cdot 10^{-9}$	$1,19 \cdot 10^{-10}$
20	$3,89 \cdot 10^{-7}$	$3,12 \cdot 10^{-7}$	$1,69 \cdot 10^{-7}$	$6,99 \cdot 10^{-8}$	$1,73 \cdot 10^{-8}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$	$7,71 \cdot 10^{-11}$
50	$5,26 \cdot 10^{-9}$	$4,78 \cdot 10^{-9}$	$3,63 \cdot 10^{-9}$	$2,37 \cdot 10^{-9}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$	$2,55 \cdot 10^{-11}$
100	$1,81 \cdot 10^{-10}$	$1,72 \cdot 10^{-10}$	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$1,19 \cdot 10^{-10}$	$7,71 \cdot 10^{-11}$	$2,55 \cdot 10^{-11}$	$6,09 \cdot 10^{-12}$

Таблица значений F_6

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
10^{-4}	72,47	37,56	8,94	2,48	$6,48 \cdot 10^{-1}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$2,67 \cdot 10^{-2}$
10^{-3}	11,25	5,82	1,4	$3,92 \cdot 10^{-1}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$4,26 \cdot 10^{-3}$
$5 \cdot 10^{-3}$	3,3	1,7	$4,15 \cdot 10^{-1}$	$1,17 \cdot 10^{-1}$	$3,09 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$
1	2,0	1,03	$2,53 \cdot 10^{-1}$	$7,18 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$7,93 \cdot 10^{-4}$
4	$7,91 \cdot 10^{-1}$	$4,04 \cdot 10^{-1}$	$1,02 \cdot 10^{-1}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	$7,84 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
8	$5,17 \cdot 10^{-1}$	$2,64 \cdot 10^{-1}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$5,35 \cdot 10^{-3}$	$8,95 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$
10^{-1}	$4,53 \cdot 10^{-1}$	$2,32 \cdot 10^{-1}$	$6,03 \cdot 10^{-2}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$	$4,78 \cdot 10^{-3}$	$8,02 \cdot 10^{-4}$	$2,04 \cdot 10^{-4}$
$2 \cdot 10^{-1}$	$3,05 \cdot 10^{-1}$	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$4,27 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$3,52 \cdot 10^{-3}$	$5,96 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-1}$	$9,77 \cdot 10^{-2}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$9,19 \cdot 10^{-3}$	$2,61 \cdot 10^{-3}$	$4,51 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$
1	$1,15 \cdot 10^{-1}$	$6,62 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$7,49 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$3,96 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$
2	$6,28 \cdot 10^{-2}$	$4,04 \cdot 10^{-2}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$	$6,05 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-3}$	$3,63 \cdot 10^{-4}$	$9,61 \cdot 10^{-5}$
5	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$8,28 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-4}$	$8,92 \cdot 10^{-5}$
10	$6,94 \cdot 10^{-3}$	$5,92 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$2,27 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$2,69 \cdot 10^{-4}$	$8,12 \cdot 10^{-5}$
20	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$5,95 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$6,83 \cdot 10^{-5}$
50	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$3,56 \cdot 10^{-4}$	$3,19 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$4,38 \cdot 10^{-5}$
100	$9,61 \cdot 10^{-5}$	$9,43 \cdot 10^{-5}$	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$8,12 \cdot 10^{-5}$	$6,83 \cdot 10^{-5}$	$4,38 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^{-5}$

Таблица значений F_7

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
10^{-4}	36,16	64,68	81,99	83,94	83,46	82,59	82,19
10^{-3}	5,55	9,95	12,80	13,21	13,20	13,1	13,05
$5 \cdot 10^{-3}$	1,57	2,84	3,73	3,88	3,90	3,88	3,87
10^{-2}	$9,26 \cdot 10^{-1}$	1,68	2,23	2,34	2,35	2,35	2,34
$4 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$5,99 \cdot 10^{-1}$	$8,23 \cdot 10^{-1}$	$8,74 \cdot 10^{-1}$	$8,87 \cdot 10^{-1}$	$8,88 \cdot 10^{-1}$	$8,87 \cdot 10^{-1}$
$8 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-1}$	$3,54 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	$5,37 \cdot 10^{-1}$	$5,48 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-1}$
10^{-1}	$1,53 \cdot 10^{-1}$	$2,98 \cdot 10^{-1}$	$4,25 \cdot 10^{-1}$	$4,59 \cdot 10^{-1}$	$4,68 \cdot 10^{-1}$	$4,71 \cdot 10^{-1}$	$4,71 \cdot 10^{-1}$
$2 \cdot 10^{-1}$	$8,26 \cdot 10^{-2}$	$1,67 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$2,75 \cdot 10^{-1}$	$2,83 \cdot 10^{-1}$	$2,85 \cdot 10^{-1}$	$2,85 \cdot 10^{-1}$
$5 \cdot 10^{-1}$	$2,99 \cdot 10^{-2}$	$6,62 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,26 \cdot 10^{-1}$	$1,32 \cdot 10^{-1}$	$1,34 \cdot 10^{-1}$	$1,35 \cdot 10^{-1}$
1	10^{-2}	$2,55 \cdot 10^{-2}$	$4,94 \cdot 10^{-2}$	$6,03 \cdot 10^{-2}$	$6,49 \cdot 10^{-2}$	$6,67 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$
2	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$6,73 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-2}$	$2,82 \cdot 10^{-2}$
5	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$5,38 \cdot 10^{-4}$	$2,21 \cdot 10^{-3}$	$4,14 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$6,65 \cdot 10^{-3}$	$6,87 \cdot 10^{-3}$
10	$8,12 \cdot 10^{-6}$	$4,47 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$7,26 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-3}$
20	$3,89 \cdot 10^{-7}$	$2,51 \cdot 10^{-6}$	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^{-5}$	$2,09 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$5,05 \cdot 10^{-4}$
50	$5,26 \cdot 10^{-9}$	$3,83 \cdot 10^{-8}$	$4,59 \cdot 10^{-7}$	$2,47 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$3,66 \cdot 10^{-5}$	$6,31 \cdot 10^{-5}$
100	$1,81 \cdot 10^{-10}$	$1,38 \cdot 10^{-9}$	$1,87 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$6,43 \cdot 10^{-7}$	$3,80 \cdot 10^{-6}$	$9,43 \cdot 10^{-6}$

Таблица значений F_8

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
10^{-4}	$5,21 \cdot 10^{-1}$	$8,27 \cdot 10^{-1}$	$8,09 \cdot 10^{-1}$	$5,77 \cdot 10^{-1}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$1,58 \cdot 10^{-1}$	$8,25 \cdot 10^{-2}$
10^{-3}	$4,65 \cdot 10^{-1}$	$7,48 \cdot 10^{-1}$	$7,43 \cdot 10^{-1}$	$5,34 \cdot 10^{-1}$	$3,25 \cdot 10^{-1}$	$1,47 \cdot 10^{-1}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$
$5 \cdot 10^{-3}$	$4,08 \cdot 10^{-1}$	$6,66 \cdot 10^{-1}$	$6,75 \cdot 10^{-1}$	$4,89 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$1,36 \cdot 10^{-1}$	$7,13 \cdot 10^{-2}$
10^{-2}	$3,76 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$4,65 \cdot 10^{-1}$	$2,86 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$6,82 \cdot 10^{-2}$
$4 \cdot 10^{-2}$	$2,94 \cdot 10^{-1}$	$5,04 \cdot 10^{-1}$	$5,41 \cdot 10^{-1}$	$4,04 \cdot 10^{-1}$	$2,51 \cdot 10^{-1}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$	$6,06 \cdot 10^{-2}$
$8 \cdot 10^{-2}$	$2,43 \cdot 10^{-1}$	$4,31 \cdot 10^{-1}$	$4,82 \cdot 10^{-1}$	$3,66 \cdot 10^{-1}$	$2,31 \cdot 10^{-1}$	$1,07 \cdot 10^{-1}$	$5,63 \cdot 10^{-2}$
10^{-2}	$2,25 \cdot 10^{-1}$	$4,05 \cdot 10^{-1}$	$4,61 \cdot 10^{-1}$	$3,53 \cdot 10^{-1}$	$2,24 \cdot 10^{-1}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$5,48 \cdot 10^{-2}$

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
$2 \cdot 10^{-1}$	$1,65 \cdot 10^{-1}$	$3,17 \cdot 10^{-1}$	$3,89 \cdot 10^{-1}$	$3,11 \cdot 10^{-1}$	$2,01 \cdot 10^{-1}$	$9,52 \cdot 10^{-2}$	$5,04 \cdot 10^{-2}$
$5 \cdot 10^{-1}$	$8,67 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-1}$	$2,82 \cdot 10^{-1}$	$2,48 \cdot 10^{-1}$	$1,71 \cdot 10^{-1}$	$8,41 \cdot 10^{-2}$	$4,52 \cdot 10^{-2}$
1	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$1,91 \cdot 10^{-1}$	$1,93 \cdot 10^{-1}$	$1,46 \cdot 10^{-1}$	$7,65 \cdot 10^{-2}$	$4,21 \cdot 10^{-2}$
2	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$4,01 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$	$6,81 \cdot 10^{-2}$	$3,92 \cdot 10^{-2}$
5	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$5,91 \cdot 10^{-3}$	$2,67 \cdot 10^{-2}$	$5,14 \cdot 10^{-2}$	$6,46 \cdot 10^{-2}$	$5,18 \cdot 10^{-2}$	$3,38 \cdot 10^{-2}$
10	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$8,42 \cdot 10^{-4}$	$5,81 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$3,45 \cdot 10^{-2}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$
20	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$8,58 \cdot 10^{-5}$	$8,23 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$8,99 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$1,79 \cdot 10^{-2}$
50	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$3,04 \cdot 10^{-6}$	$3,81 \cdot 10^{-6}$	$2,17 \cdot 10^{-4}$	$9,55 \cdot 10^{-4}$	$3,82 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
100	$2,84 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-7}$	$2,97 \cdot 10^{-7}$	$1,98 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$7,34 \cdot 10^{-4}$	$1,95 \cdot 10^{-3}$

Таблица значений F_9

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
10^{-4}	$3,6 \cdot 10^{-1}$	$1,39 \cdot 10^{-1}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$5,83 \cdot 10^{-4}$	$4,22 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$
10^{-3}	$3,26 \cdot 10^{-1}$	$1,26 \cdot 10^{-1}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$3,56 \cdot 10^{-3}$	$5,42 \cdot 10^{-4}$	$3,93 \cdot 10^{-5}$	$5,13 \cdot 10^{-6}$
$5 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$	$1,81 \cdot 10^{-2}$	$3,26 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3,64 \cdot 10^{-5}$	$4,75 \cdot 10^{-6}$
10^{-2}	$2,71 \cdot 10^{-1}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$1,71 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$4,76 \cdot 10^{-4}$	$3,48 \cdot 10^{-5}$	$4,55 \cdot 10^{-6}$
$4 \cdot 10^{-2}$	$2,19 \cdot 10^{-1}$	$8,69 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$2,69 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-4}$	$3,08 \cdot 10^{-5}$	$4,04 \cdot 10^{-6}$
$8 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	$7,49 \cdot 10^{-2}$	$1,29 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{-6}$
10^{-1}	$1,73 \cdot 10^{-1}$	$7,06 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$3,73 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$3,66 \cdot 10^{-6}$
$2 \cdot 10^{-1}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$	$5,61 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-3}$	$3,36 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$3,36 \cdot 10^{-6}$
$5 \cdot 10^{-1}$	$7,74 \cdot 10^{-2}$	$3,52 \cdot 10^{-2}$	$7,63 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$2,85 \cdot 10^{-4}$	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$3,01 \cdot 10^{-6}$
1	$4,07 \cdot 10^{-2}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	$5,25 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$2,81 \cdot 10^{-6}$
2	$1,62 \cdot 10^{-2}$	$9,12 \cdot 10^{-3}$	$2,95 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$2,61 \cdot 10^{-6}$
5	$2,93 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-3}$	$8,95 \cdot 10^{-4}$	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-6}$
10	$5,79 \cdot 10^{-4}$	$4,58 \cdot 10^{-4}$	$2,59 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$5,16 \cdot 10^{-5}$	$9,26 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$
20	$9,39 \cdot 10^{-5}$	$8,23 \cdot 10^{-5}$	$5,77 \cdot 10^{-5}$	$3,58 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$4,75 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
50	$7,11 \cdot 10^{-6}$	$6,72 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$4,44 \cdot 10^{-6}$	$2,92 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$4,59 \cdot 10^{-7}$
100	$9,42 \cdot 10^{-7}$	$9,15 \cdot 10^{-7}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	$7,32 \cdot 10^{-7}$	$5,69 \cdot 10^{-7}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-7}$

Таблица значений F_{10}

δ/R_2	k						
	1	2	5	10	20	50	100
10^{-4}	$3,6 \cdot 10^{-1}$	$6,24 \cdot 10^{-1}$	$8,42 \cdot 10^{-1}$	$9,18 \cdot 10^{-1}$	$9,58 \cdot 10^{-1}$	$9,83 \cdot 10^{-1}$	$9,91 \cdot 10^{-1}$
10^{-3}	$3,26 \cdot 10^{-1}$	$5,79 \cdot 10^{-1}$	$8,1 \cdot 10^{-1}$	$8,99 \cdot 10^{-1}$	$9,47 \cdot 10^{-1}$	$9,78 \cdot 10^{-1}$	$9,89 \cdot 10^{-1}$
$5 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$5,33 \cdot 10^{-1}$	$7,75 \cdot 10^{-1}$	$8,78 \cdot 10^{-1}$	$9,35 \cdot 10^{-1}$	$9,73 \cdot 10^{-1}$	$9,86 \cdot 10^{-1}$
10^{-2}	$2,71 \cdot 10^{-1}$	$5,06 \cdot 10^{-1}$	$7,55 \cdot 10^{-1}$	$8,66 \cdot 10^{-1}$	$9,29 \cdot 10^{-1}$	$9,7 \cdot 10^{-1}$	$9,85 \cdot 10^{-1}$
$4 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$4,36 \cdot 10^{-1}$	$7,01 \cdot 10^{-1}$	$8,31 \cdot 10^{-1}$	$9,09 \cdot 10^{-1}$	$9,62 \cdot 10^{-1}$	$9,81 \cdot 10^{-1}$
$8 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-1}$	$3,89 \cdot 10^{-1}$	$6,62 \cdot 10^{-1}$	$8,06 \cdot 10^{-1}$	$8,95 \cdot 10^{-1}$	$9,56 \cdot 10^{-1}$	$9,77 \cdot 10^{-1}$
10^{-1}	$1,73 \cdot 10^{-1}$	$3,72 \cdot 10^{-1}$	$6,47 \cdot 10^{-1}$	$7,96 \cdot 10^{-1}$	$8,9 \cdot 10^{-1}$	$9,53 \cdot 10^{-1}$	$9,76 \cdot 10^{-1}$
$2 \cdot 10^{-1}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$5,91 \cdot 10^{-1}$	$7,58 \cdot 10^{-1}$	$8,67 \cdot 10^{-1}$	$9,43 \cdot 10^{-1}$	$9,71 \cdot 10^{-1}$
$5 \cdot 10^{-1}$	$7,74 \cdot 10^{-2}$	$2,12 \cdot 10^{-1}$	$4,86 \cdot 10^{-1}$	$6,81 \cdot 10^{-1}$	$8,2 \cdot 10^{-1}$	$9,22 \cdot 10^{-1}$	$9,6 \cdot 10^{-1}$
1	$4,07 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$	$3,76 \cdot 10^{-1}$	$5,89 \cdot 10^{-1}$	$7,58 \cdot 10^{-1}$	$8,92 \cdot 10^{-1}$	$9,44 \cdot 10^{-1}$
2	$1,62 \cdot 10^{-2}$	$6,55 \cdot 10^{-2}$	$2,47 \cdot 10^{-1}$	$4,58 \cdot 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-1}$	$8,41 \cdot 10^{-1}$	$9,16 \cdot 10^{-1}$
5	$2,93 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-2}$	$9,41 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-1}$	$4,55 \cdot 10^{-1}$	$7,12 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-1}$
10	$5,79 \cdot 10^{-4}$	$3,64 \cdot 10^{-2}$	$3,05 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$	$2,69 \cdot 10^{-1}$	$5,51 \cdot 10^{-1}$	$7,31 \cdot 10^{-1}$
20	$9,39 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-4}$	$7,11 \cdot 10^{-3}$	$3,36 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-1}$	$3,49 \cdot 10^{-1}$	$5,64 \cdot 10^{-1}$
50	$7,11 \cdot 10^{-6}$	$5,37 \cdot 10^{-5}$	$7,12 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$
100	$9,42 \cdot 10^{-7}$	$7,32 \cdot 10^{-6}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$7,31 \cdot 10^{-4}$	$4,51 \cdot 10^{-3}$	$3,63 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-1}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. Л., Химия, 1974.
2. Эмульсии. Пер. с англ. / Под ред. Абрамзона А. А. Л., Химия, 1972.
3. Абрамзон А. А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применения. Л., Химия, 1975.
4. Каспарьянц К. С. Промысловая подготовка нефти и газа. М., Недра, 1973.
5. Левченко Д. Н. и др. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения. М., Химия, 1967.
6. Лобков А. М. Сбор и обработка нефти и газа на промысле. М., Недра, 1968.
7. Орлов Л. Н. Канд. дис. М., ВНИИ НП, 1972.
8. Карцев А. А. Основы геохимии нефти и газа. М., Недра, 1969, с. 80—101.
9. Сухарев Г. М. Гидрогеология и воды нефтяных и газовых месторождений. М., Гостоптехиздат, 1959.
10. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. Пер. с англ. / Под ред. Буевича Ю. А. М., Мир, 1976.
11. Barnea E., Mizrahi G. — Can. J. Chem. Eng., 1975, v. 53, № 5, p. 461.
12. Буевич Ю. А., Сафрай В. М. — Теорет. основы хим. технол., 1972, т. 6, № 4, с. 596—602.
13. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М., изд-во АН СССР, 1955.
14. Бетчелор Дж. Введение в динамику жидкостей. Пер. с англ. / Под ред. Степанова Г. Ю. М., Мир, 1973.
15. Brinkman H. C. — Appl. Sci. Research, 1947, v. 57, A 1, p. 27.
16. Gal-Or B., Walso S. — Chem. Eng. Sci., 1968, v. 23, p. 1431.
17. Tam Ch. K. W. — J. Fluid Mech., 1969, v. 38, № 3, p. 537.
18. Каминский В. А., Логинов В. И., Демидов С. П. — Теорет. основы хим. технол., 1975, т. 9, № 3, с. 477.
19. Гупало Ю. П. — Инж.-физ. ж., 1962, № 1, с. 29.
20. Броунштейн Б. И., Фишбейн Г. А. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных средах. Л., Химия, 1977.
21. Делицова Н. Ф., Чистяков С. И., Сляхов Ф. Л. — Нефт. хоз-во, 1972, № 9, с. 58.
22. Лукьянов Б. П. Канд. дис. Уфа, УНИ, 1967.
23. Бондаренко П. Н. Канд. дис. М., МИНХ и ГП им. М. И. Губкина, 1967.
24. Кондратьев И. А., Бондаренко П. М., Куркова З. Е. — Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1972, № 1, с. 21.
25. Клугман И. Ю. Канд. дис. Куйбышев, Политехнический ин-т, 1966.
26. Клугман И. Ю. — Коллоид. Ж., 1974, № 1, с. 49.
27. Панченко Г. М., Цабек Л. К. — В кн.: Поведение эмульсий во внешнем электрическом поле. М., Химия, 1969.
28. Мирдель Г. — В кн.: Электрофизика. Пер. с нем. / Под ред. Раховского В. И. М., Мир, 1972.
29. Анисимов Б. Ф. — Труды ВЗПИ, 1972, вып. 77, с. 156—165.
30. Верещагин И. П. и др. Основы электрогазодинамики дисперсных сред. М., Энергия, 1974.
31. Соу С. — В кн.: Реология эмульсий. Пер. с англ. / Под ред. Гогосова В. В., Николаевского В. И. М., Мир, 1975, с. 140—285.
32. Бильданов М. М., Самигуллин Ф. М., Швецов В. Н. — Уч. зап. КГПИ (Казань), 1976, вып. 158, сб. 6, с. 125—139.
33. Последние достижения в области жидкостной экстракции. Пер. с англ. М., Химия, 1974.
34. Hodgson T. D., See J. C. — J. of Col. Inter. Sci, 1969, v. 30, № 1, p. 94.
35. Нефти восточных районов СССР / Под ред. Павловой С. Н. и Дрицкой З. В. М., Гостоптехиздат, 1962.
36. Порайко И. Н., Руди В. П. — Изв. вузов. Нефть и газ, 1974, № 10, с. 38.
37. Вейцлер Ю. В. — Журн. ВХО им. Д. И. Менделеева, 1960, т. 5, № 5, с. 628.
38. Лутошкин Г. С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды к транспорту М., Недра, 1972.
39. Скрипник Я. М. и др. — Изв. вузов. Нефть и газ, 1962, № 2, с. 81.
40. Вахитов Г. Г. и др. — В кн.: Проблемы создания автоматизированных систем управления процессами разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Тезисы докладов. Казань, изв. Казанского ун-та, 1974, с. 34.
41. Алиев Ш. Н. — Промысловое дело, 1974, № 4, с. 44.
42. Демидов С. П. и др. — Нефт. хоз-во, 1973, № 3, с. 42.
43. Кузнецкий Р. С. — Инж.-физ. ж., 1971, № 1, с. 129.
44. Егоров А. И. — Труды ВНИИводоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрологии, 1972, вып. 32, с. 107—112.
45. Meister Bernard G., Scheele Georg F. — AIChE, 1967, v. 13, № 4, p. 682.
46. Meister Bernard G., Scheele Georg F. — AIChE, 1969, v. 15, № 5, p. 689.
47. Rutland D. E., Gameson G. G. — Chem. Eng. Sci., 1970, v. 25, № 11, p. 1689.
48. Пат. 3141000, 1964 (США).
49. Сорокин Ю. М. — Нефт. хоз-во, 1974, № 2, с. 62.
50. Тронов В. П., Хамидуллин Ф. Ф. — Нефтяник, 1974, № 12, с. 9.
51. Хим. и нефт. машиностроение, 1975, № 1, с. 44.
52. Каминский В. А., Степаненко А. Н. — Нефтепромысловое дело, № 9, 1973, с. 41.
53. Романков П. Г., Курочкин М. И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л., Химия, 1974.
54. Фортье А. Механика суспензий. Пер. с франц. / Под ред. Шульмана А. П. М., Мир, 1971.
55. Barnea E., Mizrahi J. — Trans. Inst. Chem. Eng., 1975, v. 53, № 1, p. 61.
56. Чефранов К. А. Электрообезвоживание и электрообессоливание нефтей. М., Гостоптехиздат, 1948.
57. Мартыненко А. Г., Коноплев В. П., Ширяев Г. П. Очистка нефтепродуктов в электрическом поле постоянного тока. М., Химия, 1974.
58. Касаткин А. С., Перекалин М. А. Электротехника. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.
59. Каспарьянц К. С. и др. А. с. 497030, 1975 (СССР).
60. Пиньковский Я. И. А. с. 427004, 1974 (СССР).
61. Смирнов Ю. С. и др. А. с. 447427, 1974 (СССР).
62. Городнов В. П., Сорокин В. В. А. с. 352929, 1972 (СССР).
63. Тронов В. П. и др. — Труды ТатНИИ (Бугульма), 1971, вып. 17, с. 227—234.
64. Губин В. Е. и др. А. с. 446539, 1974 (СССР).
65. Куликов С. А. и др. А. с. 468637, 1975 (СССР).
66. Кусовский Б. И. Канд. дис. Рязань, Рязанский радиотехнический ин-т, 1970.
67. Ахмадеев М. Х. и др. — Нефтепромысловое дело, 1974, № 4, с. 39.
68. Голицын В. М. Контроль процессов подготовки нефти на промыслах. М., Недра, 1972.
69. Заявка [2213809, [1974 (Франция).
70. Смирнов Ю. С. и др. — Нефт. хоз-во, 1975, № 1, с. 36.

71. *Городнов В. П., Петров А. А.* — Химия и технология топлив и масел, 1974, № 5, с. 20.
72. *Логинов В. И., Голомисток Л. И.* — Нефтепереработка и нефтехимия, 1971, № 10, с. 14.
73. Переработка нефти за рубежом. ЦНИИТЭнефтехим, 1967, № 4, с. 8—11, 21—27.
74. Переработка нефти за рубежом. ЦНИИТЭнефтехим, 1968, № 4, с. 3.
75. *Каспарьянц К. С. и др.* Процессы и аппараты для объектов промышленной подготовки нефти. М., Недра, 1977.
76. *Логинов В. И., Голомисток Л. И., Халуша Г. А.* — Нефтепереработка и нефтехимия, 1971, № 11, с. 3.
77. *Вальшин Р. К. и др.* — Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1973, № 2, с. 9.
78. *Позднышев Г. Н.* Канд. дис. Куйбышев, Гипростокнефть, 1969.
79. *Смирнов Ю. С. и др.* — Нефт. хоз-во, 1975, № 1, с. 36.
80. *Орлов Л. Н. и др.* — Нефтепереработка и нефтехимия, 1972, № 1, с. 11.
81. *Мансуров Р. И.* Канд. дис. М., МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, 1970.
82. *Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгиз, 1955.
83. *Рид Р., Шервуд Т.* Свойства газов и жидкостей. Пер. с англ. / Под ред. Коғана В. Б. Л., Химия, 1971.
84. *Бабалян Г. А., Ахмадеев М. К.* — Нефт. хоз-во, 1970, № 2, с. 61.
85. *Kipling J. J., Noris A. D.* — J. Col. Inter. Sci., 1953, v. 8, p. 547.
86. *Кравченко И. И., Бабалян Г. А.* Адсорбция ПАВ в процессах добычи нефти. М., Недра, 1971.
87. *Позднышев Г. Н. и др.* — Нефт. хоз-во, 1973, № 7, с. 43.
88. *Sleicher Gr. C. A.* — AIChE, 1962, v. 8, p. 1042.
89. *Paul H. I., Sleicher Gr. C. A.* — Chem. Eng. Sci., 1965, v. 20, p. 57.
90. *Collins S. B., Khudsen I. G.* — ASChE, 1970, v. 16, p. 1072.
91. *Hsiao Tsung Chem., Standly Middlman* — AIChE, 1969, v. 13, p. 9.
92. *Ansman E. L., Brook M.* — J. of Geoph. Res., 1967, v. 72, p. 6131.
93. *Taylor G. L.* — Proc. Roy. Soc. (London), 1964, v. A-280, p. 383.
94. *Lathan I.* — Proc. Roy. Soc. (London), 1966, v. A-295, p. 84.
95. *Brazier-Smith P. R.* — Phys. Fluids, 1971, v. 14, № 1, p. 154.
96. *Allan R. S., Mason S. G.* — Trans. Farad. Soc., 1961, v. 57, p. 2027.
97. *Allan R. S., Mason S. G.* — J. of Col. Inter. Sci., 1962, v. 17, p. 383.
98. *Brown A. H.* — Brit. Chem. Eng., 1968, v. 13, № 12, p. 95.
99. *Davis G. A. e. a.* — Can. J. Chem. Eng., 1970, v. 48, p. 328.
100. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. М., Наука, 1964.
101. *Тронов В. П.* Разрушение эмульсий при добыче нефти. М., Недра, 1974.
102. *Волощук В. М., Седунов Ю. С.* Процессы коагуляции в дисперсных средах. Л., Гидрометеиздат, 1975.
103. *Седок Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. М., Наука, 1967.
104. *Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли — пыли, дымы и туманы. Пер. с англ. / Под ред. Фукса Н. А. Л., Химия, 1969.
105. *Хоргани В. Г.* — Изв. АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана, 1969, т. 5, № 3, с. 305.
106. *Дерягин Б. В., Смирнов Л. П.* — В кн.: Исследования в области поверхностных явлений. М., Химия, 1968, с. 188—205.
107. *Дерягин Б. В., Смирнов Л. П.* — Коллоид. ж., 1967, № 3, с. 400.
108. *Ентов В. М., Каминский В. А., Синайский Э. Г.* — Механика жидкости и газа, 1973, № 5, с. 5.
109. *o'Neill M. E.* — Appl. Sci. Res., 1970, v. 21, p. 452.
110. *Coldman A. I., Cox R. G.* — Chem. Eng. Sci., 1966, v. 21, p. 1151.
111. *Wakya S.* — J. Phys. Soc. Japan, 1967, v. 22, p. 1101.
112. *Cooly M. D. A., o'Neill M. E.* — Mathematica, 1969, v. 16, p. 37.
113. *Ентов В. М., Каминский В. А., Лапига Е. Я.* — Механика жидкости и газа, 1976, № 3, с. 47.
114. *Каминский В. А.* — Коллоид. ж., 1976, № 5, с. 907.
115. *Попель А. С., Регирер С. А., Шадрин Н. Х.* — Прикл. математика и механика, 1975, т. 39, с. 131.
116. *Синайский Э. Г.* — Механика жидкости и газа, 1975, № 4, с. 96.
117. *Енукашвили И. М.* — В кн.: Физика облаков. Тбилиси, Мецнисреба, 1967, с. 140—155.
118. *Кендалл М. Дж., Стьюарт А.* Теория распределений. Пер. с англ. / Под ред. Колмогорова А. Н. М., Наука, 1966.
119. *Левич Б. Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М., Советское радио, 1974.
120. *Демидович Б. П., Марон И. А.* Основы вычислительной математики. М., Физматгиз, 1963.
121. *Лушников А. А., Пискунов В. Н.* — ДАН СССР, 1976, т. 231, № 5, с. 1166—1169.
122. *Хан Г., Шапиро С.* Статистические модели в инженерных задачах. Пер. с англ. / Под ред. Налимова В. В. М., Мир, 1969.
123. *Деч Г.* Руководство к практическому применению преобразования Лампаса и Z-преобразования. М., Наука, 1971.
124. *Логинов В. И.* — Нефт. хоз-во, 1976, № 9, с. 50.
125. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. Пер. с англ. / Под ред. Лойцанского Л. Г. М., Наука, 1969.
126. *Авдеев Н. Я.* — Коллоид. ж., 1970, № 5, с. 635.
127. *Кулаков М. В. и др.* — Коллоид. ж., 1975, № 3, с. 468.
128. *Колмогоров А. Н.* — ДАН СССР, 1941, с. 31, с. 99.
129. *Пагурова В. И.* Таблицы неполной гамма-функции. М., Физматгиз, 1962.
130. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. Пер. с англ. / Под ред. Арамановича И. Г. М., Наука, 1968.
131. Нефтепродукты. Методы исследования. М., Химия, 1967. Часть 1.
132. *Эрих В. Н.* Химия нефти и газа. М., Химия, 1969.
133. *Туницкий Н. Н., Каминский В. А., Тимашев С. Ф.* Методы физико-химической кинетики. М., Химия, 1972.
134. *Дехтерман А. И., Корж А. Ф.* — Нефтепереработка и нефтехимия, 1972, № 4, с. 1.
135. *Лидерман И. С.* Методы и приборы для измерения влажных жидких сред в нефтепереработке и нефтехимии. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1972.
136. *Рыбак Б. М.* Анализ нефти и нефтепродуктов. М., Гостоптехиздат, 1962.
137. *Пинхусович Р. С.* — Приборы и системы управления, 1971, № 2, с. 23.
138. Британская промышленность и техника, 1965, № 4, с. 40.
139. *Клугман И. Ю., Ковылов Н. Б.* Диэлькометрические влагомеры. М., ВНИИОЭНГ, 1969.
140. *Соколов И. Л.* Канд. дис. М., МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, 1972.
141. *Берлинер М. А.* — Измерительная техника, 1969, № 4, с. 65.
142. *Берлинер М. А.* — Приборы и системы управления, 1970, № 1, с. 19.
143. *Демьянов А. А. и др.* — Зав. лаб., 1973, № 10, с. 1209.
144. *Лизогуб А. И. и др.* — В кн.: Прикладная спектроскопия. М., Наука, 1969, т. 2, с. 200.
145. *Барковский В. Ф., Горелик С. М.* Физико-химические методы анализа. М., Высшая школа, 1972.
146. *Нигматулин Р. М., Молочный В. Б.* — В кн.: Автоматизация технологических процессов. М., Недра, 1973, с. 44.
147. *Бенин С. Д. и др.* — Измерительная техника, 1974, № 10, с. 70.
148. *Богомолова М. И., Перфильева А. А.* — Изв. вузов. Нефть и газ, 1962, № 1, с. 79.
149. *Иваницкий Г. Р. и др.* Автоматический анализ микрообъектов. М.—Л., Энергия, 1967.
150. *Фигуровский Н. А.* Седиментационный анализ. М., изд-во АН СССР, 1948.
151. *Herdan G.* Small Particle Statistics. New York, Academic Press, 1960, p. 418.
152. *Андреев С. Е., Товаров В. В., Перов В. А.* Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М., Металлургиздат, 1959.

153. *Хинце И. О.* Турбулентность. Пер. с англ. / Под ред. Абрамовича Г. Н. М., Физматгиз, 1963, с. 412.
154. *Михлин С. Г.* Лекции по интегральным уравнениям. М., Физматгиз, 1959.
155. *Туницкий Н. Н.* Диффузия и случайные процессы. Новосибирск, Наука, 1970.
156. *Davis M. H.* — Quart. J. of Mech. Appl. Math, 1964, v. 17, № 4, p. 499.
157. *Арфкен Г.* Математические методы физики. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1970.
158. *Морс Ф. М., Фешбах Г.* Методы теоретической физики. Пер. с англ. / Под ред. Аллилуева С. И. и др. М. Иностранная литература, 1960, т. 2.
159. *Ландау Л. Д., Лифшиц М. Е.* Электродинамика сплошных сред. М., изд-во техн.-теорет. лит., 1957.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аппараты для отстаивания эмульсий
см. Отстойные аппараты

Барнеа и Мизрахи формула 13

Бетчера модель 17

Бетчера уравнение 16

Бронирующие оболочки

на каплях пластовой воды 153

кинетическая модель разрушения
65, 71

механические свойства 67, 68

разрушение 67, 70, 72 сл., 147, 148,
151, 152, 154

Бруггемана уравнение 16

Ван-дер-Ваальса силы 86

Винера уравнение 16

Водонефтяные эмульсии см. Эмульсии
водонефтяные

Грамм-Шарлье ряд 101

Дегидраторы (отстойники) 27 сл.,
34 сл.

Дестабилизация эмульсий 63

Деэмульгаторы

адсорбции скорость 67

активность адсорбционная 64

— поверхностная 65

диффузия см. Диффузия

Деэмульгаторы

коэффициент молекулярной диф-
фузии 66, 67

механизм действия 26

— транспорта 63

подача 45

подбор и применение 27, 153 сл.

природа 60 сл.

разрушение эмульсий 60, 63

скорость процесса 26

состав 62, 63

типы 57

эффективность 62, 63, 153, 154

Диссипация энергии удельная 73, 177

Диффузионный механизм сближения
капель 89, 90, 95

Диффузия

взвешенных частиц 89, 185

конвективная деэмульгатора 65,
68 сл.

коэффициент 66, 68, 185

молекулярная 69, 89

наведенная 68, 90

турбулентная 68 сл., 73, 90

уравнение 66, 90

Диэлектрическая проницаемость (ДП)
15 сл.

Дробление капель

при коалесценции 77, 79, 80

в турбулентном потоке 77, 78

в электрическом поле 77, 79

Заряд капель 22

Коагуляция 26

Коалесценция капель

влияние на скорость процесса 26
дробление капель 77, 79, 80

кинетическое уравнение 120 сл.

конвективный механизм 81, 86

механизм 19 сл., 24 сл., 27, 32 сл.,
80, 82 сл.

пластовой и промывочной воды
156, 157

сечение захвата 87 сл.

в электрическом поле 80

ядра 90, 92 сл., 97, 105, 109

Коалесцирующие фильтры 26, 27

Концентрация солей в эмульсиях 148
методы определения 169

Коэффициент

взаимной диффузии частиц 90, 91
диффузии 66, 68, 185

использования потенциальных воз-
можностей установок (КИПВ)
144 сл.

молекулярной диффузии деэмуль-
гатора 66, 67

смещения 145

турбулентной диффузии 68

усиления отстойных аппаратов
137, 138, 140

Кубо и Накамура уравнение 16

Лагерра полиномы 101

Лапласа интегральные transforma-
ция 95 сл.

Механизм сближения капель

диффузионный 89, 90

конвективный 84, 86

транспорта деэмульгатора 63

Минерализация пластовых вод 8, 9,
10, 19

Моделирование процессов

коалесценции капель 122, 123

смещения 109 сл.

Моделирование процессов
укрупнения капель в водонефтя-
ных эмульсиях 109

Нефть

содержание солей 8 сл., 57 сл.

— серы 10

— элементов 11

Обезвоживание нефтей 145

качество 157

Обессоливание нефтей

глубина 153

остаточное содержание солей 49,
50, 55 сл., 161

расход промывочной воды 51 сл.

схема процесса 45 сл.

установки 143, 146 сл.

Остаточная вода

в отстойниках 139

в подготовленной нефти 139, 141,
153

на установках обессоливания 147

Остаточное содержание солей в неф-
ти 49, 50, 55 сл., 161

Отстаивание водонефтяных эмульсий

аппараты см. Отстойные аппараты
влияние деэмульгаторов 26, 27

— температуры 26

— флокулянтов 26

улучшение процесса 129

Отстойные аппараты

влияние гидродинамического ре-
жима на устойчивость работы
132 сл.

время отстоя 129, 130

качество 124, 125

коэффициент усиления 124, 137,
138

лабораторные электрообезвожи-
вающие 53

передаточная функция (ПФ)
124 сл., 127 сл., 132, 133, 135 сл.,
141 сл.

принцип действия 24

скорость осаждения капель 127-

Отстойные аппараты

термохимические 28 сл.

улучшение процесса 129

эффективность 27, 124 сл., 128,
129

Передаточная функция (ПФ) 124 сл.,
127 сл., 132, 133, 135 сл.

Пирсона диаграмма 115

Пластовые воды

бронирующие оболочки на каплях
153

механизм доставки деэмульгатора
64

минерализация 8 сл., 19

содержание в подготовленной неф-
ти 57

— солей 148

— в сырой нефти 8, 56, 57

Поведение капель эмульсии в элек-
трическом поле 19 сл., 77, 79,
191

Поверхностно-активные вещества
(ПАВ) 7, 8, 33, 60 сл., 66

Полярзация капель 20, 21

Пробивное напряжение эмульсий 23

Промежуточный слой эмульсионный
24, 32 сл., 36, 135, 136

Промывочная вода для обессоливания
57, 58, 147, 148, 154, 155, 160 сл.

Разделение эмульсий

качество 124

коалесценция см. Коалесценция
капель

отстаивание 24 сл., 27

способы 24

эффективность 124

Разрушение эмульсий деэмульгатора-
ми 60, 63

Рейнольдса число 77, 78, 133, 178, 179

Релаксация 18

Сечение захвата 87 сл.

Смесительные устройства

качество смешения 160 сл.

эффективность работы 156 сл.

Стабилизация эмульсий 8

Стабилизирующие вещества 8

Стокса закон 13, 24, 91

Суспензии 7, 8, 12

Турбулентная пульсация 180 сл.

Турбулентное движение жидкости
176, 178, 181

Тэма формула 14

Укрупнение капель в водонефтяных
эмульсиях 109

Уравнения

Бетчера 16

Бруггемана 16

Винера 16

диффузии 66, 90

кинетические 81, 82

Кубо и Накамура 16

для описания коалесцирующей
дисперсной системы 82, 83

Энштейна 12, 16, 187

Установки обессоливания

коэффициент использования потен-
циальных возможностей
(КИПВ) 144 сл.

остаточное содержание воды 145

— — солей 143, 144

эффективность работы 143, 144,
147

Флокулянты 26

Фурье ряды 101

Электрическая проводимость воды 18

Электрические свойства эмульсий
диэлектрическая проницаемость
(ДП) 15 сл.

поведение капель в электрическом
поле 19 сл., 77, 79, 191

пробивное напряжение 23

электрическая проводимость 17

Электрический пробой 23
Электродегидраторы 27, 37 сл.
напряженность электрического поля 41
Эмульгаторы 7, 64
вытеснение деэмульгатором 64, 66
константа адсорбции 67
Эмульсии водонефтяные
вода в масле 7
дестабилизация 63
дробление капель при коалесценции 77, 79 80
— в турбулентном потоке 77, 78
— в электрическом поле 77, 79, 80
заряд капель 77, 79, 80
кинетические уравнения 81, 82
коагуляция 26
концентрация солей 148
масло в воде 7
моделирование процессов укрупнения капель в водонефтяных эмульсиях 109
методы измерения влагосодержания 164 сл.
— определения солесодержания 169

Эмульсии водонефтяные
— седиментационного анализа 172, 173
отстойные аппараты см. Отстойные аппараты
поведение капель в электрическом поле 19 сл., 77, 79, 191
полидисперсность 82
разделение см. Разделение эмульсий
разрушение деэмульгаторами 60, 63, 64, 153, 154
расслоение 8
свойства вязкостные 12, 13
— реологические 12
— электрические см. Электрические свойства эмульсий
скорость осаждения частиц 13 сл., 126, 127, 134
способы разделения 24 сл.
стабилизация 8
старение 8
укрупнение капель 109
устойчивость 7
фракционный состав 159
Эмульсионный промежуточный слой 24, 32 сл., 36, 135, 136
Энштейна уравнение 12, 16, 187

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ
ЛОГИНОВ

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ И ОБЕССОЛИВАНИЕ НЕФТЕЙ

Редактор
С. И. БАБУШКИНА
Художник Н. В. НОСОВ
Художественный редактор
А. К. МАЛКИН
Технический редактор
Л. А. ЛЕОНТЬЕВА
Корректор И. Г. КУНТИНА

ИБ № 492

Сдано в наб. 12.03.79. Подп. к печ. 26.09.79. Т-16951.
Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 2.
Гарн. литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л: 13,5. Уч.-изд. л. 13,79. Тираж 2600 экз.
Заказ № 663/579 Цена 1 р. 10 к. Изд. № 1409

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия».
107076, Москва, ул. Стромынка, д. 13.

Чеховский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, г. Чехов Московской области.

Отпечатано в Подольском филиале
ПО «Периодика», г. Подольск, ул. Кирова, 25