

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

А.В. Козачек

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Часть I. СЕДИМЕНТАЦИЯ И ФИЛЬТРАЦИЯ

*Утверждено Учёным советом университета
в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся по специальности
280202 «Инженерная защита окружающей среды» и
направлению 280700 «Техносферная безопасность»*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2013

ББК 20.1
УДК 628
К59

Р е ц е н з е н т ы:

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
В.М. Дмитриев

Кандидат химических наук, доцент, преподаватель
НОУ СПО «Тамбовский колледж социокультурных технологий»
Н.А. Абакумова

Козачек, А.В.

К590 Теоретические основы защиты окружающей среды. Ч. I. Седиментация и фильтрация : учебное пособие / А.В. Козачек. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 88 с. – 100 экз.
ISBN 978-5-8265-1173-2

Рассмотрены теоретические основы седиментации и фильтрации, реализуемых на оборудовании очистки воды, воздуха и переработки отходов.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды» и направлению 280700 «Техносферная безопасность».

ББК 20.1
УДК 628

ISBN 978-5-8265-1173-2 (ч. I)
ISBN 978-5-8265-1192-3

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2013

ВВЕДЕНИЕ

В курсе «Теоретические основы защиты окружающей среды» изучаются физические и химические основы разнообразных процессов защиты окружающей среды.

Процесс защиты окружающей среды – это процесс, в результате реализации которого вредные для окружающей среды и человека загрязнения претерпевают определённые превращения в безвредные, сопровождающиеся перемещением загрязнений в пространстве, изменением их агрегатного состояния, внутренней структуры и состава, уровня их воздействия на окружающую среду.

В настоящее время имеется небольшое количество научных и учебных изданий, в которых системно излагаются особенности, химизм и физические основы технологических процессов, реализуемых при работе оборудования для защиты окружающей среды. Их редкость и постоянное развитие современных технологий позволяют говорить об актуальности предлагаемого учебного пособия.

Экологическая инженерия стала самостоятельной наукой, имеющей свои особенности и задачи. Одним из направлений экологической инженерии является изучение физических, химических и биологических особенностей организации процессов очистки.

В учебном пособии рассматриваются особенности фильтрации и седиментации, которые представляют собой наиболее часто реализуемые на предприятиях процессы очистки сточных вод и газовых выбросов, переработки отходов. Строение текста учебного пособия таково, что рассматриваемые свойства, характеристики и особенности изучаются достаточно эффективно. Учебное пособие снабжено многочисленными графическими пояснениями, схемами и рисунками, что позволяет обеспечить наглядность изложения и восприятия для обучающихся.

В первой главе «Седиментация» рассматриваются особенности гравитационного, инерционного, электрического и магнитного осаждения, всплывания и псевдооживления. Указанные процессы используются в системах очистки сточных вод от твёрдых загрязняющих веществ, а также в системе очистки загрязнённых выбросов в атмосферу.

Вторая глава «Фильтрация» характеризует фильтрационные процессы, к которым можно отнести фильтрование, в том числе центробежное и зернистое, промывку, процеживание, грохочение, пенную, мембранную и электромембранную фильтрацию. Такие процессы используются в очистке сточных вод и при переработке отходов.

1. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Загрязнение – это неблагоприятное изменение окружающей среды, которое целиком или частично является результатом человеческой деятельности, прямо или косвенно меняет распределение приходящей энергии, уровня радиации, физико-химические свойства окружающей среды и условия существования живых существ, ухудшая их здоровье.

Примеси – твёрдые, жидкие и газообразные загрязняющие вещества, растворенные или нерастворённые (взвешенные) в окружающей их среде.

Загрязнения классифицируют на:

1) материальные (жидкие, твёрдые, газообразные, смешанные примеси):

- в газовых выбросах;
- в сточных водах;
- в твёрдых веществах;

2) энергетические:

- ионизирующие излучения (радиация);
- световые, инфракрасные, ультрафиолетовые, лазерные излучения;
- электромагнитные поля;
- шум, вибрация, ультразвук, инфразвук;
- тепловые выбросы [б, с. 19];

3) специфические:

- эстетические и архитектурные;
- дорожно-строительные и градостроительные;
- ландшафтные.

Загрязнённые системы могут быть однородными и неоднородными.

Неоднородными (гетерогенными, полидисперсными) системами называют системы, состоящие из двух или нескольких фаз. Фазы, составляющие систему, могут быть, в принципе, механически отдельно одна от другой.

Любая неоднородная система состоит из дисперсной (внутренней) фазы (частицы вредных и безвредных примесей) и дисперсионной среды (сплошной, внешней фазы, жидкости, воздуха, твёрдого вещества), в которой распределены частицы дисперсной фазы (рис. 1.1, А – дисперсионная фаза (газ, жидкость, твёрдое тело); Б – дисперсная фаза (загрязнения, примеси)).

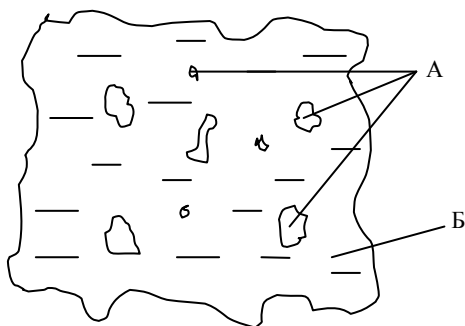


Рис. 1.1

К дисперсной фазе относятся такие примеси, как твёрдые частицы вредных веществ, капли вредных жидкостей, пузырьки вредных газов.

В зависимости от физического состояния фаз различают следующие основные виды гетерогенных систем.

1. *Суспензии* (взвеси) – неоднородные системы, состоящие из жидкости и взвешенных в ней твёрдых частиц вредных примесей. В зависимости от размеров твёрдых частиц суспензии условно подразделяют на *грубые* (более 100 мкм), *тонкие* (0,5...100 мкм) и *мути* (0,1...0,5 мкм) или соответственно грубодисперсные, тонкодисперсные и мелкодисперсные суспензии.

2. *Коллоидные растворы* – системы, в которых размеры частиц, находящихся в жидкости, являются средними между размерами молекул и частиц суспензий.

3. *Эмульсии* – системы, состоящие из жидкости и распределённых в ней капель другой жидкости, не смешивающейся с первой.

4. *Пульты* – системы, состоящие из малого количества жидкости и большого количества твёрдых частиц, но сохраняющие свою текучесть.

5. *Пены* – системы, состоящие из жидкости и распределённых в ней пузырьков газа.

6. *Аэрозоли* – аэродисперсные системы. Они подразделяются на:

а) *пыли* – системы, состоящие из газа и распределённых в нём частиц твёрдого вещества размерами 5...10 мкм и образующиеся обычно при механическом распределении частиц в газе;

б) *дымы* – системы, состоящие из газа и распределённых в нём частиц твёрдого вещества размерами 0,1...5 мкм и образующиеся в процессах конденсации паров (газов) при переходе их в жидкое или твёрдое состояние;

в) *туманы* – системы, состоящие из газа и распределённых в нём частиц жидкости размерами 0,3...5 мкм.

7. *Руды* – системы, состоящие из твёрдой дисперсионной среды и находящихся в ней твёрдых частиц примесей [5, с. 17].

8. *Грунты* (почвы) – системы, состоящие из твёрдой дисперсионной среды и частиц жидкости в ней [5, с. 17].

9. *Пористые системы* – системы, состоящие из твёрдой дисперсионной среды и пузырьков воздуха.

Однородными (гомогенными) системами называются системы, состоящие из основной среды, в которой примеси других веществ находятся в растворённом раздробленном состоянии или на микроуровне в виде молекул, атомов и ионов.

К однородным системам относятся:

1) *сплавы* – системы твёрдое вещество – твёрдое вещество;

2) *растворы* – системы, в которых твёрдые, газовые или жидкие вещества растворены в жидкости;

3) *хемосорбционные системы* – системы, в которых газ растворён в твёрдом веществе;

4) *смеси* – системы газ–газ.

Шлам – частицы примесей дисперсной фазы, отделённые от дисперсной среды в результате реализации процесса очистки.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Технология защиты окружающей среды включает ряд однотипных процессов, характеризующихся общими закономерностями [1, с. 9], определяющими скорость процесса.

1. Гидромеханические процессы (процессы разделения), скорость которых определяется законами гидродинамики (движение жидкостей и газов). К этим процессам относятся перемещение жидкостей (сточных вод), сжатие и перемещение загрязнённых газов, разделение жидких и газовых неоднородных систем в поле сил тяжести (отстаивание, осаждение), в поле центробежных сил (центрифугирование), а также под действием разности давлений при движении через пористый слой (фильтрация) и перемешивание жидкостей (сточных вод).

2. Тепловые процессы – процессы нагрева загрязнений, протекающие со скоростью, определяемой законами теплопередачи (распространения тепла). Такими процессами являются нагревание, выпаривание и др.

3. Холодильные процессы – процессы охлаждения загрязнений до температур более низких, чем температура начальная либо температура окружающей среды. К ним относятся охлаждение, конденсация и др.

4. Массообменные (диффузионные) процессы – процессы переноса одного или нескольких компонентов загрязнения исходной смеси из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз, протекающие со ско-

ростью, определяемой законами массопередачи. К этой группе относятся абсорбция, адсорбция, экстракция и др.

5. Химические процессы – процессы и превращения веществ, протекающие со скоростью, определяемой законами химической кинетики. Результатом процесса является, как правило, появление нового химического вещества.

6. Механические процессы, определяемые законами механики твёрдых тел. Эти процессы применяются, в основном, для подготовки исходных твёрдых частиц загрязнений и для обработки конечных твёрдых продуктов, выходящих с очистных сооружений. К таким процессам относятся измельчение, транспортирование, сортировка, смешение твёрдых примесей и др.

7. Электромагнитные процессы – процессы обработки загрязнений в электромагнитных полях электрическими зарядами, определяемые законами электричества и магнетизма.

8. Акустические процессы – процессы обработки частиц загрязнений звуковыми колебаниями (ультразвук и др.).

9. Радиационные процессы – процессы обработки частиц загрязнений излучением (тепловым излучением, ультрафиолетовыми лучами и прочие).

10. Смешанные процессы. К ним относятся, например, электрическое осаждение, электрофильтрация, горение (химический и тепловой процесс), мембранный процесс (разделение и массоперенос), процеживание с одновременным дроблением (процесс разделения и механический) [1, с. 13–14].

Кроме того, процессы защиты окружающей среды от примесей классифицируются:

- 1) по виду очищаемых веществ:
 - очистка воздуха;
 - очистка воды;
 - очистка твёрдых веществ;
- 2) по виду загрязнений:
 - очистка от нерастворённых (грубых, мелкодисперсных, коллоидных) примесей;
 - очистка от растворённых органических примесей;
- 3) по методам очистки:
 - методы разделения (отстаивание, флотация, фильтрование и др.);
 - деструктивные методы (окисление, озонирование, хлорирование и др.);
 - регенерационные методы (экстракция, ректификация, этерификация и др.);
 - биологические методы.

На практике применяются, как правило, комбинированные процессы очистки окружающей среды от загрязнения.

К отдельной группе процессов очистки окружающей среды относятся процессы шумоулавливания, уменьшения вибраций, уменьшения воздействия излучений, т.е. процессы, обеспечивающие снижение уровня либо полную ликвидацию воздействия энергетических загрязнений.

Существуют также такие специфические процессы, как, например, ликвидация эстетического загрязнения (изучаются в науке «Архитектурная экология»), ландшафтного загрязнения (изучаются в науках «Строительная экология», «Урбоэкология» и «Ландшафтная экология») и др.

Результатом реализации процесса защиты окружающей среды является очистка гетерогенной или гомогенной системы (воды, воздуха, земли) от вредных примесей, т.е. получение гомогенной (однородной) системы (рис. 1.2, А – гетерогенная или гомогенная загрязнённая система; Б – однородная система (очищенная вода, воздух, земля); В – шлам (частицы вредных примесей)) без растворённых в ней примесей.

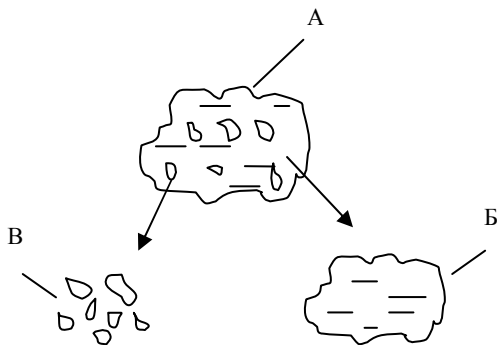


Рис. 1.2

2. СЕДИМЕНТАЦИЯ

Определение. Седиментация (осаждение) – процесс движения частиц дисперсной фазы (примеси) в дисперсионной среде (жидкости или газе) в определённом направлении под действием различных сил.

2.1. ОБЩИЕ ОСНОВЫ СЕДИМЕНТАЦИИ

Процесс седиментации основан на различии плотностей дисперсионной среды и частиц дисперсионной фазы. Частицы дисперсной фазы (примеси) имеют большую плотность, чем дисперсионная среда, благодаря чему сила тяжести, действующая на частицу дисперсной фазы, становится больше силы выталкивания, и частица двигается сверху вниз.

Рассмотрим особенности процесса седиментации на примере лабораторного цилиндра, заполненного водой, содержащей взвешенные частицы загрязняющих веществ.

Первоначально всё водное пространство занято взвесью частиц примесей (область II, рис. 2.1, а). Через некоторый промежуток времени частицы примесей под действием силы тяжести начинают двигаться вниз, и в верхней части цилиндра появляется граница между осветлённой водой (область I) и взвесью (область II) (рис. 2.1, б). Наряду с образованием области осветлённой воды I и области свободного осаждения взвеси II, на дне сосуда образуется область осадка IV, в котором идёт медленное уплотнение частиц. Над осадком образуется слой сгущённой суспензии III, в которой твёрдые частицы примесей расположены настолько тесно, что дальнейшее уплотнение их до области III возможно только путём вытеснения жидкости из пространства между частицами (область стеснённого осаждения III). Выше находится переходная зона IIа, плотность которой уменьшается снизу вверх. Эта зона затем переходит в область II (рис. 2.1, в). По мере отстаивания объёмы осветлённой зоны I и осадка IV возрастают, при этом одновременно область II и переходная зона IIа исчезают (рис. 2.1, г) и завершается уплотнение сгущённой суспензии из области III в область IV (рис. 2.1, д), а затем и уплотнение самого осадка в области IV (рис. 2.1, е), что соответствует полному разделению загрязнённой воды на осадок (частицы примесей IV) и осветлённую жидкость (область I).

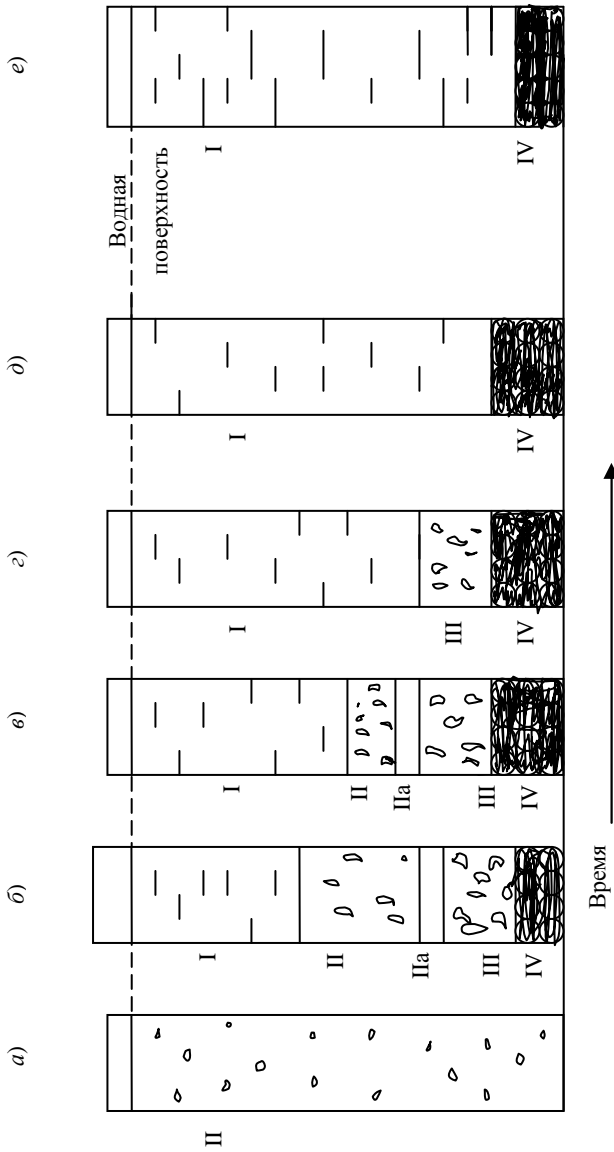


Рис. 2.1

Механизм и кинетика осаждения (отстаивания).

Рассмотрим движение одиночного тела в жидкости на примере осаждения твёрдой частицы в неподвижной среде под действием силы тяжести (рис. 2.2, где R – сила сопротивления среды (трения); V – сила выталкивания; G – сила тяжести).

Если частица массой m и весом mg начинает падать под действием силы собственного веса G , то скорость её движения ω_{oc} первоначально возрастает со временем (рис. 2.3).

Сила тяжести при этом будет равна:

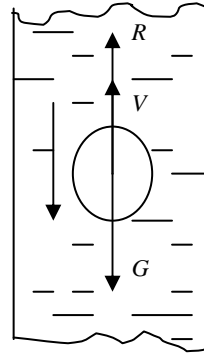
$$G = \frac{\pi d^3}{6} (\rho - \rho_c) g, \quad (2.1)$$

где d – диаметр частицы загрязнения, м; ρ – плотность частицы, кг/м³; ρ_c – плотность среды, кг/м³.

Однако с увеличением скорости будет расти сопротивление движению частицы (формула) по закону Ньютона

$$R = \xi S \frac{\rho_0 \omega_{oc}^2}{2}, \quad (2.2)$$

где R – сила сопротивления, Н; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; S – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению его движения, м²;



$$|G| = |R| > |V|$$

Рис. 2.2

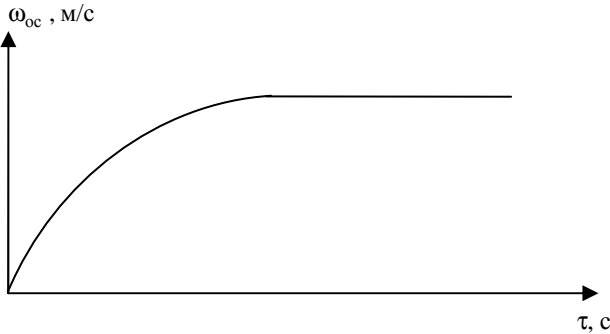


Рис. 2.3

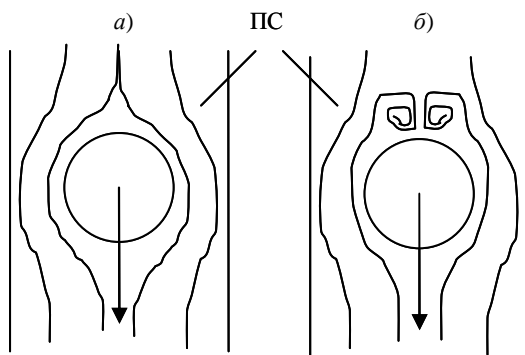


Рис. 2.4

$$S = \pi d^2 / 4 ; \quad (2.3)$$

$\omega_{\text{ос}}$ – скорость осаждения.

Возникающее сопротивление R зависит главным образом от режима и формы обтекаемого тела (рис. 2.4).

При ламинарном движении, наблюдающемся при небольших скоростях и малых размерах тел или при высокой вязкости среды, тело окружено пограничным слоем (ПС) жидкости и плавно обтекается потоком (рис. 2.4, *a*). Потеря энергии в таких условиях связана лишь с преодолением трения.

При турбулентном движении (например, при увеличении скорости тела) большую роль играют силы инерции, под действием которых пограничный слой отрывается от поверхности тела, что приводит к понижению давления за движущимся телом и к образованию беспорядочных завихрений за ним. При дальнейшем увеличении скорости роль любого сопротивления становится преобладающей, а сопротивлением трения можно пренебречь (наступает автомодельный режим) (рис. 2.4, *б*).

С увеличением сопротивления движению частиц уменьшается ускорение частиц. В результате через короткий промежуток времени наступает равновесие: сила тяжести G , под действием которой частица движется, станет равной силе сопротивления среды R . Начиная с этого момента, ускорение движения равно нулю, и частица будет двигаться равномерно с постоянной скоростью (рис. 2.3). Скорость такого равномерного движения частиц в среде называются скоростью осаждения $\omega_{\text{ос}}$.

Движущей силой процесса отстаивания при этом является разность между силой гравитации G и силой выталкивания V . Преобладание в данном случае силы гравитации и приводит к движению частицы сверху вниз.

Скорость осаждения ω_{oc} можно найти из условия равенства силы тяжести (2.1) и силы сопротивления среды (2.2) с учётом (2.3):

$$\frac{\pi d^3}{6} (\rho - \rho_c) g = \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_c \omega_{oc}^2}{2}, \quad (2.4)$$

откуда для всех режимов движения частицы

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{4dg(\rho - \rho_c)}{3\xi\rho_c}}. \quad (2.5)$$

Здесь коэффициент гидравлического сопротивления определяется по формулам:

1) при ламинарном режиме и $Re < 2$

$$\xi = \frac{24}{Re}, \quad (2.6)$$

2) при переходном режиме и $Re = 2 \dots 500$

$$\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}, \quad (2.7)$$

3) при турбулентном (автомодельном) режиме и $Re > 500$

$$\xi = 0,44. \quad (2.8)$$

Критерий Рейнольдса, характеризующий соотношение инерционных сил и сил трения:

$$Re = \frac{\omega_{oc} d \rho_c}{\mu_c}. \quad (2.9)$$

В частности, для ламинарного режима при подстановке формул (2.6) и (2.9) в формулу (2.5) можно получить

$$\omega_{oc} = \frac{d^2 g (\rho - \rho_c)}{18 \mu_c}, \quad (2.10)$$

где μ_c – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с. Ламинарный режим наиболее часто встречается в процессах отстаивания.

Максимальный размер частиц при ламинарном осаждении

$$d_{max} = \sqrt[3]{\frac{36\mu_c^2}{\rho_c g (\rho - \rho_c)}}. \quad (2.11)$$

Минимальный размер частиц 0,1 мкм (пыль), когда частицы не осаждаются, а наблюдается лишь их хаотическое броуновское движение.

Формула (2.5) применима в случае, если концентрация дисперсной фазы (твёрдых частиц примесей) очень мала и её частицы при движении не соприкасаются одна с другой. Однако в технике защиты окружающей среды процессы чаще проводятся в ограниченном объёме и при большой концентрации дисперсной фазы.

2.2. ОТСТАИВАНИЕ (ГРАВИТАЦИОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ)

Определение. Отстаивание (гравитационное осаждение) – процесс движения тела (частиц примеси) в жидкости или газе сверху вниз под действием силы тяжести.

Сущность процесса. Процесс отстаивания (гравитационного осаждения) реализуется в целом аналогично вышеописанному общему процессу седиментации. Однако, в связи с тем, что отстаивание применяется для очистки достаточно загрязнённых сред в ограниченных объёмах аппаратов, оно имеет свои отличительные особенности.

При отстаивании неоднородных (полидисперсных) систем наблюдается постепенное увеличение концентрации частиц примесей в очистном аппарате по направлению сверху вниз (рис. 2.1). Над слоем осадка (область IV) образуется зона сгущенной суспензии (область III), в которой происходит *стеснённое осаждение* частиц примесей, сопровождающееся трением между частицами. При этом более мелкие частицы тормозят движение более крупных, а частицы больших размеров увлекают за собой мелкие частицы, ускоряя их движение. В результате наблюдается тенденция к сближению скоростей осаждения частиц различных размеров, возникает *коллективное*, или *солидарное* осаждение частиц с близкими скоростями в каждом сечении аппарата, но с различными скоростями по его высоте. Постоянное уплотнение частиц (области II, IIa, III, IVa) обусловлено уменьшением скорости частиц по мере приближения к днищу очистного аппарата. Замедление движения частиц сверху вниз объясняется тормозящим действием жидкости, вытесняемой осаждающимися частицами и движущейся от неподвижной перегородки (днища) в направлении, обратном движению частиц.

При периодическом процессе отстаивания высота отдельных зон (I, II, IIa, III, IV) изменяется во времени до момента полного расслоения неоднородной системы на осадок и осветлённую жидкость. Это является следствием изменения скорости отстаивания $\omega_{ст}$ при стеснённом осаждении во времени τ (рис. 2.5).

В начале отстаивания (отрезок *ab*) осаждаются преимущественно более крупные частицы, вызывающие наиболее интенсивное обратное движение жидкости. Однако по мере увеличения концентрации этих частиц тормозящее влияние обратного тока жидкости ослабевает и скорость отстаивания возрастает (отрезок *bc*) до момента установления динамическо-

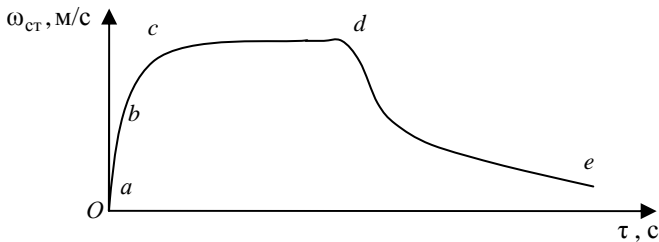


Рис. 2.5

го равновесия между действующей силой (весом) и силой сопротивления среды. В последующий период времени совместное (коллективное) осаждение частиц происходит с постоянной скоростью (отрезок cd). Завершающая и наиболее медленная стадия процесса – уплотнение осадка, когда частицы в нём располагаются настолько близко друг к другу, что вытеснение жидкости становится всё более затруднительным, и процесс отстаивания протекает с уменьшающейся скоростью (отрезок de).

Скорость стеснённого осаждения меньше скорости свободного осаждения. Это объясняется тем, что при естественном осаждении частицы примесей испытывают не только большое сопротивление среды, но и добавочное сопротивление, обусловленное трением и соударениями частиц. Увеличение сопротивления среды связано в данном случае с динамическим воздействием на неё всей массы осаждающихся частиц, приводящее к возникновению восходящего потока среды, а также с возрастанием вязкости среды.

Для определения скорости стеснённого осаждения частиц примесей в очистном аппарате применяются различные эмпирические формулы. Например, для всех режимов осаждения:

– при $\varepsilon > 0,7$

$$\omega_{ст} = \omega_{ос} \varepsilon^2 10^{-1,82(1-\varepsilon)}; \quad (2.12)$$

– при $\varepsilon \leq 0,7$

$$\omega_{ст} = \omega_{ос} \frac{0,123\varepsilon^3}{1-\varepsilon}. \quad (2.13)$$

Здесь объёмная доля жидкости или газа в неоднородной системе (порозность слоя частиц дисперсной фазы)

$$\varepsilon = \frac{V_{дс}}{V_{дс} + V} = \frac{V_{сл} - V}{V_{сл}}, \quad (2.14)$$

где $V_{\text{дс}}$ – объём жидкости или газа без частиц, м^3 ; V – объём всех частиц примесей, м^3 ; $V_{\text{сл}}$ – суммарный объём слоя дисперсионной среды и частиц

$$V_{\text{сл}} = V_{\text{дс}} + V, \text{ м}^3. \quad (2.15)$$

Для всех режимов осаждения используется формула

$$\omega_{\text{ст}} = \frac{\text{Re}_{\text{ст}} \mu_{\text{с}}}{d \rho_{\text{с}}}, \quad (2.16)$$

где модифицированный критерий Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{ст}} = \frac{\text{Ar}_{\text{с}}^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{\text{Ar}_{\text{с}}^{4,75}}}; \quad (2.17)$$

критерий Архимеда, характеризующий отношение разности сил тяжести и подъёмной силы к подъёмной силе [1, с. 95 – 101, 178 – 181]:

$$\text{Ar} = \frac{d^3 (\rho - \rho_{\text{с}}) \rho_{\text{с}} g}{\mu_{\text{с}}^2} = \frac{\text{Re}_{\text{ст}}^3}{\text{Ly}}. \quad (2.18)$$

Критерий Лященко [3, с. 90]

$$\text{Ly} = \frac{\omega_{\text{ст}}^3 \rho_{\text{с}}^2}{\mu_{\text{с}} (\rho - \rho_{\text{с}}) g}. \quad (2.19)$$

Для ламинарного осаждения также используется формула

$$\omega_{\text{ст}} = R' \omega_{\text{ос}}, \quad (2.20)$$

где

$$R' = \varepsilon \frac{\mu_{\text{с}}}{\mu_{\text{см}}}. \quad (2.21)$$

В формулах (2.20) (2.21) учитываются влияние концентрации взвешенных частиц и реологические свойства системы (сточной воды) [4, с. 200].

Для частицы примеси нешарообразной формы в формулы (2.1), (2.3), (2.4), (2.5), (2.9), (2.10), (2.15), (2.17) вместо величины диаметра d подставляется величина эквивалентного диаметра $d_{\text{э}}$, вычисляемая как диаметр условного шара, объём которого равен объёму тела неправильной формы:

$$d_{\text{э}} = \sqrt[3]{\frac{6V_{\text{ш}}}{\pi}} = 1,243 \sqrt[3]{\frac{m}{\rho}}, \quad (2.22)$$

где $V_{\text{ш}}$ – объём условного шара, равный объёму тела неправильной формы, м; m – масса частицы примеси, кг [3, с. 90].

При этом величину $\omega_{\text{ос}}$ для частиц нешарообразной формы следует умножить на поправочный коэффициент формы ϕ . Его значения определяют опытным путём. Примерные значения коэффициента формы для некоторых частиц даны в табл. 2.1 [11, с. 25; 1, с. 100–101].

Таблица 2.1

Частицы	Коэффициент формы ϕ
Шарообразные	1
Округлые	0,77
Угловатые	0,66
Продолговатые	0,58
Пластинчатые	0,43

Все вышеприведённые формулы действительны как для осаждения твёрдых частиц вредных примесей в жидкой среде (сточной воде), так и в газовой среде (запылённом воздухе).

В случае осаждения капель жидкости в другой жидкой среде процесс осложняется тем, что форма капель непрерывно меняется. Для определения скорости осаждения капель при этом можно использовать формулу:

$$\omega_{\text{ос}} = \frac{gd^{2.5}}{\sigma} \left(\frac{\rho_c - \rho}{\rho} \right)^{1.5} \left(\frac{\mu_c}{\rho_c g} \right)^{0.5}, \quad (2.23)$$

где σ – поверхностное натяжение капли на её поверхности, Н/м [7, с. 36–37].

Если частицы дисперсной фазы быстро оседают на дне аппарата отстаивания, то возникает определённая разность электрических потенциалов между поверхностным и придонными слоями дисперсионной среды. Это явление называется *потенциалом оседания частиц*. Указанное явление обратное электрофорезу (явлению движения дисперсной фазы под влиянием электрического поля) [10, с. 82–83].

Область применения процесса отстаивания. Процесс отстаивания применяется для суспензий из сточных вод нерастворимых, грубодисперсных примесей, песка, активного и отработанного ила на стадиях биологической очистки, хлопьев тонкодисперсных примесей со стадий укрупнения (укрупнения), тяжелых минеральных и органических загрязнений для очистки эмульсий от капель водных жидкостей, а также для очи-

стки газов от частиц пыли, капель жидкости твёрдых минеральных и органических веществ.

Процессы отстаивания являются, как правило, лишь предварительными процессами очистки (осветления) дисперсионных сред (суспензий, коллоидных растворов, эмульсий, пылей) от примесей.

Аппараты реализации процесса отстаивания: вертикальные, горизонтальные, радиальные отстойники, песколовки, пылесадительные камеры.

2.3. ИНЕРЦИОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Определение. Инерционное осаждение – процесс движения частиц примесей в жидкости или газе в определённом направлении под действием сил инерции.

Сущность процесса. Инерционное осаждение основано на использовании сил инерции, возникающих при резком изменении направления газового (жидкостного) потока, которое сопровождается значительным уменьшением его скорости. Устанавливая на пути движения загрязнённого потока отражательные перегородки, стенки цилиндрического корпуса или применяя коленчатые трубопроводы, изменяют направление движения жидкости или газа на 90 градусов, 180 градусов, либо по окружности (спирали). При этом частицы примесей, стремясь сохранить направление своего первоначального движения, удаляются из потока.

Примеры организации процесса показаны на рис. 2.6 (А – загрязнённый поток; Б – очищенный воздух; В – горизонтальный отстойник; Г – шлам (твёрдые частицы примесей)) и рис. 2.7 (А – загрязнённый поток; Б – очищенный поток; В – циклон (центробежный отстойник); Г – шлам).

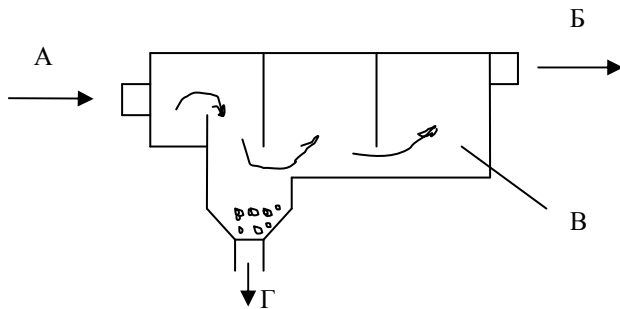


Рис. 2.6

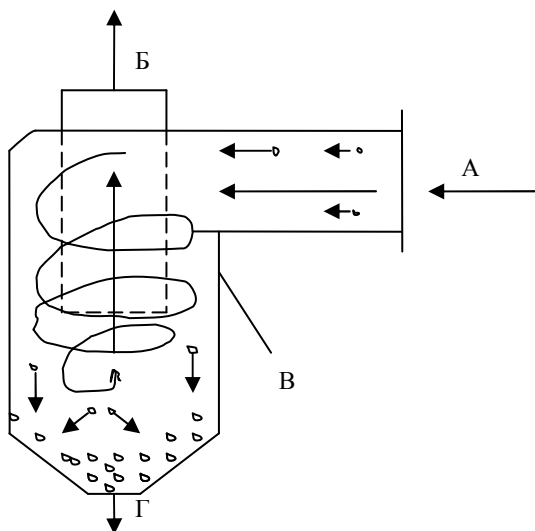


Рис. 2.7

Ещё одним способом организации процесса инерционного осаждения является направление потока неоднородной системы во вращающийся аппарат, где частицы примесей, вращаясь вместе с аппаратом, оседают на его стенках (центробежное осадительное центрифугирование) [7, с. 46].

Механизм и кинетика процесса инерционного осаждения аналогичны процессу отстаивания с учётом вместо силы тяжести сил инерции или центробежных сил.

Во вращающемся потоке на взвешенную частицу действует инерционная (центробежная) сила, направляющая данную частицу к периферии от центра по радиусу со скоростью, равной скорости осаждения $\omega_{ос}$ (рис. 2.8, Б – загрязнённая жидкость или газ; В – очищенная жидкость или газ; Г – шлам (частицы примеси)), и по направлению, перпендикулярному траектории движения потока жидкости или газа АА.

Окружная скорость несущего частицу потока жидкости или газа $\omega_{окр}$ направлена по касательной траектории потока АА. В результате различия в направленности скоростей $\omega_{ос}$ и $\omega_{окр}$ и воздействия соответствующих сил частица примеси отделяется от потока жидкости или газа, сходит с его траектории (аа, bb) с результирующей скоростью ω_p .

Сопротивление инерционному (центробежному) осаждению, как и в случае отстаивания, оказывает сила трения (сила сопротивления среды).

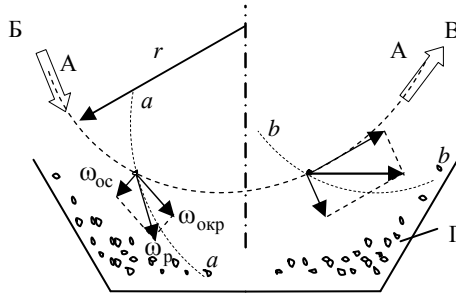


Рис. 2.8

Если в формуле (2.17) заменить ускорение свободного падения g на инерционное (центробежное) ускорение $\omega^2 r$ (где ω – угловая скорость потока жидкости или газа, с^{-1}), то получим модифицированный критерий Архимеда:

$$\text{Ar}_u = \frac{d^3(\rho - \rho_c)\rho_c\omega^2 r}{\mu_c^2}, \quad (2.24)$$

где r – радиус движения (вращения) потока, м.

Из формул (2.5) и (2.10) получим [7, с. 46–47]:

$$\omega_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{4d\omega^2 r(\rho - \rho_c)}{3\xi\rho_c}}, \quad (2.25)$$

$$\omega_{\text{ос}} = \frac{d^2\omega^2 r(\rho - \rho_c)}{18\mu_c}. \quad (2.26)$$

Перепад давлений (гидравлическое сопротивление) в циклоне определяется по формуле:

$$\Delta p = \frac{\xi\omega_{\text{окр}}^2\rho_c}{2}.$$

Скорость очищаемого потока жидкости или газа в цилиндрической части циклона может быть определена по формуле:

$$\omega_{\text{окр}} = \sqrt{\frac{2\Delta p_c}{\xi_c\rho_c}}, \quad (2.27)$$

где Δp_c – перепад давления в циклоне, Па.

Для широко распространённых циклонов НИИОгаза отношение $\frac{\Delta p_c}{\rho_c} = 500 \dots 750 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Значение коэффициента гидравлического сопротивления определяется, в основном, опытным путём [1, с. 299–230].

Окружная и угловая скорость потока жидкости или газа связаны соотношением [7, с. 48]:

$$\omega_{\text{окр}} = \omega r . \quad (2.28)$$

Скорость движения частиц дисперсной фазы в дисперсной среде под действием центробежной силы можно также определить по формуле:

$$\omega_{\text{ос}} = \frac{c^{0,085} d^m \rho_c^{\frac{m-9}{3}} (\rho - \rho_c)^{\frac{m+1}{3}} I^{\frac{m+1}{3}}}{\mu_c^{\frac{2m-1}{3}}} . \quad (2.29)$$

Ускорение центробежного поля

$$I = \omega^2 r, \text{ м/с}^2. \quad (2.30)$$

Коэффициент пропорциональности c и показатель степени m зависят от гидравлического режима движения частицы (табл. 2.2), [4, с. 215].

Таблица 2.2

Re	m	c
< 1,6	2	$1,7 \cdot 10^{-4}$
1,6...420	1,2	$2,49 \cdot 10^{-3}$
> 420	5,36	0,5

Область применения процесса инерционного осаждения. Процесс инерционного осаждения применяют для предварительной очистки суспензий сточных вод от грубодисперсных нерастворённых органических и минеральных примесей, а так же для очистки от пыли и других вредных примесей отходящих газов котельных, электростанций, сушилок, промышленных предприятий и для улавливания пыли внутри рабочих помещений.

Аппараты реализации процесса инерционного осаждения: горизонтальные и радиальные, отстойники, сепараторы, классификаторы, циклоны, центробежные, ротационные, вихревые, жалюзийные пылеуловители, осадительные (отстойные) центрифуги.

2.4. ВСПЛЫВАНИЕ

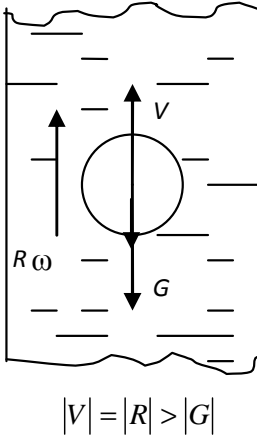


Рис. 2.9

Механизм и кинетика процесса всплывания аналогичны процессу отстаивания с учётом вместо силы тяжести сил выталкивания (рис. 2.9, где V – сила выталкивания; R – сила сопротивления среды (трения); G – сила тяжести).

Скорость всплывания частиц определяется аналогично процессу отстаивания для всех режимов всплывания:

$$\omega_{\text{вс}} = \sqrt{\frac{4dg(\rho_c - \rho)}{3\xi\rho_c}}. \quad (2.31)$$

Движение частиц примесей (лёгкой, дисперсной фазы) вверх вызывает в сточной воде или газе вторичные потоки, тормозящие подъём. Скорость всплывания с учётом торможения равна:

$$\omega'_{\text{вс}} = \omega_{\text{вс}} \frac{3\mu + 2\mu_c}{3\mu + 3\mu_c}, \quad (2.32)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости всплывающих частиц (капель) примесей, Па·с.

При вводе, например, сточной воды в аппарат очистки может произойти измельчение капелек лёгкой жидкости (жидких примесей), особенно при ударе струи о поверхность, что сопровождается изменением давления.

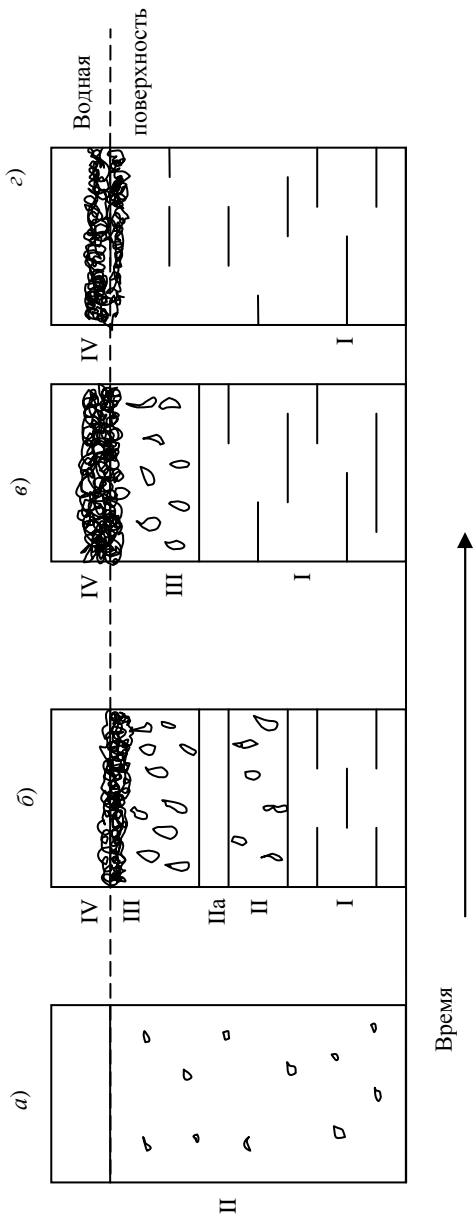


Рис. 2.10

Область применения процесса всплывания. Процесс всплывания используют для очистки водоёмов, производственных и бытовых сточных вод от нефти, масел, смол, жиров [4, с. 204 – 206] и других легковсплывающих веществ, а также для очистки воздуха от дыма.

Аппараты реализации процесса всплывания: нефтеловушки, маслоловушки, смолоотстойники, жироловушки, дымоловушки и другие.

2.5. ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ

Определение. Псевдооживление – процесс пропускания загрязнённого потока жидкости или газа через слой ранее выпавшего осадка (твёрдых частиц примесей) со скоростью, обеспечивающей поддержание осадка во взвешенном состоянии.

Сущность процесса псевдооживления. Пример реализации процесса псевдооживления представлен на рис. 2.11 (А – загрязнённый поток жидкости или газа; Б – очищенный поток жидкости или газа; 1 – трубопровод для отвода осадка; 2 – осадкоуплотнитель; III – линия ДС; II – линия ЕД).

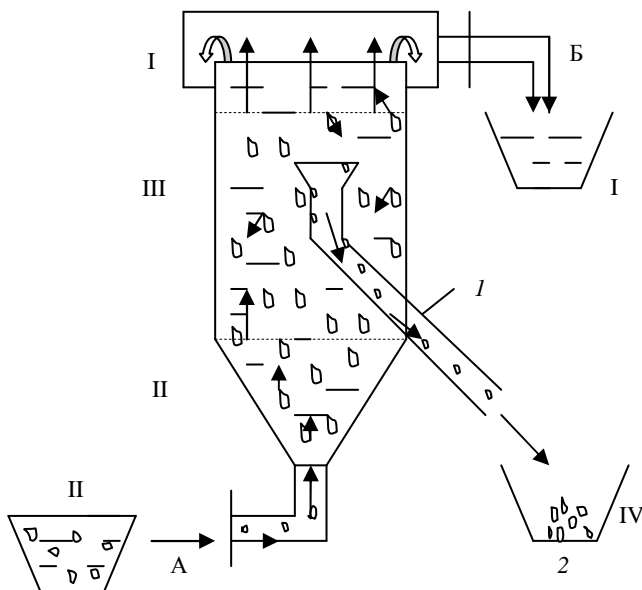


Рис. 2.11

Загрязнённый поток жидкости или газа поступает в аппарат снизу. В аппарате поток движется снизу вверх через слой взвешенного осадка, который находится в состоянии динамического равновесия. Осветлённый (очищенный) поток жидкости или газа отводится из верхней части аппарата. Частицы примесей из псевдооживленного слоя осадка попадают в трубопровод и затем в осадкоуплотнитель [2, с. 54–55].

Механизм и кинетика процесса псевдооживления. В данном процессе не частица дисперсной фазы движется относительно неподвижного потока дисперсной среды (как в процессе осаждения), а сам поток движется относительно условной неподвижной частицы (рис. 2.12).

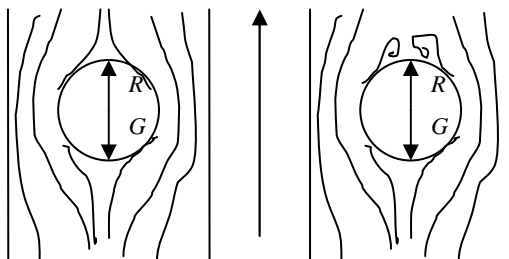


Рис. 2.12

В данном случае выполняются все законы, принципы и условия осаждения (отстаивания), рассмотренные в разделе 2.1.

Однако процесс псевдооживления имеет свои особенности.

Рассмотрим три возможных состояния слоя твёрдых частиц примесей в зависимости от скорости восходящего потока дисперсной среды (рис. 2.13, А – поток; Б – нижняя граница слоя; В – верхняя граница слоя; Г – решётка; Д – зернистый слой).

При относительно небольших скоростях зернистый слой твёрдых частиц примесей остаётся неподвижным (рис. 2.13, а), и его характеристики (удельная поверхность, порозность и другие) не меняются с изменением скорости потока. Дисперсная среда (жидкость или газ) при этом просто фильтруется через слой.

Когда скорость потока достигает некоторой критической величины, слой частиц перестаёт быть неподвижным, его порозность (объём и количество пустот) и высота начинают увеличиваться. Слой приобретает текучесть и переходит как бы в кипящее (псевдооживленное) состояние (рис. 2.13, б). В таком слое частицы интенсивно перемешиваются и перемещаются в потоке в различных направлениях, и весь слой напоминает кипящую жидкость, ограниченную ясно выраженной верхней границей раздела с потоком дисперсионной среды, прошедшим слой.

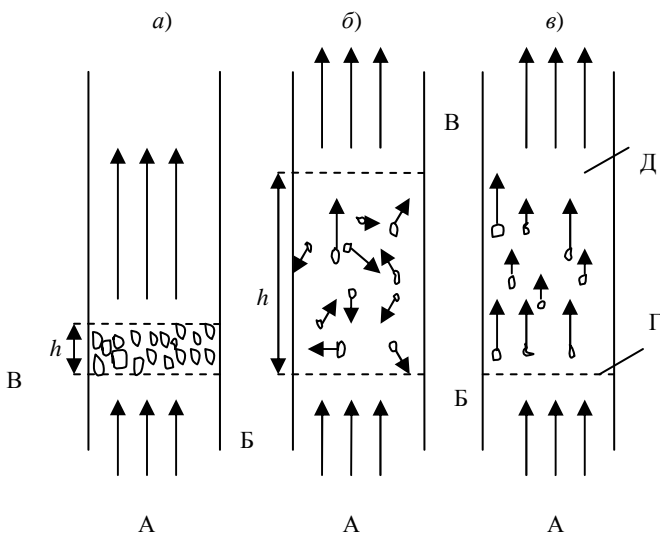


Рис. 2.13

При дальнейшем увеличении скорости потока порозность слоя и его высота продолжают возрастать вплоть до того момента, когда скорость достигает нового критического значения, при котором слой разрушается и частицы начинают уноситься потоком дисперсной среды (рис. 2.13, в).

Типичные графики изменения высоты зернистого слоя h и перепады давления (гидравлического сопротивления) Δp в нём в зависимости от скорости потока дисперсионной среды показаны на рис. 2.14.

Первая критическая скорость, при которой нарушается неподвижность слоя и он начинает переходить в псевдооживленное состояние, называют *скоростью псевдооживления* $\omega_{пс}$. При увеличении скорости потока до значения, равного $\omega_{пс}$, сопротивление зернистого слоя Δp возрастает, а высота h не изменяется (линии AB на рис. 2.14).

Начало псевдооживления (точка C) наступает при равенстве силы гидравлического сопротивления R слоя весу всех его частиц G . Перепад давлений в слое, соответствующий точке B , несколько больше, чем это необходимо для поддержания слоя во взвешенном состоянии. Это объясняется действием сил сцепления между частицами слоя, находящегося в покое. Когда скорость потока достигает значения $\omega_{пс}$, частицы преодолевают силы сцепления, перепад давлений становится равным весу частиц и остаётся постоянным (линия CD для Δp).

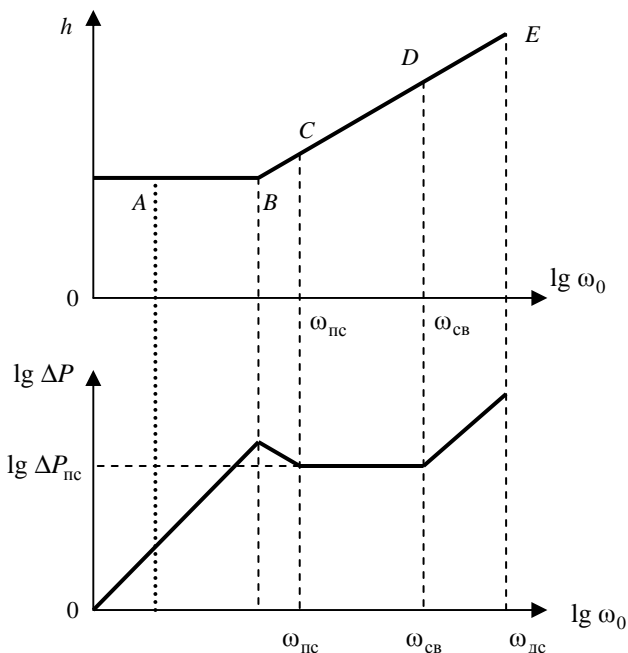


Рис. 2.14

Вторая критическая скорость (точка D), при которой слой разрушается и начинается массовый унос частиц дисперсной фазы потоком дисперсной среды, называется *скоростью уноса*, или *скоростью свободного витания* частиц $\omega_{св}$.

При скорости потока, равной $\omega_{св}$, порозность слоя настолько велика ($\varepsilon \approx 1$), что движение отдельных частиц не зависит от остальных частиц, и частицы как бы витают в среде. При малейшем превышении скорости потока величины $\omega_{св}$ частицы уносятся вверх.

Таким образом, условие витания частицы в восходящем потоке идентично условию равномерного осаждения частицы в неподвижной среде (раздел 2.1). Поэтому скорость уноса (свободного витания) $\omega_{св}$ можно определять так же, как скорость осаждения $\omega_{ос}$. Из формулы (2.9) получим:

$$\omega_{св} = \frac{\mu_c Re_{св}}{d\rho_c}. \quad (2.33)$$

Критерий Рейнольдса при уносе частиц определяется аналогично формуле (2.17) для всех режимов осаждения и псевдооживления:

$$\text{Re}_{\text{св}} = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,515\sqrt{\text{Ar}}} . \quad (2.34)$$

Для случая начала псевдооживления используются формулы соответственно:

$$\omega_{\text{пс}} = \frac{\mu_{\text{с}} \text{Re}_{\text{пс}}}{d \rho_{\text{с}}} , \quad (2.35)$$

$$\text{Re}_{\text{пс}} = \frac{\text{Ar}}{1400 + 5,22\sqrt{\text{Ar}}} . \quad (2.36)$$

Обобщённая формула для определения критерия Рейнольдса при любой доле свободного объёма (порозности псевдооживленного слоя ε):

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}} . \quad (2.37)$$

По формулам (2.37) и (2.9) можно вычислить скорость, необходимую для достижения любой доли свободного объёма ($\omega_{\text{пс}}$, $\omega_{\text{св}}$ и m , g).

Гидравлическое сопротивление псевдооживленного либо неподвижного слоя частиц примесей

$$\Delta p = \frac{3(1-\varepsilon)}{2\varepsilon^3\Phi} \left(\frac{133}{\text{Re}} \right) \frac{h}{d} \frac{\rho_{\text{с}} \omega^2}{2} = \frac{G}{S} = g(\rho - \rho_{\text{с}})(1-\varepsilon)h, \quad (2.38)$$

где ε – текущая порозность псевдооживленного или неподвижного слоя; Φ – фактор формы частиц примесей (для округлых частиц в пределах между 1 (для правильных шаров) и 0,806 (для правильных кубов), для цилиндрических частиц в зависимости от отношения длины цилиндра к его диаметру при $l/d = 5$ $\Phi = 0,69$, при $l/d = 0,05$ $\Phi = 0,32$) [11, с. 18]; Re – текущий критерий Рейнольдса; H – текущая высота псевдооживленного или неподвижного слоя, м; ω – текущая скорость дисперсионной среды, м/с; S – площадь поперечного сечения аппарата для очистки псевдооживлением, м².

Остальные величины определяются так же, как и в разделе 2.1.

Для определения слоя можно также использовать формулу:

$$\varepsilon = \left(\frac{18\text{Re} + 0,36\text{Re}^2}{\text{Ar}} \right)^{0,21} . \quad (2.39)$$

Высоту псевдооживленного слоя можно найти по формуле:

$$h_{\text{пс}} = h_{\text{н}} \frac{1 - \varepsilon_{\text{н}}}{1 - \varepsilon_{\text{пс}}}, \quad (2.40)$$

где $h_{\text{н}}$ – начальная высота слоя в начале псевдооживления, м; $\varepsilon_{\text{н}}$ – начальная порозность слоя (в случае прямого процесса $\varepsilon_{\text{н}} = 0,38 \dots 0,42$, обратного процесса $\varepsilon_{\text{н}} \approx 0,99$); $\varepsilon_{\text{пс}}$ – порозность псевдооживленного слоя ($\varepsilon_{\text{пс}} = 0,42 \dots 0,99$).

Процесс псевдооживления, заключающийся в постепенном увеличении скорости потока $\omega_{\text{с}}$ с величины больше $\omega_{\text{св}}$ до величины $\omega_{\text{с}} \in [\omega_{\text{св}}, \omega_{\text{пс}}]$, называется *обратным процессом*.

Пример обратного процесса псевдооживления показан на рис. 2.11. Внизу на входе в аппарат поток неоднородной системы имеет скорость $\omega_0 \gg \omega_{\text{св}}$ (точка *E* на рис. 2.14). По мере движения потока снизу вверх и расширения области движения (область II на рис. 2.11) в конической части аппарата скорость потока и перепад давлений уменьшаются (по линии *ED* на рис. 2.14) до значений $\omega_{\text{св}}$ и $\Delta p_{\text{пс}}$. В зоне III происходит псевдооживление, поток имеет скорость в пределах от $\omega_{\text{пс}}$ до $\omega_{\text{св}}$ и перепад давлений $\Delta p_{\text{пс}}$ (линия *DC* на рис. 2.14), частицы дисперсной фазы не уносятся потоком. В результате в зону I попадает очищенная жидкость или газ.

Область применения процесса псевдооживления. Процесс псевдооживления используют для очистки (осветления) сточных вод (суспензии) производств полистирола, вискозы, бумаги и других от грубодисперсных, мелкодисперсных и коллоидных частиц полистирола, вискозы, бумаги и других веществ, характеризующихся способностью к слипанию друг с другом.

Аппараты реализации процесса псевдооживления: осветлители псевдооживленного (кипящего) слоя, колонны псевдооживления.

2.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Определение. Электрическое осаждение (электроосаждение, электрофильрование, электрофорез) – процесс движения тела (частицы дисперсной фазы) в жидкости или газе (с положительно или отрицательно заряженной поверхности аппарата) в направлении максимума или минимума напряжённости электрического поля под действием электрической (кулоновой) и пондеромоторной сил.

Сущность процесса электроосаждения. Пример процесса электроосаждения частиц пыли в электрофилт্রে приведён на рис. 2.15 (А – пы-

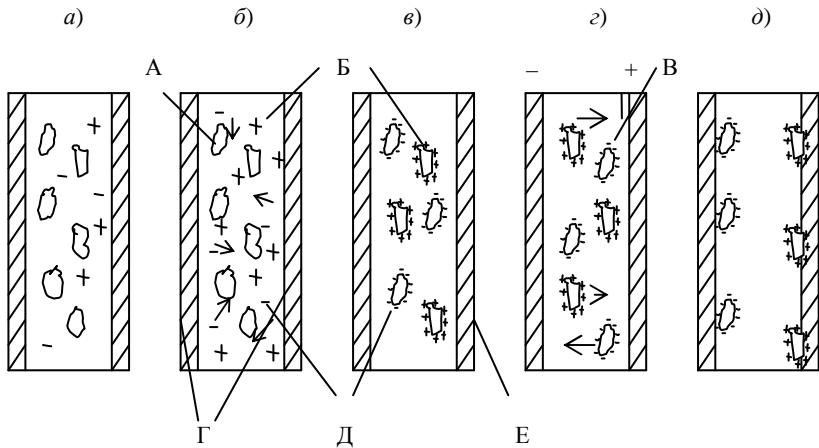


Рис. 2.15

линки; Б – положительные ионы; В – отрицательный ион; Г – электрод; Д – отрицательные ионы; Е – коронирующий электрод).

В электрофильтр поступает запылённый частично ионизированный газ (рис. 2.15, а). В процессе ионизации молекул газов электрическим разрядом (рис. 2.15, б) происходит заряд содержащихся в них частиц (от коронирующего электрода), иначе говоря, ионы абсорбируются на поверхности пылинок (рис. 2.15, в). Затем под действием электрического поля заряженные (ионизированные) положительно частицы перемещаются к отрицательному электроду, заряженные отрицательно частицы – к положительному электроду (рис. 2.15, г). На последней стадии процесса все частицы осаждаются на соответствующих электродах (рис. 2.15, д) [4, с. 55].

Механизм и кинетика процесса электроосаждения. Заряженные газы и жидкости, поступающие на очистку, всегда оказываются частично ионизированными (рис. 2.15, а) за счёт различных внешних воздействий (рентгеновских лучей, радиоактивных излучений, космических лучей, нагрева газа или жидкости и других), поэтому они способны проводить ток, попадая в пространство между электродами. Величина силы тока, необходимая для организации процесса электроосаждения, зависит от числа ионов в исходной дисперсионной среде и от напряжения между электродами. При постепенном увеличении напряжения в движение между электродами вовлекается всё большее число ионов, и величина тока растёт до тех пор, пока в движении не окажутся все ионы, имеющиеся в

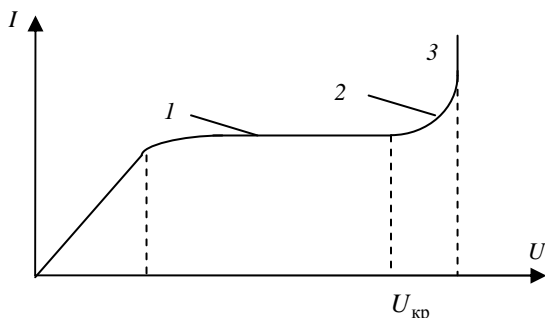


Рис. 2.16

газе (рис. 2.15, б). При этом величина силы тока становится постоянной (ток насыщения), несмотря на дальнейший рост напряжения (рис. 2.16, где 1 – насыщение; 2 – коронирование; 3 – пробой).

При некотором достаточно большом напряжении (критическом напряжении $U_{кр}$) на электродах, при котором возникает коронирующий разряд, движущиеся ионы и электроны настолько ускоряются, что, сталкиваясь с молекулами дисперсной среды (газа или жидкости), ионизируют их, превращая нейтральные молекулы в положительные или отрицательные ионы и электроны. Образовавшиеся новые ионы и электроны ускоряются электрическим полем и, в свою очередь, ионизируют новые молекулы газа. Этот процесс называется *ударной ионизацией газа*. Внешним (визуальным) признаком ударной ионизации является свечение дисперсионной среды или образование короны у коронирующего электрода.

Критическое напряжение на электродах, при котором возникает коронирующий разряд, определяется соотношением:

$$U_{кр} = E_{кр} R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}, \text{ В}, \quad (2.41)$$

где R_1 – размер (радиус) коронирующего электрода, м; R_2 – размер (радиус) осадительного электрода, м.

Критическая напряжённость электрического поля, при которой возникает корона, определяется по формулам:

а) для коронирующего электрода положительной полярности

$$E_{кр} = 3,37 \left(\beta + 0,0242 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \text{ В/м}; \quad (2.42)$$

б) для коронирующего электрода отрицательной полярности

$$E_{кр} = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \text{ В/м.} \quad (2.43)$$

Поправка на плотность дисперсной среды (газа) в рабочих условиях:

$$\beta = \frac{(P_{окр} \pm P_r) \cdot 293}{101\,300 \cdot (273 + t)}, \quad (2.44)$$

где $P_{окр}$ – давление окружающей среды, Па; P_r – разряжение («–») или избыточное давление («+») в аппарате электроосаждения, Па; t – температура дисперсной среды (газа).

Формулы (2.39), (2.40) и (2.41) применяются для запылённого газа и электродов круглого сечения [8, с. 94 – 96].

Для электродов пластинчатого типа в формулах (2.38) – (2.40) можно использовать приближённое значение R , определяемое по формуле

$$R_2 = 2h, \quad (2.45)$$

где h – расстояние между коронирующим электродом и пластинчатым осадительным электродом (межэлектродный промежуток), м [4, с. 57–58].

Коронирующий разряд возникает обычно при высоких напряжениях, достигающих 50 кВ и более.

Аэрозольные частицы, поступающие в зону между коронирующим и осадительным электродами (рис. 2.17, а), адсорбируют на своей поверхности ионы (рис. 2.17, б), образовавшиеся в процессе ударной ионизации, приобретают электрический заряд и наведённый дипольный момент (рис. 2.17, в), и получают тем самым ускорение, направленное в сторону электрода с зарядом противоположного знака (рис. 2.15, в, г) [8, с. 96].

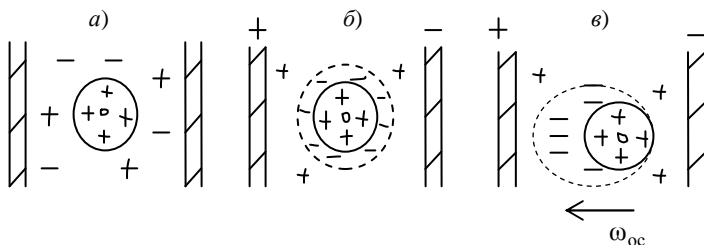


Рис. 2.17

Величину заряда, приобретаемого проводимой частицей дисперсной фазы под воздействием электрического поля, рассчитывают по формуле:

$$q = 3\pi d^2 \varepsilon_0 E_{кр}, \text{ Кл}, \quad (2.46)$$

где ε_0 – электрическая постоянная частицы, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Величина заряда, приобретаемого непроводимой частицей:

$$q = \frac{3\varepsilon\pi}{\varepsilon + 2} d^2 \varepsilon_0 E_{кр}, \text{ Кл}, \quad (2.47)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы, Ф/м [4, с. 55].

Напряжённость поля на расстоянии l от коронирующего электрода

$$E = \sqrt{\left(E_{кр} \frac{R_1}{l}\right)^2 + \frac{2i_0}{u} \left(1 - \frac{R_1^2}{l^2}\right)}, \text{ кВ/см}, \quad (2.48)$$

где $E_{кр}$ – критическая напряжённость электрического поля, кВ/см; l – расстояние от оси коронирующего электрода, см; i_0 – плотность тока коронирующего электрода, мА/м; u – подвижность ионов, см/с [7, с. 55 – 57].

Зарядка частиц дисперсной фазы в электрическом поле коронного разряда происходит двумя механизмами: воздействием электрического поля (частицы дисперсной фазы бомбардируются ионами, движущимися в направлении силовых линий поля) и диффузией ионов. Первый механизм преобладает при размерах частиц более 0,5 мкм, второй – менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2...0,5 мкм эффективны оба механизма [4, с. 55].

Процесс зарядки частиц зависит от подвижности ионов, траектории движения и времени пребывания частиц в зоне коронирующего разряда. Учитывая, что, например, в воздухе и дымовых газах подвижность отрицательных ионов выше, чем положительных, электрофилтры газоочистки обычно делают с коронирующим электродом отрицательной полярности.

Время зарядки частиц составляет доли секунд. Обычно частицы, поступающие в аппарат электроосаждения, уже имеют небольшой заряд, полученный за счёт трения о стенки трубопроводов и оборудования. Этот заряд (трибозаряд) не превышает 5% от заряда, получаемого частицей при коронном разряде.

Движение заряженных частиц дисперсной фазы к осадительному электроду (рис. 2.15 *з, д*) происходит под действием гидродинамических

сил и сил взаимодействия между электрическим полем и зарядом частицы.

Под действием гидродинамических сил частица движется по направлению движения основного потока дисперсионной среды со скоростью, близкой к скорости этого потока. Например, для газоочистки скорость движения частиц составляет 0,5...2 м/с [8, с. 96].

В однородном электрическом поле на заряженную частицу действует электрическая (кулоновская) сила, обусловленная наличием на частице заряда:

$$F_q = Eq, \text{ Н}, \quad (2.49)$$

где q – заряд частицы, Кл.

В неоднородном электрическом поле на заряженную частицу помимо кулоновской силы действует пондеромоторная сила, обусловленная неоднородностью электрического поля и различием диэлектрической проницаемости среды и частицы:

$$F_p = \varepsilon_c r^3 E \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon + 2\varepsilon_c} \frac{dE}{dx}, \text{ Н}, \quad (2.50)$$

где ε_c – диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды, Ф/м; r – радиус частицы, м; $\frac{dE}{dx}$ – градиент электрического поля, В/м².

При $\varepsilon_c > \varepsilon$ частицы под действием пондеромоторной силы движутся в сторону уменьшения напряжённости поля (от коронирующего к осадительному электроду), при $\varepsilon_c < \varepsilon$ – в сторону увеличения напряжённости поля (от осадительного к коронирующему электроду) [4, с. 428].

Явление движения частиц дисперсной фазы под влиянием электрического поля (кулоновской и пондеромоторной сил) называется *электрофорезом* [10, с. 82].

Скорость электрического осаждения (электрофореза) можно определить аналогично формулам (2.1) – (2.5), но с учётом электрической (кулоновской) силы (формула 2.47) вместо силы тяжести (формула 2.1), т.е.:

$$Eq = \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_c \omega_{oc}^2}{2}, \quad (2.51)$$

откуда для всех режимов осаждения

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{8Eq}{\xi \pi d^2 \rho_c}}. \quad (2.52)$$

При электрическом осаждении, как правило, наблюдается ламинарный режим осаждения примесей. Для ламинарного режима при подстановке формул (2.6) и (2.9) в формулу (2.50) можно получить (при $Re < 2$) [7, с. 57 – 59]:

$$\omega_{oc} = \frac{Eq}{3\pi d\mu_c}. \quad (2.53)$$

Скорость электрофореза (движения, осаждения) частиц к электроду также можно определить по формулам:

1) для частиц диаметром $d \geq 1$ мкм

$$\omega_{oc} = 0,118 \cdot 10^{-10} \frac{E^2 d}{2\mu_c}, \text{ м/с}; \quad (2.54)$$

2) для частиц диаметром $d < 1$ мкм

$$\omega_{oc} = 0,170 \cdot 10^{-11} \frac{E^2 c_k}{\mu_c}, \text{ м/с}. \quad (2.55)$$

Здесь коэффициент относительно пробега равен:

$$c_k = \frac{A\lambda}{d}, \quad (2.56)$$

где A – коэффициент, равный $A = 0,815 \dots 1,630$; λ – длина среднего свободного пробега молекул дисперсионной среды [4, с. 58].

Сила тока на коронирующем электроде

$$I = i_0 LA, \quad (2.57)$$

где L – суммарная длина коронирующих электродов, м [7, с. 59].

Важное значение в процессе электроосаждения имеет электрическое сопротивление частиц дисперсной фазы [8, с. 97]. Частицы с малой электрической проводимостью могут вызвать явление обратной короны, которое сопровождается образованием положительно заряженных ионов, частично нейтрализующих отрицательный заряд частиц дисперсной фазы, вследствие чего последние теряют способность перемещаться к осадительным электродам и осаждаются [4, с. 57].

С повышением температуры дисперсионной среды возрастают её вязкость и объём, вызывающее увеличение скорости потока среды, что снижает эффективность очистки электроосаждением [4, с. 57].

Движущиеся силы механически воздействуют на молекулы дисперсной среды и частицы дисперсной фазы и заставляют их двигаться. Это явление называется *электрическим ветром*. Электрический ветер возникает

в местах генерации (зарядки) ионов, т.е. у коронирующих электродах, и вызывает циркуляцию дисперсной среды в межэлектродном пространстве с определённой скоростью (например, для воздуха – до 0,5...1,0 м/с). Электрический ветер оказывает влияние на движение частиц дисперсной фазы к осадительным электродам и на перемешивание ионов и взвешенных частиц дисперсной фазы в межэлектродном пространстве. Однако методика расчёта влияния электрического ветра на движение частиц отсутствует, поэтому в расчётах им пренебрегают либо определяют экспериментальным путём [8, с. 97].

Область применения процесса электроосаждения. Процесс электроосаждения используют для обогащения, классификации и обеспыливания руд и некондиционных продуктов в металлургии, неметаллических материалов (тонкодисперсного кварца, формовочных песков, известняка и др.); для очистки газов от туманов серной кислоты, окислов мышьяка и селена, огарковой пыли в производстве серной кислоты, от сажи в производстве сажи, от известки в производстве соды, от пыли, смолы, метана в производстве ацетилена и жёлтого фосфора, от пыли в производстве цемента, от золы и пыли дымовых газов электростанций, котельных, промышленных печей; для ультра-очистки сточных вод (суспензий) от взвешенных примесей, микрочастиц и микроорганизмов.

Аппараты реализации процесса электроосаждения: электрофильтры трубчатые, пластинчатые, сухие, мокрые, вертикальные, горизонтальные, двухзонные.

2.7. МАГНИТНОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Определение. Магнитное осаждение (магнитная сепарация) – процесс движения пара – или ферромагнитной частицы дисперсной фазы в дисперсионной среде (жидкости, газе, полидисперсном порошке твёрдого материала, руде) в направлении максимума или минимума напряжённости магнитного поля под действием силы магнитного притяжения.

Сущность процесса магнитного осаждения. При поступлении загрязнённой дисперсионной среды на магнитную очистку парамагнитные (слабомагнитные) и ферромагнитные (сильномагнитные) частицы примесей под действием силы магнитного притяжения перемещаются к намагниченной поверхности и осаждаются на ней. Пример выделения магнитных железосодержащих частиц из порошка твёрдых отходов показан на рис. 2.18 (А – полидисперсный порошок твёрдых отходов; Б – стационарный магнитный узел; В – вращающийся барабан; Г – магнитные твёрдые частицы (парамагнетики, ферромагнетики); Д – немагнитные твёрдые частицы (диамагнетики) [9, с. 420–421]).

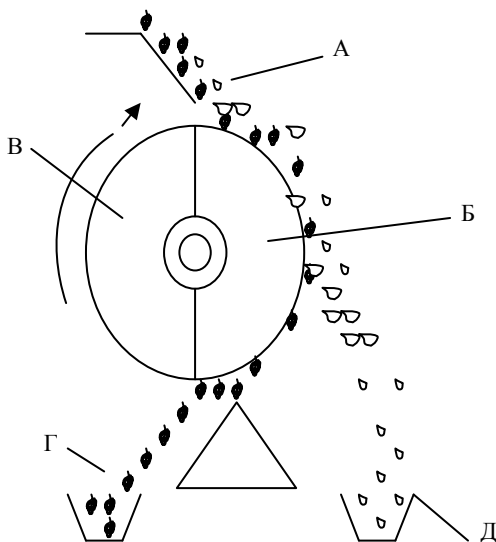


Рис. 2.18

Механизм и кинетика процесса магнитного осаждения. Поведение магнитных частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде в постоянном магнитном поле определяется значением их магнитной восприимчивости χ , а в переменном магнитном поле помимо этой величины поведение частиц также зависит от значения остаточной индукции B_r и коэрцитивной (задерживающей) силы для этих частиц.

Величина магнитной восприимчивости выражает связь между магнитным моментом частицы дисперсной фазы и магнитным полем, действующим на частицу [4, с. 425–426]:

$$\chi = \frac{P_m}{VH} = \frac{J}{H}, \quad (2.58)$$

где P_m – магнитный момент частицы, равный сумме магнитных моментов отдельных молекул этой частицы, $A \cdot m^2$; V – объём частицы, m^3 ; H – напряжённость магнитного поля, A/m ; J – намагниченность частицы, A/m .

Магнитная индукция

$$B = \mu \mu_0 H = (1 + \chi) \mu_0 H, \quad \text{Тл}, \quad (2.59)$$

где μ – магнитная проницаемость частицы; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-4}$ Гн/м.

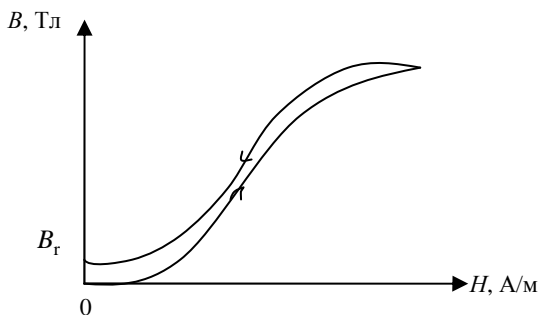


Рис. 2.19

При помещении частицы дисперсной фазы в магнитное поле с увеличивающейся напряжённостью происходит процесс её намагничивания (увеличения магнитной индукции). При устранении магнитного поля частица сохраняет часть магнитных свойств в виде остаточной индукции (рис. 2.19).

Для ликвидации остаточной индукции (достижения её нулевого значения $B_r = 0$ Тл) необходимо создать магнитное поле противоположной напряжённости, величину которой называют *коэрцитивной силой* вещества H_c . Чем меньше величина H_c , тем легче размагничивается материал. Процесс создания магнитного поля противоположной направленности называют *перемагничиванием*.

Действие коэрцитивной силы тем больше, чем большими размерами отличаются между собой магнитные частицы.

При напряжённости переменного магнитного поля, превосходящей величину коэрцитивной силы, происходит напряжение магнитных частиц к полосам магнитной системы аппарата очистки при сильной вибрации, вызываемой некоторым отставанием перемагничивания частиц от изменения направления напряжённости поля. Такая вибрация обеспечивает получение весьма чистой (однородной) фракции при магнитном осаждении мелкодисперсных частиц примесей.

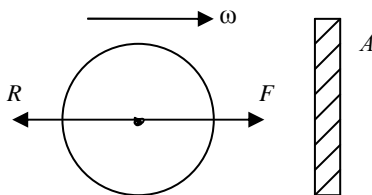


Рис. 2.20

Сила магнитного притяжения (рис. 2.20, А – магнит)

$$F = \mu_0 \chi H_{\text{grad}} H, \text{ Н}, \quad (2.60)$$

где H_{grad} – градиент напряжённости, А·м.

Скорость магнитного осаждения приблизительно можно определить аналогично формулам (2.1) – (2.5), но с подстановкой силы магнитного притяжения (формула 2.58) вместо силы тяжести (формула 2.1), т.е.

$$\mu_0 \chi H_{\text{grad}} H = \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_c \omega_{\text{oc}}^2}{2}, \quad (2.61)$$

откуда

$$\omega_{\text{oc}} = \sqrt{\frac{8\mu_0 \chi H_{\text{grad}} H}{\xi \pi d^2 \rho_c}}. \quad (2.62)$$

Для ламинарного режима магнитного осаждения частиц примесей (при $\text{Re} < 2$)

$$\omega_{\text{oc}} = \frac{\mu_0 \chi H_{\text{grad}} H}{3\pi d \mu_c}. \quad (2.63)$$

Слабوماгнитные частицы осаждают в сильномагнитных полях (напряжённость $H = 800 \dots 1600$ кА/м), сильномагнитные – в слабых полях (напряжённость $H = 70 \dots 160$ кА/м) [4, с. 425 – 428].

Область применения процесса магнитного осаждения (магнитной сепарации). Процесс магнитного осаждения используют для очистки различных газовых, жидких и твёрдых неоднородных сред от сильномагнитных (магнетин, магфранклетин, сидерид, слабوماгнитные оксиды железа после их обжига и другие вещества) и слабوماгнитных (ряд оксидов, гидроксидов и карбонатов железа, марганца, хрома, редких металлов и других веществ) твёрдых примесей, а также от намагничиваемых жидких примесей (масла, смолы и других).

Аппараты реализации процесса: магнитные железоотделители, магнитные сепараторы (шквивные, подвесные, саморазгружающиеся и другие).

3. ФИЛЬТРАЦИЯ

Определение. Фильтрация – процесс разделения неоднородных или однородных систем через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (устройства с отверстиями или порами, неподвижные или подвижные слои пористого или зернистого материала, состоящие из отдельных элементов) под действием различных сил.

3.1. ОБЩИЕ ОСНОВЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Разделение неоднородных систем, состоящих из дисперсионной среды (жидкостей или газа) и взвешенных в ней твёрдых частиц дисперсной фазы, производят при помощи фильтра, который в простейшем виде является сосудом, разделённым на две части фильтровальной перегородкой (рис. 3.1).

Неоднородную систему помещают в одну (в данном случае, верхнюю) часть этого сосуда так, чтобы она соприкасалась с фильтровальной перегородкой (рис. 3.1, а). В разделённых частях сосуда создают разность давлений, под действием которой дисперсионная среда (жидкость или газ) проходит через поры фильтровальной перегородки, причём твёрдые частицы дисперсной фазы задерживаются на поверхности перегородки (рис. 3.1, б).

Толщина осадка постепенно возрастает по мере прибытия новых частиц (рис. 3.1, в). На последней стадии неоднородная система полностью разделяется на чистый *фильтрат* (дисперсионная среда в области I) и влажный постепенно сжимаемый осадок (шлам в области IV) (рис. 3.1, г). Такой процесс разделения суспензии называется *фильтрацией с образованием осадка*. Иногда твёрдые частицы дисперсной фазы проникают в

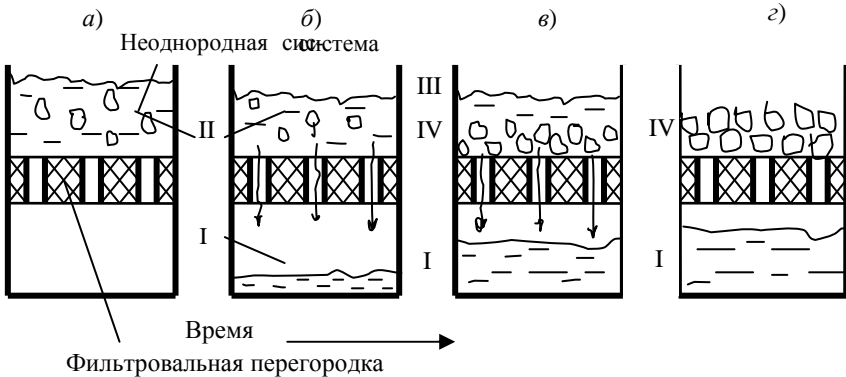


Рис. 3.1

поры фильтровальной перегородки и задерживаются там, не образуя осадка – такой процесс называется *фильтрацией с закупориванием (забивкой) пор*. Возможен также *промежуточный вид фильтрации*, когда твёрдые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки и образуют на ней слой осадка.

Механизм и кинетика процесса фильтрации. Взаимозависимость свойств суспензии и фильтровальной перегородки представлена на рис. 3.2.

В процессе фильтрации твёрдая частица дисперсной фазы задерживается на поверхности фильтровальной перегородки, если размер пор на этой поверхности меньше размера частицы (рис. 3.2, *а*, где 1 – пора; 2 – сводик). В другом случае небольшая по сравнению с порами частица не может выйти в пору и остаётся на поверхности фильтровальной перегородки. Это происходит, если над входом в пору на поверхности перегородки образуется сводик из нескольких относительно небольших твёрдых частиц (рис. 3.2, *б*), который пропускает дисперсионную среду и задерживает другие частицы (рис. 3.2, *в*). Образование сводика происходит лишь при достаточно высокой концентрации твёрдых частиц в суспензии. Происходит фильтрация с образованием осадка.

Если размер твёрдой частицы дисперсной фазы меньше или равен размеру поры в самом узком её сечении, то частица может пройти через фильтровальную перегородку вместе с фильтратом (рис. 3.3, *а*) [1, с. 187]. Однако она может задерживаться внутри фильтровальной перегородки в результате адсорбции на стенках поры или механического торможения на том её участке, который имеет неправильную форму (рис. 3.3, *б*). Такая застрявшая частица будет уменьшать свободное сечение поры и, соответственно, будет увеличивать вероятность задерживания в данной поре последующих твёрдых частиц дисперсной фазы. Возможен случай, когда отдельная твёрдая частица дисперсной фазы полностью закупоривает пору и делает её непроходимой для других частиц (рис. 3.3, *в*). Таким образом происходит фильтрование с закупориванием (забивкой) пор.

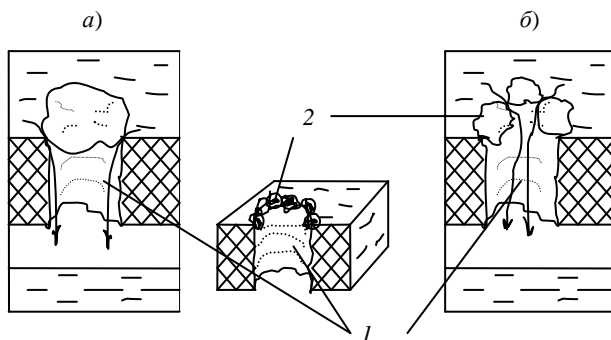


Рис. 3.2

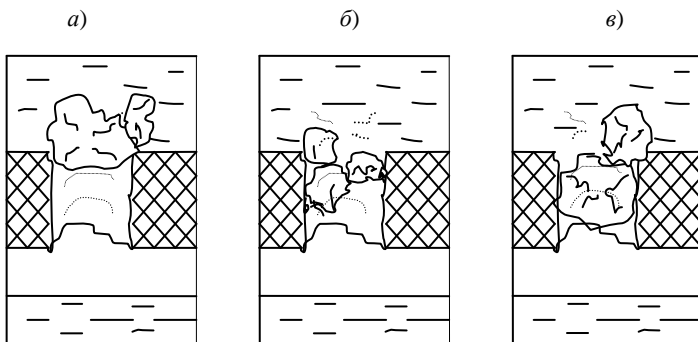


Рис. 3.3

Осаждение (задержка) частиц дисперсной фазы на поверхности фильтровальной перегородки или на внутренней поверхности её пор (рис. 3.3, б, в) происходит в результате совокупного действия эффекта касания, а также процессов диффузионного, инерционного и гравитационного осаждения частиц.

Эффект касания возникает при условии соприкосновения частиц примесей с поверхностью волокон, зёрен или других элементов, образующих поверхность пор. Соприкосновение происходит при условии, что траектория частиц примесей проходит от поверхности пор на расстоянии, равном или менее радиуса частицы (рис. 3.4).

Этот процесс протекает по всему объёму порового пространства. Эффективность очистки касанием определяется соотношением характерных размеров пор (каналов) $d_{\text{ЭК}}$ и частиц $d_p = 2r_p$. При $d_p = d_{\text{ЭК}}$ наблюдается отсеивание частиц входной поверхностью перегородки с образованием

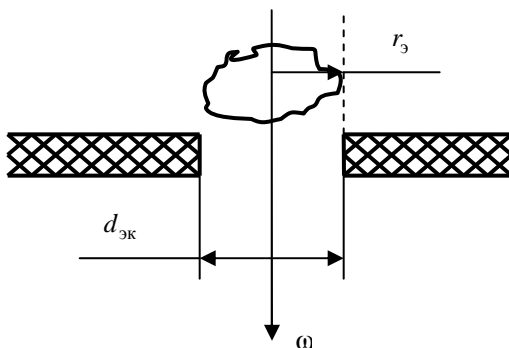


Рис. 3.4

слоя осадка. Такое явление называется *ситовым эффектом* (рис. 3.2, а, б; 3.3, а). Эффективность очистки касанием определяется по формуле:

$$\eta_k = \frac{d_{эк}}{d_3} . \quad (3.1)$$

Процесс осаждения частиц примесей на поверхность пор за счёт *броуновской диффузии* обусловлен хаотическим тепловым движением молекул дисперсной среды, постепенно соударяющихся с частицами примесей. В результате таких соударений частицы смещаются с линией тока и осаждаются на поверхности пор фильтровальной перегородки. Чем меньше частицы примесей (до 0,1 мм) и меньше скорость их движения (до 1 м/с), тем эффективнее процесс захвата частиц примесей за счёт броуновской диффузии.

Эффективность захвата частиц за счёт диффузионного эффекта при вязком обтекании элементов поверхности пор можно представить в виде:

$$\eta_d = k (d_{эк} d_3 \omega_\phi)^{-2/3} , \quad (3.2)$$

где k – коэффициент формы и вида пор; ω_ϕ – скорость фильтрования (движения дисперсионной среды через перегородку), м/с.

Процесс инерционного осаждения частиц примесей на поверхности пор фильтровальной перегородки происходит из-за воздействия на частицы сил инерции, возникающих при отклонении траектории движения частиц от прямолинейного движения. При огибании потоком неоднородной системы криволинейной поверхности пор частицы, стремясь сохранить свое прямолинейное движение, переходят с одной линии тока на другую и касаются поверхности пор (рис. 3.5).

Эффективность захвата частиц примесей за счёт инерционного эффекта определяется по соответствующим графикам:

$$\eta_{и} = \phi(St, R_0) . \quad (3.3)$$

Критерий Стокса:

$$St = \frac{d_3 \omega_\phi \rho \kappa_k}{9\mu_c} . \quad (3.4)$$

Поправка Кенингема-Милликена на увеличение подвижности частиц примесей, размер которых сравним со средней длиной свободного пробега газовых молекул λ , определяется по формуле:

$$\kappa_k = 1 + \left(1,257 + 0,4e^{-\frac{0,55d}{\lambda}} \right) \frac{2\lambda}{d} . \quad (3.5)$$

Здесь средняя длина свободного пробега газовых молекул

$$\lambda = \frac{\mu_c}{\rho_c} \left(\frac{\pi M}{2RT} \right)^{0.5}, \quad (3.6)$$

где M – масса 1 моля газа, кг/моль; R – газовая постоянная, Дж/моль; T – температура газа, К.

Процесс инерционного осаждения частиц примесей на поверхность пор фильтровальной перегородки показан на рис. 3.5.

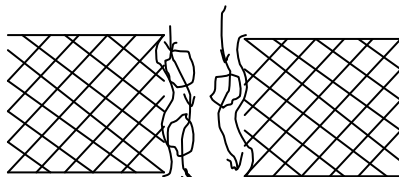


Рис. 3.5

Инерционный эффект осаждения частиц примесей практически отсутствует при движении частиц размерами менее 1 мкм со скоростью 1 м/с. Возникновение режима инерционного осаждения характеризуется критическим числом $St_{кр}$. При $St < St_{кр}$ эффективность инерционного осаждения $\eta_i = 0$. Для условий вязкого обтекания элементов поверхности пор $St_{кр} = 4,3 \pm 0,1$ при $Re = 0,1$, $St_{кр} = 0,1 \dots 0,2$ при $Re > 0,1$.

Процесс гравитационного осаждения частиц примесей на поверхность пор фильтровальной перегородки может происходить в результате их оседания со скоростью витания (уноса) $\omega_{св}$. Эффективность очистки за счёт этого эффекта определяется соотношением:

$$\eta_r = \frac{\omega_{св}}{\omega_{\phi}} = \frac{St}{2Fr}. \quad (3.7)$$

Здесь критерий Фруда

$$Fr = \frac{\omega_{\phi}^2}{d_s}. \quad (3.8)$$

В реальных фильтрах вследствие малых скоростей витания частиц примесей по сравнению со скоростью фильтрования гравитационный механизм осаждения частиц не играет заметной роли. Этот эффект становится заметным лишь при фильтровании аэрозолей с частицами диаметром до 1 мкм и со скоростью: $\omega_a \leq 0,05$ см/с.

В фильтровальных перегородках из диэлектрических материалов на процесс фильтрования существенное влияние оказывает наличие электрических зарядов на поверхности пор, что значительно увеличивает эффективность очистки неоднородных систем от примесей. Например, при фильтровании запыленного газа с частицами пыли размером $d = 0,34$ мкм через фильтровальное перхлорвиниловое волокно, несущее заряд, при скорости фильтрования $0,01$ м/с достигается эффективность очистки $\eta = 99,9999\%$, а после снятия заряда в тех же условиях эффективность уменьшается до $\eta_3 = 90\%$.

Общая эффективность очистки неоднородных систем фильтрованием определяется по формуле:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_k)(1 - \eta_d)(1 - \eta_i)(1 - \eta_r)(1 - \eta_3) = \frac{x_n - x_k}{x_n}, \quad (3.9)$$

где x_n – количество частиц вредных примесей в неоднородной загрязнённой системе на входе в фильтр; x_k – количество частиц вредных примесей в очищенной дисперсионной среде на выходе из фильтра [8, с. 102 – 108].

3.2. ФИЛЬТРОВАНИЕ

Определение. Фильтрование – процесс разделения неоднородных систем (с жидкой или газовой дисперсной средой) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (как правило, устройства с отверстиями или порами диаметром до $0,1$ мм) под действием разности давления (до и после перегородки), создаваемой насосами либо гравитацией, при этом перегородка задерживает твёрдые частицы или капли дисперсной фазы (вредные примеси), пропуская дисперсионную среду.

Сущность процесса фильтрования. Разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки создают разными способами.

Если пространство над неоднородной системой сообщают с источником сжатого газа (ресивером) или пространство под фильтровальной перегородкой присоединяют к источнику вакуума (ресиверу), то происходит процесс *фильтрования при постоянной разности давлений*, поскольку давление в ресиверах поддерживается постоянным. При этом скорость процесса уменьшается в связи с увеличением сопротивления слоя осадка возрастающей толщины. Аналогичный процесс фильтрования происходит под действием постоянной разности давления, обусловленной гидростатическим давлением слоя неоднородной системы постоянной высоты, находящегося над фильтровальной перегородкой.

Если неоднородную систему на фильтр подают поршневым насосом, производительность которого постоянна, то осуществляется процесс *фильтрации при постоянной скорости*; при этом разность давлений увеличивается вследствие увеличения сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Если неоднородную систему подают на фильтр центробежным насосом, производительность которого уменьшается вследствие увеличения сопротивления осадка возрастающей толщины, что обуславливает повышение разности давления и одновременное уменьшение скорости процесса, то осуществляется процесс *фильтрации при переменных разности давлений и скорости*.

Если однородную систему или чистую дисперсионную среду пропускают сквозь слой осадка неизменной толщины, то происходит процесс *фильтрации при постоянных разности давления и скорости* (процессы промывки или продувки, процеживания).

Обычно ввиду небольшого размера пор в слое осадка и фильтровальной перегородки, а также малой скорости движения дисперсионной среды в порах можно считать, что фильтрация протекает в ламинарной области. При таких условиях основное дифференциальное уравнение фильтрации можно записать в виде:

$$\omega_{\phi} = \frac{dV_c}{Sdr} = \frac{\Delta P}{\mu_c (R_{\text{шл}} + R_{\text{фп}})}, \quad (3.10)$$

где ω_{ϕ} – скорость фильтрации, м/с; V_c – объём фильтрата, полученного в результате фильтрации, м³; S – поверхность фильтрации (площадь сечения аппарата), м²; r – продолжительность фильтрации, с; ΔP – разность давлений дисперсионной среды до и после фильтровальной перегородки, Па; $R_{\text{шл}}$ – сопротивление слоя осадка шлама, м_{шл}/м²_{дс}; $R_{\text{фп}}$ – сопротивление фильтровальной перегородки, м_{фл}/м²_{дс}.

Величина ΔP при соответствующих условиях численно равна гидравлическому сопротивлению зернистого или пористого слоя ΔP (раздел 2.4, формула (2.38)).

Величина сопротивления слоя осадка $R_{\text{ос}}$ тем больше, чем меньше пористость осадка и больше удельная поверхность составляющих его твёрдых частиц и больше толщина (высота) осадка. На величину $R_{\text{ос}}$ влияют также размер и форма твёрдых частиц осадка (раздел 2).

Величина сопротивления фильтровальной перегородки $R_{\text{фл}}$ в процессе фильтрации принимается постоянной.

Сопротивление слоя осадка (шлама):

$$R_{\text{шлл}} = r_v h_{\text{шлл}} = r_v c_v \frac{V_c}{S} = r c \frac{V_c}{S}, \quad (3.11)$$

где r_v – удельное объёмное сопротивление слоя осадка, $\text{м}_{\text{дс}}/\text{м}^3$; c_v – объём сухого твёрдого вещества в осадке, отлагающегося на фильтре при прохождении через фильтрующую поверхность 1 м^3 фильтрата, $\text{м}_{\text{п}}^3/\text{м}_{\text{дс}}^3$; $h_{\text{шлл}}$ – высота слоя осадка (шлама), м.

Подставив формулу (3.11) в формулу (3.10), получим:

$$\omega_{\text{ф}} = \frac{dV_c}{Sdr} = \frac{\Delta P}{\eta_c \left(r_v c_v \frac{V_c}{S} + R_{\text{фп}} \right)} = \frac{\Delta P}{\eta_c \left(r c \frac{V_c}{S} + R_{\text{фп}} \right)}. \quad (3.12)$$

Здесь удельное массовое сопротивление слоя осадка

$$\bar{r} = \frac{r_v}{\rho}. \quad (3.13)$$

Масса сухого твёрдого вещества в осадке, отлагающемся на фильтре при прохождении через фильтрующую поверхность 1 м^3 фильтрата (дисперсионной среды):

$$\bar{c} = c_v \rho = \frac{\rho_c \bar{x}}{1 - m \bar{x}}, \quad (3.14)$$

где ρ_c – плотность фильтрата (чистой дисперсионной среды), $\text{кг}_{\text{дс}}/\text{м}_{\text{дс}}^3$; \bar{x} – массовая концентрация твёрдых частиц примесей (дисперсной фазы) в слое неоднородной системы, $\text{кг}_{\text{п}}/\text{кг}_{\text{сл}}$; m – масса влажного осадка (шлама) в расчёте на 1 кг содержащегося в нём сухого вещества, $\text{кг}_{\text{шлл}}/\text{кг}_{\text{п}}$.

Приняв, что сопротивлением фильтровальной перегородки можно пренебречь ($R_{\text{фп}} = 0 \text{ м}/\text{м}^2$), из формул (3.11) и (3.12) можно найти:

$$r_v = \frac{\Delta P}{\mu_c h_{\text{шлл}} \omega_{\text{ф}}}. \quad (3.15)$$

Для сильно сжимаемых осадков $r_v \geq 10^{12} \text{ м}_{\text{дс}}/\text{м}_{\text{п}}^3$.

Приняв $V_c = 0 \text{ м}^3$, что соответствует началу фильтрования, когда на фильтровальной перегородке ещё не образовался слой осадка из уравнения (3.12), получим:

$$R_{\text{фп}} = \frac{\Delta P}{\mu_c \omega_{\text{ф}}}. \quad (3.16)$$

Для ряда фильтровальных перегородок $R_{\text{фп}} \geq 10^{10}$ м/м².

В случае проведения процесса фильтрования при постоянной разности давления $\Delta P = \text{const}$, условно неизменной температуре для фильтра данной конструкции и выбранной фильтровальной перегородке все входящие в формулу (3.12) величины, за исключением V_c и τ , постоянны. Интегрируя при таких условиях уравнение (3.12) и проведя математические преобразования, получим:

$$V_c^2 + 2V_c \frac{R_{\text{фп}} S}{r_v c_v} = \frac{2\Delta P S^2}{\mu_c r_v c_v} \tau \quad (3.17)$$

или

$$V_c^2 + 2V_c c = k\tau. \quad (3.18)$$

Здесь константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки:

$$c = \frac{R_{\text{фп}} S}{r_v c_v} = \frac{R_{\text{фп}} S}{\kappa c}, \text{ м}^3. \quad (3.19)$$

Константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и дисперсионной среды:

$$k = \frac{2\Delta P S^2}{\mu_c r_v c_v}, \text{ м/с}. \quad (3.20)$$

При расчётах процесса фильтрования также используются формулы (при условии $S = 1 \text{ м}^2$):

$$V_c^2 + 2V_c c' = k'\tau; \quad (3.21)$$

$$c' = \frac{R_{\text{фп}}}{r_v c_v} = \frac{R_{\text{фп}}}{rc}; \quad (3.22)$$

$$k' = \frac{2\Delta P}{\mu_c r_v c_v} = \frac{2\Delta P}{\mu_c rc}. \quad (3.23)$$

В случае проведения процесса фильтрования при постоянной скорости $\omega_{\text{ф}} = \text{const}$ из формулы (3.1) получим:

$$\omega_{\text{ф}} = \frac{dV_c}{Sd\tau} = \frac{V_c}{S\tau}. \quad (3.24)$$

Подставляя формулу (3.24) в формулу (3.12) и выражая из неё ΔP_c , получим [1, с. 186 – 197]:

$$\Delta P = \frac{\mu_c r_v c_v}{S^2 \tau} V_c^2 + \frac{\mu_c R_{\text{фп}}}{S \tau} V = \frac{\mu_c r c}{S^2 \tau} V_c^2 + \frac{\mu_c R_{\text{фп}}}{S \tau} V, \quad (3.25)$$

$$\Delta P = \mu_c r_v c_v \tau \omega_{\text{ф}}^2 + \mu_c R_{\text{фп}} \omega_{\text{ф}} = \mu_c r c \tau \omega_{\text{ф}}^2 + \mu_c R_{\text{фп}} \omega_{\text{ф}}. \quad (3.26)$$

Процесс фильтрования часто сопровождается стеснённым или свободным осаждением твёрдых частиц дисперсной фазы, кристаллизацией дисперсионной среды и другими процессами, поэтому все расчёты, проведённые на основе формул (3.1) – (3.26), являются приблизительными. Учитывая это, аппараты фильтрования рассчитывают с некоторым «запасом» по производительности [7, с. 63].

Области применения процесса фильтрования. Процесс фильтрования применяют для предварительной, грубой, вторичной, третичной очистки сточных вод от твёрдых частиц примесей диаметром 0,1...16 мм; для микрофильтрации частиц диаметром 0,2 мкм... $0,5 \cdot 10^{-2}$ мм; для первичной очистки пульпы при производстве целлюлозы, бытовых сточных вод от взвешенных примесей сточных вод, от летучей золы со стадий мокрой очистки, нейтрализованных жидких отходов со стадий травления, сточных вод от гидроокислов металлов с предприятий гальванопластики, смешанного шлама от остатков жидкости с производств бумаги, сточных вод от химических продуктов с химических заводов, от остатков активного и отработанного ила со стадий биологической очистки, от нефтепродуктов и смол; для удаления влаги из шламов (отжима шламов) с различных стадий механической, химической и биологической очистки; для очистки от примесей дымовых газов тепло- электростанций с котлоагрегатами, котельных, сушилок, бедных газов спекальных машин; для очистки газов от пыли купеляционных, шахтных печей, шлаковозгонки, горнов, трубчатых печей, конвертов, электродуговых сталеплавильных печей; для очистки газов при производстве перекисных соединений; для очистки от пыли и частиц примесей воздуха внутри помещений, цехов, в системах вентиляции и кондиционирования; для очистки газов от капель и брызг вредных веществ.

Аппараты реализации процесса фильтрования: жидкостные фильтры сетчатые, с пористой перегородкой, вращающиеся, барабанные, дисковые, пластинчатые, ленточные, туннельные, карусельные, нутч-фильтры, друк-фильтры, вакуум-фильтры, фильтр-прессы, микрофильтры, фильтры Вако, Кингле и др.; газовые рукавные, мешочные, патронные, масляные, шарнирно-шторчатые, рулонные, металлокерамические фильтры, туманоловители (волоконистые фильтры).

3.3. ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ

Определение. Центробежное фильтрование (центрирование) – процесс разделения неоднородных систем (с жидкой или газовой дисперсионной средой) при их движении через цилиндрические твёрдые фильтровальные перегородки под действием разности давлений (до и после перегородки), создаваемой полем центробежных сил; при этом перегородка задерживает твёрдые частицы дисперсной фазы (вредные примеси) и пропускает дисперсионную среду.

Сущность процесса центробежного фильтрования. Процессы центробежного фильтрования проводят в *фильтрующих вращающихся центрифугах* (рис. 3.6).

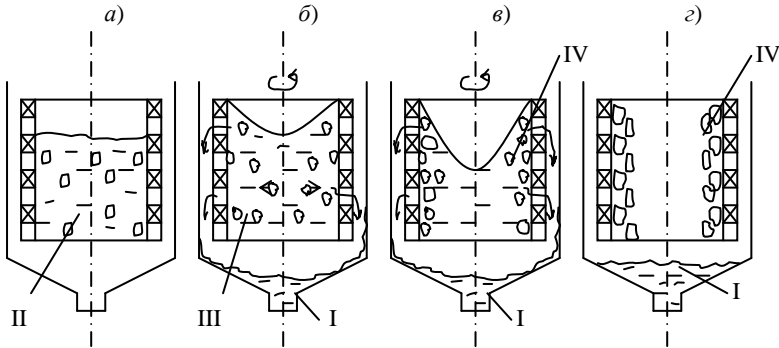


Рис. 3.6

Неоднородную систему помещают внутрь цилиндра с перфорированными стенками (рис. 3.6, а). Вращением цилиндра создают центробежное ускорение, под действием которого дисперсионная среда и твёрдые частицы примесей устремляются к стенкам ротора; при этом твёрдые частицы примесей задерживаются на внутренней поверхности цилиндра, а дисперсионная среда проходит через поры и стекает в нижнюю часть аппарата (рис. 3.6, б). С течением времени происходит постепенное увеличение толщины осадка и его уплотнения, а количество дисперсионной среды в аппарате непрерывно уменьшается (рис. 3.6, в). Результатом реализации процесса центробежного фильтрования является разделение неоднородной системы на *фугат* (осветлённая дисперсионная среда в области I) и влажный осадок (шлам в области IV) (рис. 3.6, з).

Механизм и кинетика процесса центробежного фильтрования. Процесс центробежного фильтрования включает в себя две главные стадии:

1) центробежное стеснённое осаждение частиц примесей (вместе с дисперсионной средой) к цилиндрическим стенкам аппарата, механизм и кинетика которого описаны в разделах 2.1 и 2.2;

2) фильтрование дисперсионной среды сквозь поры фильтровальной перегородки (стенок аппарата) и сквозь слой осадка частиц примесей с постепенно увеличивающейся толщиной, механизм и кинетика которого описаны в разделе 3.1.

Однако в процессе центробежного фильтрования есть и свои особенности.

В общем случае центробежная сила выражается равенством:

$$c = \frac{m\omega_{\text{окр}}^2}{r} = \frac{G\omega_{\text{окр}}^2}{gr}, \quad (3.27)$$

где m – масса вращающегося тела, кг; G – вес вращающегося тела, Н; r – радиус вращения, м.

Окружная скорость вращения (из формулы 2.28):

$$\omega_{\text{окр}} = \omega r = \frac{2\pi n}{60} r, \quad (3.28)$$

где n – число оборотов, мин^{-1} .

Подставив формулу (3.28) в формулу (3.27), получим:

$$c = \frac{G}{gr} \left(\frac{2\pi n}{60} r \right)^2 = \frac{Grn^2}{900}. \quad (3.29).$$

Из формул (2.28) и (3.27) можно найти ускорение в поле центробежных сил:

$$I = \omega^2 r = \frac{\omega_{\text{окр}}^2}{r}. \quad (3.30)$$

Фактор разделения (отношения центробежного ускорения к ускорению свободного падения) с учётом формул (3.27), (3.28) и (3.30):

$$k_p = \frac{I}{g} = \frac{rn^2}{900}. \quad (3.31)$$

Фактор разделения является важнейшей характеристикой центробежного фильтрования. Поэтому расчёт скорости осаждения в поле центробежных сил может быть произведён по уравнениям (2.9), (2.17), (2.18), (2.19), (2.22), (2.24), (2.25), (2.26), но при подстановке в них вместо критерия Архимеда произведения Ark_p для фильтровальных и отстойных центрифуг [1, с. 213–214]:

$$\text{Re}_{\text{цф}} = \frac{\text{Ark}_p}{18 + 0,575\sqrt{\text{Ark}_p}} \quad (3.32)$$

$$\text{Re}_{\text{цф}}^{\text{ст}} = \frac{\text{Ark}_p \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{\text{Ark}_p} \varepsilon^{4,75}} \quad (3.33)$$

Для расчёта производительности центробежного фильтрования рассмотрим элементарные кольца неоднородной системы внутри аппарата (рис. 3.7).

Примем в формуле (3.10) $R_{\text{фп}} = 0$, заменим разность давлений Δp на перепад давлений $\Delta P_{\text{ц}}$, обусловленный действием центробежной силы, и проведя математические преобразования с учётом формул (3.11), (3.12), получим формулу производительности центробежного фильтрования:

$$Q_{\text{ц}} = \frac{V_c}{\tau} = \frac{\Delta P_{\text{ц}} S}{\mu_c r_v h_{\text{шл}}} \quad (3.34)$$

Давление $P_{\text{ц}}$ определяется в соответствии с рис. 3.7 и с учётом формул (3.27), (3.29):

$$d(\Delta P_{\text{ц}}) = \frac{dc}{S} = \frac{dm\omega_{\text{окр}}^2}{rS} = \frac{dm\omega^2 r}{S} \quad (3.35)$$

Элементарная масса кольца неоднородной системы

$$dm = S\rho_c dr = 2\pi r L \rho_c dr, \quad (3.36)$$

где L – длина (высота) центрифуги, м.

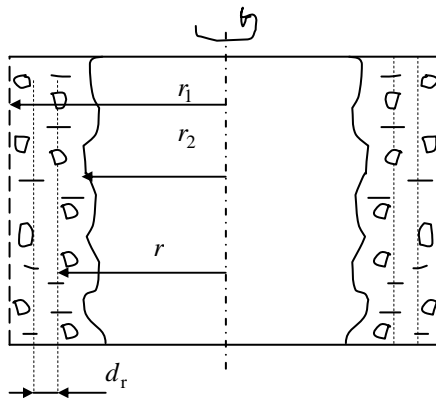


Рис. 3.7

Подставляя формулу (3.27) в формулу (3.25), получим:

$$d(\Delta P_{ц}) = \frac{2\pi r L \rho_c \omega^2}{S} dr = \rho_c \omega^2 r dr, \quad (3.37)$$

где

$$S = 2\pi r L. \quad (3.38)$$

Интегрируя формулу (3.37), можно получить:

$$\Delta P_{ц} = \rho_c \omega^2 \frac{r_1^2 - r_2^2}{2}. \quad (3.39)$$

Толщина осадка

$$L_{шл} = \frac{r_1 - r_2}{b}, \quad (3.40)$$

где b – константа, характеризующая конструкцию определённой центрифуги [1, с. 224; 7, с. 64–65].

Остальные параметры центробежного фильтрования рассчитываются формулами (3.1) – (3.26), но с заменой в них величины ΔP на значение ΔP_c (формула 3.30) и с учётом формулы (3.40).

Глубина воронки неоднородной системы, образуемой при вращении центрифуги (рис. 3.6, б, в):

$$h_b = 2n_c^2 r_1^2, \quad (3.41)$$

где n_c – число оборотов, c^{-1} [3, с. 98].

Область применения процесса центробежного фильтрования. Процесс центробежного фильтрования используют для очистки сточных вод от нерастворимых продуктов реакции, от твёрдых частиц примесей диаметром от $6 \cdot 10^{-1}$ мм до $5 \cdot 10^{-1}$ мм; для удаления остатков влаги из шламов со стадий механической, физической, химической и биологической очистки; для отделения красного шлама и других вредных примесей от бокситовой и глинозёмной руды в производстве алюминия.

Аппараты реализации процесса центробежного фильтрования: нормальные центрифуги, сверхцентрифуги, ультрацентрифуги, трёхколесные, подвесные, горизонтальные центрифуги, центрифуги с ножевой, инерционной, вибрационной выгрузкой осадка, саморазгружающиеся, автоматические и другие центрифуги.

3.4. ПРОМЫВКА (ПРОДУВКА)

Определение. Промывка (продувка) – процесс движения жидкости (промывка) или газа (продувка) через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (зернистые или пористые слои), под действием раз-

ности давлений; при этом промывная среда (жидкость или газ) вытесняет из пор, отверстий или межзерновых каналов фильтровальных перегородок оставшуюся от какого-либо процесса очистки дисперсионную среду (как правило, жидкость) либо частицы дисперсионной фазы (вредных примесей) определённого размера и плотности.

Сущность процесса промывки (продувки). Пример процесса промывки (продувки) с вытеснением остатков дисперсионной среды (жидкости) из осадка (шлама) отстойников представлен на рис. 3.8 (А – промывная жидкость; Б – частицы дисперсной фазы; В – остатки дисперсной системы; Г – промывная жидкость + дисперсионная среда).

В шламе различных суспензий обычно остаётся жидкость (дисперсионная среда) со стадии очистки (рис. 3.8, а), обуславливающая влажность осадка. Промывную жидкость заливают на поверхность шлама (рис. 3.8, б) в виде слоя или подают в диспергированном (капельном) состоянии из разбрызгивающих устройств. Промывная жидкость под действием разности давлений (в данном случае, гравитационной) проходит сквозь поры шлама (рис. 3.8, в), вытесняет из них остатки жидкой дисперсионной среды и смешивается с ней (рис. 3.8, г).

Пример процесса очистки шлама от определённого вида частиц дисперсной фазы (классификации), отличающихся меньшими размерами и плотностью от остальных частиц шлама, показан на рис. 3.9 (А – лёгкие частицы дисперсной фазы (твёрдые, жидкие); Б – твёрдые частицы дисперсной фазы (твёрдые); В – газ или жидкость; Г – гидротранспорт лёгких частиц дисперсной фазы).

Шлам со стадий очистки обычно является полидисперсным (частицы дисперсной фазы имеют различные размеры и плотность) или содержит остатки дисперсионной среды (жидкости или газа – лёгкие частицы)

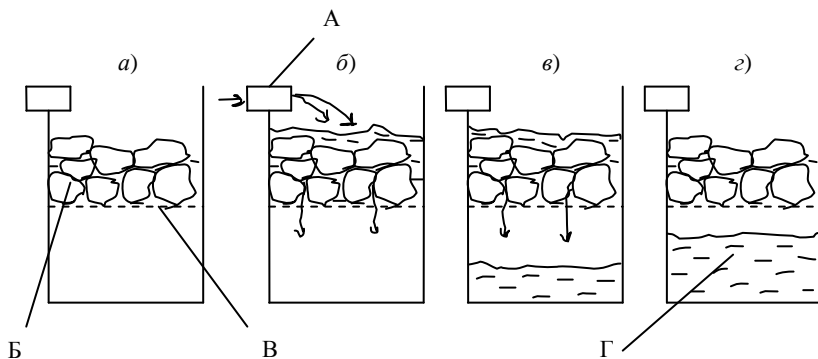


Рис. 3.8

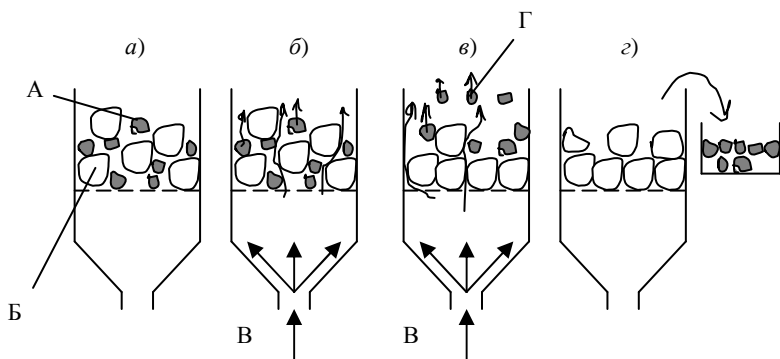


Рис. 3.9

(рис. 3.9, а). В определённую часть аппарата (в данном случае снизу) подаётся под давлением продувочный газ или промывная жидкость, которая проходит сквозь пустоты между тяжёлыми частицами шлама, захватывает лёгкие частицы шлама и начинает транспортировать их в направлении своего движения (рис. 3.9, б). В конце концов все лёгкие частицы захватываются промывной (продувочной) средой, и происходит их гидротранспорт (массовый унос) (рис. 3.9, в). В результате происходит разделение частиц шлама на лёгкую (верхнюю) фракцию и тяжёлую (нижнюю) фракцию. При массовом уносе частицы имеют скорость ω , равную или превышающую скорость свободного витания $\omega_{св}$ (раздел 2.4, рис. 2.13, в, формулы 2.33, 2.34).

Механизм и кинетика процесса промывки (продувки). Во время начального периода промывки (продувки) промывная жидкость (продувочный газ) лишь вытесняет остатки дисперсной среды (либо частицы дисперсной фазы определённого размера или плотности) из пор и каналов слоя шлама (осадка). Во время следующего основного периода промывки (продувки) идёт процесс поглощения остатков дисперсионной среды (либо частиц дисперсной фазы определённого размера и плотности) промывной водой (продувочным газом) и удаления их со скоростью, равной или превышающей скорость уноса (свободного витания) ω_c .

При движении дисперсионной среды (жидкости или газа) через зернистый или пористый слой фильтровальной перегородки, когда поток полностью заполняет свободное пространство между элементами (частицами) слоя (рис. 3.8, в; 3.9, в), можно считать, что жидкость одновременно обтекает отдельные элементы слоя и движется внутри каналов неправильной формы, образуемых пустотами и порами между элементами.

Гидравлическое сопротивление зернистого слоя можно определить по формуле:

$$\Delta P = \lambda \frac{l_k}{d_{\text{эк}}} \frac{\rho_c \omega_c^2}{2}. \quad (3.42)$$

Общий коэффициент сопротивления движению дисперсионной среды

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34. \quad (3.43)$$

Критерий Рейнольдса для движения промывной (продувочной) среды:

$$\text{Re} = \frac{\omega_c d_{\text{эк}} \rho_c}{\mu_c}. \quad (3.44)$$

Действительная скорость дисперсионной промывной (продувочной) среды в каналах слоя

$$\omega_c = \frac{\omega}{\varepsilon}. \quad (3.45)$$

Фиктивная текущая скорость дисперсионной промывной (продувочной) среды в каналах слоя (удельная интенсивность промывки)

$$\omega = \frac{G_v}{S}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (3.46)$$

где G_v – объёмный расход промывной (продувочной) среды, $\text{м}^3/\text{с}$; S – поперечное сечение слоя (аппарата), м .

Длина каналов в слое

$$l_k = \alpha_k h_{\text{шл}}, \quad (3.47)$$

где α_k – коэффициент кривизны каналов слоя (обычно кривизной каналов условно пренебрегают, т.е. $\alpha_k = 1$); $h_{\text{шл}}$ – высота слоя шлама, м .

Эквивалентный диаметр каналов в слое:

$$d_{\text{эк}} = \frac{4\varepsilon}{a} = \frac{2\Phi\varepsilon}{3(1-\varepsilon)} d_3, \quad (3.48)$$

где a – удельная поверхность (поверхность элементов слоя фильтровальной перегородки, находящихся в единице объёма, занятого всем слоем), $\text{м}^2/\text{м}^3$; d_3 – эквивалентный диаметр частиц зернистого слоя, м .

Подставляя формулы (3.45) и (3.47) в формулу (3.44), получим критерий Рейнольдса для фильтровальной перегородки в виде зернистого слоя:

$$\text{Re} = \frac{2\Phi}{3(1-\varepsilon)} \frac{\omega d_3 \rho_c}{\mu_c}. \quad (3.49)$$

Путём подстановки формул (3.43), (3.45), (3.47), (3.48) в формулу (3.42) и проведя арифметические преобразования, можно получить формулу (2.38) [1, с. 101 – 106].

Так как при малом диаметре каналов неправильной формы в зернистом слое значение критерия Рейнольдса небольшое, то движение промывной среды сквозь зернистый слой практически всегда является ламинарным. Поэтому, подставив формулу (3.49) в формулу (2.38) и проведя математические преобразования, можно получить:

$$\Delta P = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_c h_{\text{шл}}}{\Phi^2 \varepsilon^3 d_3^2}. \quad (3.50)$$

Здесь фактор формы [1, с. 104–105]

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{\varphi}}. \quad (3.51)$$

Процесс промывки (продувки), т.е. движение промывной (продувочной) среды сквозь слой шлама, является процессом фильтрования промывной (продувочной) среды при постоянном давлении и скорости, так как слой осадка (шлама) имеет постоянную высоту $h_{\text{шл}} = \text{const}$. Поэтому, подставляя величину $h_{\text{шл}}$ из формул (3.11) и величину $\omega_{\text{ф}}$ из формулы (3.24) в формулу (3.12), можно получить формулу для определения скорости промывки (продувки):

$$\omega = \frac{V_c}{S\tau} = \frac{\Delta P}{\mu_c (r_v h_{\text{шл}} + R_{\text{фп}})}, \quad (3.52)$$

откуда

$$V_c = \frac{\Delta P S}{\mu_c (r_v h_{\text{шл}} + R_{\text{фп}})} \tau; \quad (3.53)$$

$$\Delta P = \omega \mu_c (r_v h_{\text{шл}} + R_{\text{фп}}) = \frac{V_c \mu_c}{S\tau} (r_v h_{\text{шл}} + R_{\text{фп}}). \quad (3.54)$$

Формулы (3.52), (3.53) и (3.54) применимы как для сжимаемых, так и для несжимаемых зернистых слоёв (осадков, шламов) [1, с. 193].

Здесь удельное объёмное сопротивление зернистого слоя в процессе промывки (продувки) можно определить, подставив формулу (3.50) в формулу (3.15) и учитывая, что $\omega = \omega_{\text{ф}}$:

$$r_v = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\Phi^2 \varepsilon^3 d_s^2}. \quad (3.55)$$

Удельное массовое сопротивление зернистого слоя определяется по формуле (3.13) [1, с. 197]

Из формулы (3.53) можно определить время промывки (продувки):

$$\tau = \frac{V_c \mu_c (r_v h_{\text{шл}} + R_{\text{фп}})}{\Delta PS}. \quad (3.56)$$

Поскольку удельное сопротивление зернистого слоя прямо пропорционально вязкости промывной (продувочной) среды, а вязкость промывной (продувочной) среды может отличаться от вязкости дисперсионной среды (фильтрата, осветлённой жидкости или газа), то в формулу вводится поправочный коэффициент:

$$K_B = \frac{\mu_{c1}}{\mu_{c2}}, \quad (3.57)$$

где μ_{c1} – вязкость промывной (продувочной) среды, Па·с; μ_{c2} – вязкость дисперсионной среды (фильтрата, осветлённой жидкости или газа), Па·с.

Таким образом:

$$\tau = \frac{V_c \mu_{c1} (r_v h_{\text{шл}} + R_{\text{фп}})}{\Delta PS} K_B. \quad (3.58)$$

Концентрация остатков дисперсионной среды либо твёрдых частиц дисперсионной фазы в промывной жидкости (продувочном газе) в любой момент времени от начала диффузионного процесса:

$$c = c_1 e^{-\frac{K_{\text{пр}} \omega \tau}{h_{\text{шл}}}}, \quad (3.59)$$

где c_1 – концентрация промывной (продувочной) среды в начале процесса; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства осадка и промывной жидкости (продувочного газа), а также режим промывки (продувки) (находится экспериментальным путём); ω – скорость (удельная интенсивность) промывки, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

После логарифмирования формулы (3.59) получим:

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{l_k c_1 - l_k c_2} = \frac{2,3h_{\text{шл}}}{K_{\text{пр}} \omega}, \quad (3.60)$$

где τ_1 – время начала промывки, с; τ_2 – время достижения определённой концентрации промывной среды, с; c_2 – концентрация промывной среды в момент времени τ_2 [3, с. 96].

Остатки дисперсионной среды (либо частицы дисперсионной фазы) удаляются вместе с промывной средой со скоростью, соответствующей второй критической скорости (свободного витания) в случае псевдооживления $\omega_{\text{св}}$. Такое движение называется *гидро(пневмо)транспортом* и используется не только для удаления частиц вместе с промывной (продувочной) средой, но и для их транспортирования по трубопроводам к другим аппаратам очистки, а также для перемещения загрязнённых неоднородных систем [1, с. 107].

Для расчёта процесса *гидро(пневмо)транспорта* используются формулы (2.33), (2.34), (2.18), (2.19).

Область применения процесса промывки (продувки). Процесс промывки (продувки) используют для удаления из пор и каналов шлама остатков дисперсионной среды с различных стадий очистки (осаждение, фильтрование, сорбция и др.); для гидравлической классификации (отделения друг от друга) частиц примесей различного диаметра и плотности со стадий очистки; для гидравлического обогащения (выделения и перемещения из общего слоя шлама) частиц необходимого диаметра и плотности частиц драгоценных металлов, частиц с ценными свойствами на дальнейшую переработку; для разрушения и удаления глинистых, песчаных и других минеральных, а также органических примесей твёрдых отходов; для смыва остатков дисперсных фаз с поверхностей аппаратов очистки с последующим транспортированием их в приёмники концентрата.

Аппараты реализации процесса промывки (продувки): промывочные машины, гидромониторы, барабанные грохоты, бутары, вращающиеся скрубберы, корытные мойки, аппараты автоклавного и других типов, промывные резервуары, шлюзы, азраторы.

Промывку (продувку) шламов осуществляют также непосредственно в аппаратах очистки (отстойниках, фильтрах, реакторах и других) после окончания стадий очистки, разделения, химической реакции и других.

3.5. ЗЕРНИСТОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ

Определение. Зернистое фильтрование (глубинная фильтрация) – процесс разделения неоднородных систем (с жидкой или газовой дисперсионной средой) при их движении через различного вида зернистые, под-

вижные, неподвижные и псевдооживленные фильтровальные слои под действием малой разницы давлений, создаваемой насосами или гравитацией, при этом зернистый слой задерживает твёрдые частицы или капли дисперсионной фазы и пропускает дисперсионную среду.

Сущность процесса зернистого фильтрования. Разделение неоднородных систем, состоящих из дисперсионной среды (жидкости или газа) и взвешенных в ней твёрдых частиц или капель производят в фильтре с зернистой загрузкой (рис. 3.10, А – зернистый слой (постель, загрузка); Б – опорная решётка зернистого слоя).

Загрязнённую систему подают внутрь фильтра (рис. 3.10, а). Под действием перепада давлений дисперсионная среда проходит сквозь зернистый слой (область I), а частицы дисперсной фазы задерживаются зернистым слоем (рис. 3.10, б). В процессе фильтрования происходит закупоривание каналов зернистого слоя мелкими частицами дисперсной фазы и образование слоя осадка увеличивающейся толщины из крупных частиц дисперсной фазы (область IV) (рис. 3.10, в). В результате реализации процесса неоднородная система разделяется на осветлённую дисперсионную среду (фильтрат в области I) и шлам (влажный осадок в области IV и закупоренный примесями зернистый слой) (рис. 3.10, г).

Механизм и кинетика процесса зернистого фильтрования. Механизм и кинетика процесса зернистого фильтрования аналогичны процессам фильтрования с образованием осадка, фильтрования с забивкой пор и промывкой (продувкой) через зернистый слой. При этом процесс зернистого фильтрования имеет свои особенности.

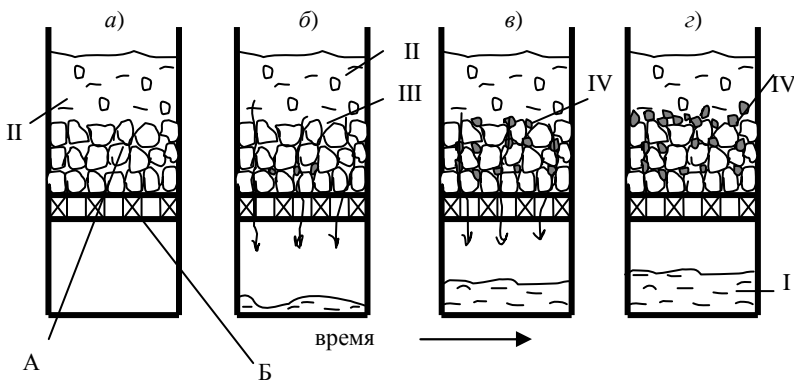


Рис. 3.10

Механизмы извлечения частиц дисперсной фазы из неоднородной системы сводятся к следующим:

- 1) процеживание (механическое фильтрование);
- 2) гравитационное осаждение;
- 3) инерционное осаждение;
- 4) химическая адсорбция (хемоадсорбция);
- 5) физическая адсорбция;
- 6) адгезия (смачивание);
- 7) коагуляционное осаждение;
- 8) биологическое выращивание.

В общем случае эти механизмы могут действовать совместно, и процесс зернистого фильтрования будет состоять из следующих стадий:

- 1) перенос частиц дисперсной фазы на поверхность веществ, образующих зернистый слой;
- 2) прикрепление частиц дисперсной фазы к поверхности зёрен;
- 3) отрыв частиц дисперсной фазы от поверхности зёрен.

Прилипшие частицы примесей постоянно испытывают влияние движущегося потока дисперсионной среды, который в результате трения срывает их с поверхности зёрен. При равенстве числа частиц примесей, поступающих в единицу времени на поверхность зернистого слоя и покидающих её, наступает насыщение поверхности зёрен и она перестаёт очищать загрязнённые системы.

Кинетика зернистого фильтрования описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial l_k \partial \tau} + a \omega_\phi \frac{\partial x}{\partial l_k} + b \frac{\partial x}{\partial \tau} = 0, \quad (3.61)$$

где x – концентрация частиц примесей в загрязнённой системе; l_k – длина участка канала, на котором происходит выделение частиц примеси; a – константа скорости прилипания частиц к поверхности зёрен; b – константа скорости отрыва частиц от поверхности зёрен; τ – время зернистого фильтрования.

Уравнение (3.61) имеет решение в форме бесконечного ряда.

Удельная объёмная поверхность зернистого слоя

$$a = 6(1 - \varepsilon) \frac{\Phi}{d_3}. \quad (3.62)$$

Время защитного действия зернистого слоя (продолжительность работы фильтра до «проскока» частиц фильтрата и насыщения зёрен)

$$\tau = \frac{1}{k} \left(\frac{h_3}{\omega_\phi^{1,7} d_3^{0,7}} - \frac{S_0 d_3}{\omega_\phi} \right), \quad (3.63)$$

где h_3 – толщина зернистого фильтрующего слоя; d_3 – размер зёрен; k, S_0 – константы, зависящие от концентрации частиц примесей в загрязнённой и осветлённой системах.

Сопrotивление фильтрующего зернистого слоя с учётом закупоривания пор в любой момент времени непрерывно возрастёт:

$$\Delta P = \int_0^{h_3} i dh_3 = i_0 \int_0^{h_3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - \Delta V_{\text{шл}}} \right)^3 dh_3, \quad (3.64)$$

где $\Delta V_{\text{шл}}$ – изменение удельного объёма осадка, накопившегося в каналах зернистого слоя; i – сопротивление единицы фильтрующего слоя с зернистыми частицами.

Сопrotивление единицы толщины фильтрующего зернистого слоя при прохождении через него чистой дисперсионной среды:

$$i_0 = 0,188\varphi^2\mu_c \frac{(1-\varepsilon)^2}{d_3^2(\Delta V_{\text{ос}})^3}. \quad (3.65)$$

При зернистом фильтровании эмульсий имеет значение первоначальный характер поверхности зёрен загрузки. При гидрофобной поверхности зёрен прилипание частиц сильнее, чем при гидрофильной, так как на поверхности зёрен гидрофильных материалов имеется гидратная оболочка, и прилипание капель примесей происходит только там, где эта оболочка нарушена.

Длительность фильтрования эмульсий

$$\tau_{\text{ЭМ}} = \frac{kew}{x_n - x_k}, \quad (3.66)$$

где k – коэффициент, учитывающий нестабильность процесса ($k = 0,85$); e – удельная каплеёмкость зернистой загрузки (количество капель и твёрдых частиц примесей, задерживаемых единицей объёма зернистого слоя); w – объём зернистого фильтрующего слоя; x_n, x_k – начальная и конечная массовая концентрация капель в неоднородной системе до и после очистки.

Остальные характеристики рассчитываются по формулам (3.1) – (3.26).

Область применения процесса зернистого фильтрования. Процесс зернистого фильтрования применяется для очистки шахтных сточных вод от взвешенных примесей, окислительных сточных вод прокатных станов, сточных вод нефтехимических заводов от нефтепродуктов, сточных вод машиностроительных заводов от масла, для очистки питьевой воды от взвешенных частиц примесей.

Аппараты реализации процесса зернистого фильтрования: напорные фильтры с плавающей загрузкой, пенополиуретановые фильтры, фильтры «Полимер», установки «Кристалл», фильтры быстрого осаждения, фильтры с зернистой постелью, песчаные фильтры, глубинные фильтры, самотечные, быстротечные, однослойные, двухслойные фильтры, фильтры с восходящим потоком, фильтры под давлением, контактные осветлители, фильтры АКХ, фильтры Harding.

3.6. ПРОЦЕЖИВАНИЕ

Определение. Процеживание (поверхностная фильтрация, просеивание, брызгоулавливание) – процесс разделения неоднородных систем (с жидкой или газовой дисперсионной средой) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (решётки с отверстиями размерами 16...19 мм и сита с отверстиями размерами 0,5...1 мм, реже 60...100 мкм) под действием разности давлений (до и после перегородки), создаваемой насосами или силой гравитации; при этом перегородка задерживает крупные частицы или капли дисперсной фазы и пропускает дисперсионную среду вместе с мелкими твёрдыми частицами (или каплями).

Сущность процесса процеживания. Пример процесса процеживания сточной воды через решётку представлен на рис. 3.11 (А – цепные грабли; Б – решётка; В – шламоприёмник).

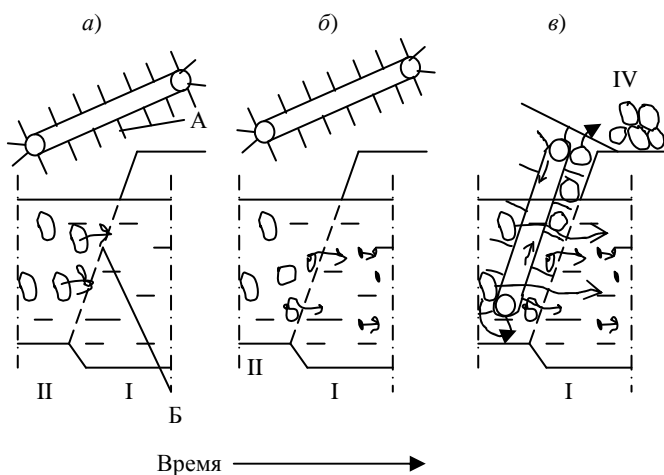


Рис. 3.11

Сточная вода (область II) поступает на решётку (рис. 3.11, а). Мелкие частицы отбросов вместе с потоком сточной воды проходят через отверстия решётки (область I) и далее транспортируются на последующие очистные сооружения (рис. 3.11, б). Крупные частицы отбросов (область IV) задерживаются на решётке, а затем с помощью, например, опускающихся цепных граблей счищаются с решётки (рис. 3.11, в).

Механизм и кинетика процесса процеживания. Расчётная схема устройства процеживания (решётки) представлена на рис. 3.12.

Расчётное наполнение перед решёткой

$$h_{\max} = \frac{q_{\max} K_1}{b v_c n N}, \text{ м}, \quad (3.67)$$

где q_{\max} – максимальный секундный расход неоднородной системы, м³/с; K_1 – коэффициент, учитывающий стеснение потока граблями; b – ширина прозоров решётки (сита), м; v_c – скорость движения дисперсионной среды в прозорах решётки, м/с; n – число прозоров в решётке; N – число решёток (сит).

Скорость неоднородной системы в умеренной части канала перед решёткой при минимальном притоке (желательна не менее 0,4 м/с для сточной воды во избежание заливания канала):

$$v = \frac{q_{\min}}{B_p h_{\min} N}, \quad (3.68)$$

где q_{\min} – минимальный секундный расход неоднородной системы, м³/с; B_p – ширина решётки (сита), м.

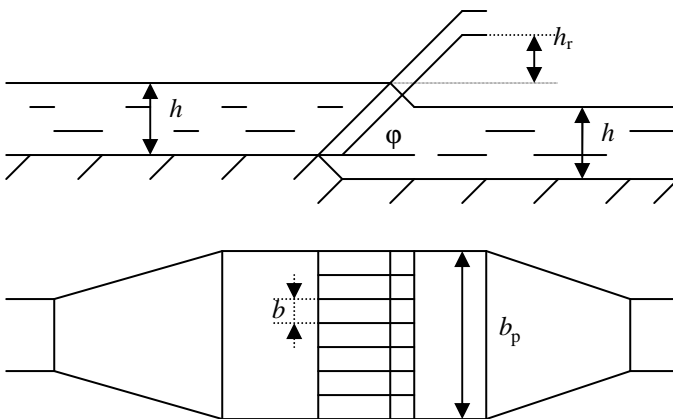


Рис. 3.12

Расчётное наполнение в канале перед решёткой при минимальном потоке

$$h_{\min} = \frac{q_{\min} K_1}{b v_c n N}, \text{ м.} \quad (3.69)$$

Потеря напора в решётке

$$h_p = \varepsilon \frac{v_c^2}{2g} K, \text{ м,} \quad (3.70)$$

где K – коэффициент, учитывающий увеличение потери напора в решётке вследствие засорение её шламом (коэффициент закупоривания прозоров решётки).

Коэффициент местного сопротивления решётки

$$\varepsilon = \beta \left(\frac{S}{b} \right)^{\frac{4}{3}} \sin \varphi, \quad (3.71)$$

где β – коэффициент, учитывающий форму стержня решётки; S – толщина стержня решётки, м; φ – угол наклона решётки к горизонту

Максимальная скорость движения дисперсионной среды в прозорах решётки

$$v_c = \frac{q_{\max}}{NF}, \text{ м/с,} \quad (3.72)$$

где F – суммарная площадь прозоров решётки, м² [13, с. 43 – 52].

Область применения процесса процеживания. Процесс процеживания применяют для извлечения из производственных и бытовых сточных вод крупных кусков или агрегатов загрязнений, для подводного задержания и дробления крупных отбросов, содержащихся в сточных водах.

Аппараты реализации процесса процеживания: решётки неподвижные, наклонные, вертикальные, механизированные (подвижные), с ручной очисткой, с очисткой механическими граблями; решётки-дробилки, круглые решётки-дробилки, радикальные решётки-дробилки, вертикальные решётки-дробилки, гораторы; здания решёток.

3.7. ГРОХОЧЕНИЕ

Определение. Грохочение (сортировка, просеивание) – процесс разделения неоднородных систем (с твёрдой дисперсионной средой) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки

(решётки, сетки, сита) под действием разности давлений (до и после перегородки), создаваемой силой гравитации, силой трения, инерционными силами; при этом перегородка задерживает крупные твёрдые частицы дисперсной фазы и пропускает мелкие твёрдые частицы дисперсионной среды.

Сущность процесса грохочения. Пример процесса грохочения крупных кусков твёрдых отходов представлен на рис. 3.13.

Неоднородную систему подают на сито (рис. 3.13, а). Сито приводится в движение в определённых направлениях и с определённой периодичностью для осуществления движения твёрдых частиц неоднородной системы и поверхности сита относительно друг друга (рис. 3.13, б). В результате такого движения твёрдые частицы дисперсионной среды, размер которых равен или меньше размера отверстия в сите, проходят через него (просев в области I), а более крупные твёрдые частицы дисперсной фазы (примеси) задерживаются на сите (отсев в области IV) (рис. 3.13, б, в).

Механизм и кинетика процесса грохочения. Очистка твёрдых неоднородных систем грохочением возможна в том случае, если твёрдые частицы данной неоднородной системы движутся с некоторой скоростью по фильтровальной перегородке.

Рассмотрим движение тела по наклонному сити (рис. 3.14, Б – сито; Г – эксцентрик; Д – частица). Чтобы тело провалилось через отверстие в сите, оно должно, двигаясь из положения А, занять положение В.

За время τ тело в горизонтальном направлении пройдёт путь:

$$x = \omega\tau \cos \alpha, \quad (3.73)$$

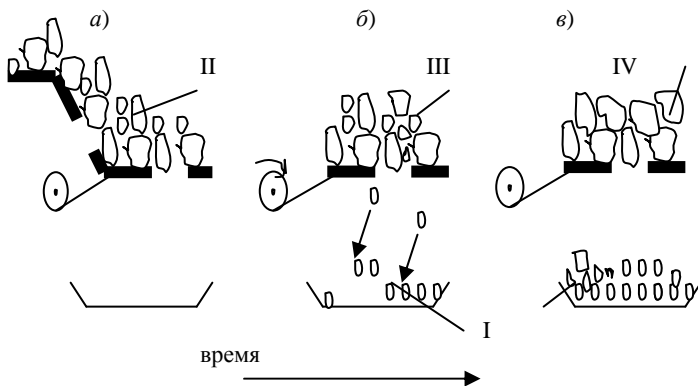


Рис. 3.13

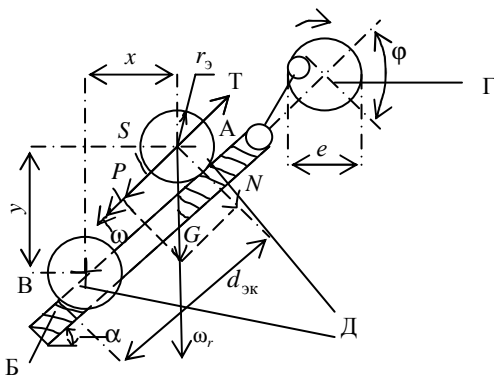


Рис. 3.14

а в вертикальном направлении:

$$y = \frac{g\tau^2}{2}, \quad (3.74)$$

где ω – относительная скорость движения частицы по ситам, м/с; α – угол наклона сита в данный момент времени.

Также можно записать:

$$x = (d_{эк} - r_3 - r_3 \operatorname{tg} \alpha) \cos \alpha, \quad (3.75)$$

$$y = (d_{эк} - r_3 - r_3 \operatorname{tg} \alpha) \sin \alpha + \frac{r_3}{\cos \alpha}, \quad (3.76)$$

где r_3 – эквивалентный радиус частицы, м.

Решая совместно уравнения (3.73) – (3.76), получим:

$$\omega = (d_{эк} - r_3 - r_3 \operatorname{tg} \alpha) \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{(d_{эк} - r_3 - r_3 \operatorname{tg} \alpha) \sin 2\alpha + 2r_3}}. \quad (3.77)$$

Для горизонтально установленного сита $\alpha = 0$, $\operatorname{tg} \alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$, $\sin 2\alpha = 0$, поэтому выражение (3.77) примет вид:

$$\omega = (d_{эк} - r_3) \sqrt{\frac{g}{2r_3}}. \quad (3.78)$$

Следовательно, мелкие частицы дисперсионной среды будут проходить через отверстия сита, если скорость их движения

$$\omega_c \leq \omega. \quad (3.79)$$

При грохочении на частицу действуют силы:

- сила тяжести G ;
- составляющая силы

$$S = G \sin \alpha ; \quad (3.80)$$

- сила трения

$$T = N \phi = \phi G \cos \alpha ; \quad (3.81)$$

- сила инерции

$$P = ma = \frac{Ga}{g} , \quad (3.82)$$

где m – масса частицы, кг; a – ускорение частицы, м/с².

Для того, чтобы частицы на сите двигались именно сквозь отверстия вниз, а не влево вниз или вправо вверх по поверхности сита (рис. 3.14), необходимо, чтобы частота вращения эксцентрика лежала в пределах:

$$30 \sqrt{\frac{\phi \cos \alpha - \sin \alpha}{e \cos \phi}} < n < 30 \sqrt{\frac{\phi \cos \alpha + \sin \alpha}{e \cos \phi}} . \quad (3.83)$$

Скорость грохочения, т.е. скорость движения мелких частиц дисперсионной среды вниз через отверстия сита под действием силы тяжести G определяется аналогично по формуле (3.10).

Эффективность грохочения

$$\eta = \frac{10\,000c}{Q(100 - \bar{x}_n)} = \frac{10\,000(\bar{x}_{\text{шп}} - \bar{x}_n)}{x_{\text{шп}}(100 - \bar{x}_n)} , \% , \quad (3.84)$$

где C – масса просева, кг; Q – масса исходной неоднородной системы, кг; \bar{x}_n – содержание крупных частиц дисперсной фазы (размер которых больше размера отверстий сита) в исходной неоднородной системе, % (мас.); $\bar{x}_{\text{шп}}$ – содержание крупных частиц дисперсной фазы (размер которых больше размера отверстий сита) в отсеве (шламе), % (мас.) [1, с. 704–705].

Область применения процесса грохочения. Процесс грохочения применяется для очистки грунтов, руд, порошков и других систем с твёрдой дисперсионной средой от примесей частиц определённого размера (крупного или мелкого); для сортировки твёрдых кусковых отходов по размерам.

Аппараты реализации процесса грохочения: грохоты неподвижные колосниковые, валковые, барабанные вращающиеся, дуговые, ударные, плоские, качающиеся, полувибрационные (гирационные), вибрационные с прямолинейными вибрациями (резонансные, самобалансные, с самоинхронизирующимся вибратором) и с круговыми или эллиптическими вибрациями (инерционные с дебалансным вибратором, самоцентрирующиеся, электровибрационные), сита, бураты.

3.8. ПЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Определение. Пенная фильтрация (барботажно-пенное пылеулавливание, мокрая очистка газов, барботажная промывка газов, пенная промывка газов) – процесс разделения неоднородных систем с газовой дисперсионной средой при их движении через различного вида жидкие фильтровальные перегородки (слой жидкости, слой пены, пенно-жидкостный слой) под действием разности давлений до и после перегородки, создаваемой насосами; при этом перегородка задерживает твёрдые частицы или капли дисперсной фазы и пропускает газовую дисперсионную среду.

Сущность процесса. Процесс пенной фильтрации (ПФ) загрязнённого воздуха, проводимый в барботажно-пенном пылеуловителе, представлен на рис. 3.15 (А – фильтрующая перегородка; Б – загрязнённый воздух; В – очищенный воздух; Г – опорная решётка (тарелка); Д – избыток пены; Е – шламоприёмник).

Неоднородную систему (загрязнённый воздух) подают в пылеуловитель; в этот же пылеуловитель на опорное устройство (решётку, тарелку и т.д.) подают фильтрующую жидкость (рис. 3.15, а). Загрязнённый воз-

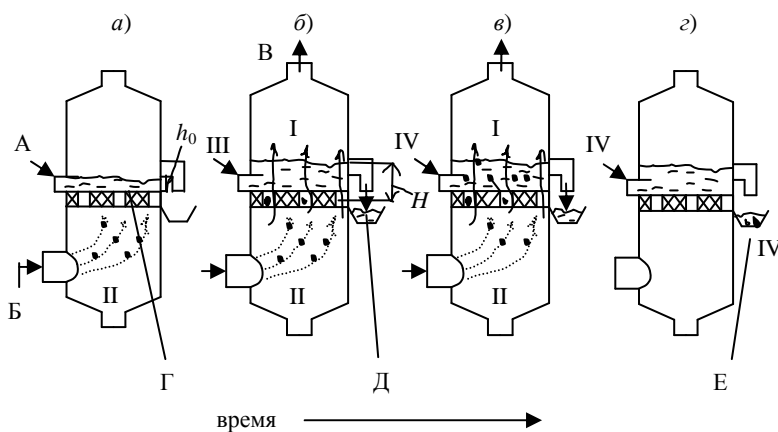


Рис. 3.15

дух проходит через отверстия опорного устройства и барботирует (проходит в виде пузырьков) сквозь слой жидкости и сквозь слой пены, образовавшейся при взаимодействии дисперсионной среды (воздуха) и фильтрующей жидкости. При этом твёрдые частицы примесей ударяются о нижнюю поверхность жидкости (рис. 3.15, а), а затем, двигаясь под действием сил инерции и разности давлений, проникают в пенный слой и задерживаются там (рис. 3.15, в). При насыщении пенного слоя определённым количеством твёрдых частиц дисперсной фазы образовавшуюся смесь пены и твёрдых частиц сливают в шламоприёмник (рис. 3.15, г). Условно очищенный воздух выходит из аппарата через верхний штуцер.

Механизм и кинетика процесса. Выделяют следующие стадии процесса пенной фильтрации:

1. Стадия инерционного осаждения частиц или капель дисперсной фазы в подрешёточном пространстве.
2. Стадия удара частиц или капель дисперсной фазы о фильтрующий пенно-жидкостный слой.
3. Стадия инерционно-турбулентного осаждения или всплывания частиц (капель) дисперсной фазы на поверхности пенно-жидкостного слоя; при этом частицы или капли примесей первоначально находятся в фильтрующем слое внутри пузырьков газовой дисперсионной среды, а затем переходит непосредственно в жидкую среду фильтрующего слоя.

Преобладающим в процессе ПФ является механизм удара (на стадии удара): эффективность этого механизма намного больше эффективности других механизмов (на I и III стадиях) [4, с. 51].

В процессе ПФ на частицы или капли примесей действуют различные силы, величина и направление которых зависят от степени смачивания этих частиц (капель). Смачивающиеся частицы (с гидрофильной поверхностью) втягиваются в пенно-жидкостный фильтрующий слой силой поверхностного натяжения (адгезия), действующей на границе жидкости и воздуха (на поверхности газовых пузырей). При этом, если плотность частицы (капли) примеси больше плотности фильтрующей жидкости, то кроме силы поверхностного натяжения (адгезии) на данную частицу (каплю) действует также и сила тяжести, поэтому частица тонет, а если плотность частицы (капли) примеси меньше плотности фильтрующей жидкости, то частица (капля) всплывает на поверхность жидкости или пены под действием выталкивающей силы. Несмачивающиеся частицы (капли) примесей (с гидрофобной поверхностью) поддерживаются на поверхности фильтрующей жидкости силой поверхностного натяжения (адгезия). Твёрдые частицы (капли) примесей размером менее 10 мкм независимо от величины их плотности условно относятся к несмачиваемым частицам. Способность частиц примесей к смачиванию уменьшается с увеличением их дисперсности (разброса размеров) [14, с. 8–9].

Эффективность процесса пенной фильтрации зависит от величины межфазной поверхности: чем больше поверхность, тем больше эффективность.

Для дырчатых тарелок с переливом удельную объёмную межфазную поверхность вычисляют по формуле:

$$a = \frac{1,62\omega_{\phi}^{0,4} \varepsilon_r^{0,3} \mu_{\phi c}^{0,25} \rho_{\phi c}^{0,6}}{\sigma_{\phi c}^{0,6}}, \text{ м}^2/\text{м}^3; \quad (3.85)$$

для провальных тарелок

$$a = \frac{5,58\omega_{\phi}^{0,15} \mu_{\phi c}^{0,25} \rho_{\phi c}^{0,35}}{h_0^{0,25} \sigma_{\phi c}^{0,6}}, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (3.86)$$

где ω_{ϕ} – скорость пенной фильтрации (скорость прохождения газовой дисперсионной среды через фильтрующий пенно-жидкостный слой), м/с, $\omega_{\phi} = 0,5 \dots 3,5$ м/с (обычно $\omega_{\phi} = 2$ м/с); ε_r – газосодержание (порозность) фильтрующего пенно-жидкостного слоя; $\mu_{\phi c}$ – коэффициент динамической вязкости жидкости в фильтрующем слое; Па·с; $\rho_{\phi c}$ – плотность жидкости в фильтрующем слое, кг/м³; $\sigma_{\phi c}$ – коэффициент поверхностного натяжения фильтрующей жидкости, Н/м² [4, с. 51–52].

Высота слоя пены

$$H = \frac{4,3510^{-5} h_0^{0,6} \omega_{\phi}^{0,5} \rho_{\phi c}^{0,25}}{\sigma_{\phi c}^{1,3} \mu_{\phi c}^{0,25}} = K_{\Pi} - 1,95\omega_{\phi} + 0,09, \text{ м}. \quad (3.87)$$

Коэффициент скорости пылеулавливания

$$K_{\Pi} = \frac{2\tau\omega_{\phi}}{2-\tau}, \text{ м/с}, \quad (3.88)$$

где τ – эффективность очистки пенной фильтрацией.

Высота исходного слоя фильтрующей жидкости

$$h_0 = 1,43H^{1,67} \omega_{\phi}^{-0,83}, \text{ м}. \quad (3.89)$$

Высота сливного порога (высота слоя пены, которая обеспечивает необходимую степень очистки газа от примесей η):

$$h_{\Pi} = 2,5h_0 - 0,0176\sqrt[3]{i^2}, \text{ м}. \quad (3.90)$$

Интенсивность потока жидкости на сливе с решётки

$$i = \frac{L_{\text{сл}}}{b_c}, \text{ кг/м}\cdot\text{с}, \quad (3.91)$$

где b_c – ширина сливного отверстия, м.

Расход жидкости, стекающей через сливной порог (слив избытка пены и жидкости):

$$L_{\text{сл}} = L - L_y, \text{ кг/с}, \quad (3.92)$$

где L – расход фильтрующей жидкости, поступающей в аппарат, кг/с.

Расход фильтрующей жидкости, стекающей через отверстия в решётке (утечка):

$$L_y = \frac{G_n K_p}{\bar{x}_y}, \text{ кг/с}, \quad (3.93)$$

где K_p – коэффициент распределения частиц примесей между утечкой и сливной жидкостью, $K_p = 0,6 \dots 0,8$; \bar{x}_y – массовая концентрация частиц примесей в утечке, кг п./кг ф.с.; $\bar{x}_y = 0,05 \dots 0,2$ кг п./кг ф.с.

Расход уловленных частиц примесей

$$G_{\text{п}} = Q_{\text{н}} \bar{c}_{\text{н}} \tau, \text{ кг/с}, \quad (3.94)$$

где $\bar{c}_{\text{н}}$ – начальная концентрация примесей в газе, кг/м³.

Расход загрязнённого газа

$$Q_{\text{н}} = S \omega_{\text{ф}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.95)$$

где S – площадь сечения аппарата, м² [11, с. 30 – 33].

Полное гидравлическое сопротивление аппарата пенной фильтрации

$$\Delta P = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{вых}} + \Delta P_{\text{т}} + \Delta P_{\text{кап}}, \text{ Па}, \quad (3.96)$$

где $\Delta P_{\text{вх}}$ и $\Delta P_{\text{вых}}$ – гидравлические потери давления при входе и выходе из аппарата, Па (обычно $\Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{вых}} = 50 \dots 100$ Па).

Полное сопротивление тарелки

$$\Delta P_{\text{т}} = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_0 + \Delta P_{\text{ст}}, \text{ Па}. \quad (3.97)$$

Сопротивление сухой тарелки

$$\Delta P_{\text{с}} = \frac{\varepsilon \omega_{\text{ф}}^2 \rho_{\text{с}}}{2}, \text{ Па}. \quad (3.98)$$

Сопротивление, обусловленное силами поверхностного натяжения:

$$\Delta P_0 = \frac{4\sigma_{\text{фс}}}{d_3}, \text{ Па.} \quad (3.99)$$

Сопротивление пенно-жидкостного фильтрующего слоя [4, с. 52]

$$\Delta P_{\text{ст}} = h_0 \rho_{\text{фс}} g, \text{ Па.} \quad (3.100)$$

Область применения процесса пенной фильтрации. Процесс пенной фильтрации применяют для очистки загрязнённых газов от частиц пыли и капель примесей размерами 0,3...10 мкм; для очистки от пыли и капель примесей горючих и взрывоопасных газов.

Аппараты реализации процесса пенной фильтрации: мокрые пылеуловители, барботажно-пенные (барботажные, пенные) пылеуловители: тарельчатые, с провальной решёткой (тарелкой), с переливной (дырчатой) решёткой (тарелкой); пенные газоочистители ЛТИ (однополочные, двухполочные), пенные аппараты со стабилизатором пенного слоя, устройства для мокрой очистки газа от пыли.

3.9. МЕМБРАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Определение. Мембранная фильтрация (обратный осмос) – процесс молекулярно-ионного разделения неоднородных систем (эмульсий, резе коллоидных растворов) и однородных систем (растворов жидкость + жидкость, резе смесей газ + газ) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (полупроницаемые пористые с диаметром пор 0,1...8 мкм или сплошные мембраны) под действием разности рабочего давления над системой и осмотического давления у поверхности фильтровальной перегородки; при этом перегородка пропускает растворитель и задерживает растворённое вещество.

Сущность процесса мембранной фильтрации. Пример процесса мембранной фильтрации раствора жидкость + жидкость представлена на рис. 3.16 (А – полупроницаемая мембрана; Б – раствор).

Однородная система (раствор жидкость + жидкость) подаётся в установку обратного осмоса (рис. 3.16, а). К однородной системе прикладывается давление P , превышающее осмотическое давление, в результате чего молекулы и ионы одного из компонентов раствора (растворителя) начинают переходить через полупроницаемую мембрану во второе отделение аппарата, а молекулы и ионы других компонентов раствора (растворённых веществ) задерживаются мембраной в первом отделении (рис. 3.16, б). В результате полной реализации процесса однородная система (раствор) разделяется на пермеат (условно чистый растворитель в области IV) (рис. 3.16, в). Загрязняющим компонентом в однородной системе может быть как пермеат, так и ретант.

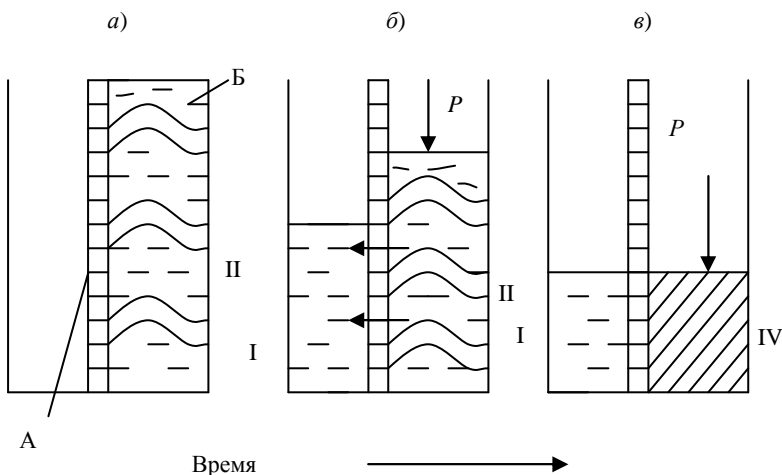


Рис. 3.16

Иногда пермеат и ретант называют, соответственно, фильтратом и концентратом.

Механизм и кинетика процесса мембранной фильтрации. В основе процесса мембранной фильтрации лежит явление осмоса – самопроизвольного перехода молекул и ионов растворителя через полупроницаемую мембрану в раствор. В зависимости от соотношения рабочего давления над раствором P и осмотического давления у поверхности мембраны Π изменяется направление перехода молекул и ионов растворителя (рис. 3.17).

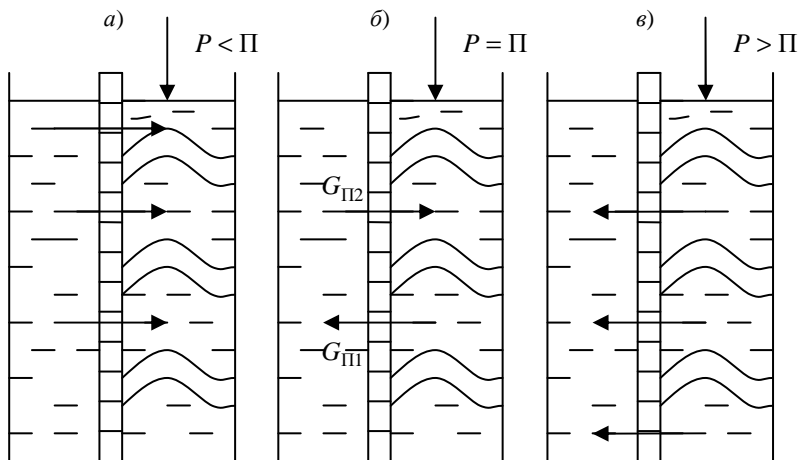


Рис. 3.17

Осмотическое давление – это давление у поверхности мембраны, при котором через мембрану из раствора переходит такое же количество растворителя $G_{п1}$, какое количество растворителя переходит обратно в раствор $G_{п2}$ (рис. 3.17, б), иначе говоря, наступает равновесие:

$$G_{п1} = G_{п2}. \quad (3.101)$$

Если рабочее давление P меньше осмотического Π , то растворитель самостоятельно переходит в раствор (рис. 3.17, а), иначе говоря, происходит осмос. Если рабочее давление P больше осмотического Π , то растворитель переходит через мембрану из раствора (рис. 3.17, в), т.е. происходит обратный осмос. При этом полупроницаемая мембрана, пропуская молекулы и ионы растворителя, задерживает молекулы и ионы растворённых веществ.

Движущей силой процесса мембранной фильтрации (в случае обратного осмоса) является разность рабочего давления P и осмотического давления раствора у поверхности мембраны Π_3 :

$$\Delta P = P - \Pi_3. \quad (3.102)$$

В реальных условиях мембраны не обладают идеальной полупроницаемостью, и наблюдается переход через мембрану не только молекул и ионов чистого растворителя, но и некоторого количества молекул и ионов растворённых веществ.

Такое явление изменяет движущую силу процесса (в случае обратного осмоса):

$$\Delta P = P - (\Pi_3 - \Pi_2) = P - \Delta \Pi, \quad (3.103)$$

где Π_2 – осмотическое давление пермеата у поверхности мембраны [7, с. 428–429].

Механизм переноса молекул и ионов различных веществ через полупроницаемые мембраны объясняется следующими теориями.

1. Теория просеивания предполагает, что в полупроницаемой мембране существуют поры, размеры которых достаточны для того, чтобы пропускать молекулы и ионы растворителя, но слишком малы для того, чтобы пропускать молекулы и ионы растворённых веществ.

2. Теория молекулярной диффузии основана на неодинаковой растворимости и на различии коэффициентов диффузии разделяемых компонентов загрязнённой системы в объёме и порах мембраны.

3. Теория капиллярно-фильтрационной проницаемости основана на различии физико-химических свойств граничного слоя дисперсионной среды или растворителя на поверхности мембраны и частиц дисперсной фазы или раствора в объёме. На поверхности внутри пор (капилляров) мем-

браны, погружённой в раствор, возникает граничный слой связанного растворителя. Этот слой образует плёнку определённой толщины. Связанный в граничном слое растворитель теряет свою растворяющую способность по отношению к растворённым в объёме компонентам. Поэтому под действием перепада давления этот растворитель из граничного слоя перетекает по капиллярам через мембрану, если размер капилляров в мембране меньше размеров ионов и молекул растворённых веществ (меньше 20 \AA), как это показано на рис. 3.18, *a* (А – растворённые вещества; Б – растворитель) [7, с. 432–433]. Но реальные мембраны имеют поры различного размера, в том числе и крупные (больше 20 \AA), поэтому часть молекул и ионов растворённых веществ может проникать через эти крупные капилляры (рис. 3.18, *б*). Следовательно, селективность (задерживающая способность) мембраны тем выше, чем больше толщина граничного слоя и чем больше размеры молекул и ионов растворённых веществ.

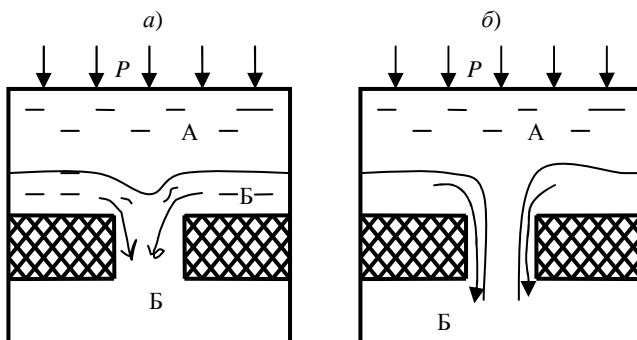


Рис. 3.18

Процессы мембранной фильтрации характеризуются двумя основными параметрами: проницаемостью и селективностью мембраны.

Проницаемость (удельная производительность) мембраны

$$\omega_c = c_c A_c \frac{P - (\Pi_3 - \Pi_2)}{\mu_c}, \quad (3.104)$$

где c_c – для свободного растворителя (дисперсной среды) в разделяемом загрязнённом растворе; μ_c – вязкость пермеата, Па·с.

Константа проницаемости мембраны по растворителю

$$A_c = \frac{\omega_{co}}{P}, \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}), \quad (3.105)$$

где ω_{co} – собственная проницаемость мембраны определённой конструкции, кг/(м²·с).

Рабочая поверхность мембраны (поверхность фильтрации)

$$S = \frac{G_c}{\omega_c}, \text{ м}^2. \quad (3.106)$$

Расход пермеата

$$G_c = G_n (1 - K^{-\frac{1}{4}}), \text{ кг/с}, \quad (3.107)$$

где G_n – расход исходного загрязнённого раствора, кг/с.

Степень концентрирования

$$K = \frac{\bar{x}_{1к}}{\bar{x}_{1н}}, \quad (3.108)$$

где $\bar{x}_{1н}$ – начальная концентрация растворённых загрязнений в исходном растворе, кг п. / кг сл. ; $\bar{x}_{1к}$ – конечная концентрация растворённых загрязнений в ретанте, кг п. / кг сл.

Истинная селективность мембраны

$$\Phi_n = \frac{\bar{x}_3 - \bar{x}_2}{\bar{x}_3} = 1 - 10^{a-b \lg \frac{\Delta H_{cr}}{Z_M}}, \quad (3.109)$$

где \bar{x}_3 – концентрация растворённых загрязнений у поверхности мембраны со стороны очищаемого раствора, кг. п. / кг. сл.; a, b – константы для определённой мембраны, учитывающие давление и температуру ; ΔH_{cr} – среднее геометрическое значение теплот гидратации ионов, образующих растворённое вещество, Дж / моль; Z_M – валентность иона с наименьшей теплотой гидратации.

Средняя концентрация растворённого вещества в пермеате

$$x_2 = \bar{x}_{1н} \frac{1 - K^{\frac{1-\Phi}{\Phi}}}{1 - K^{-\frac{1}{\Phi}}}, \text{ кг п. / кг сл.} \quad (3.110)$$

Наблюдаемая (реальная) селективность мембраны

$$\Phi = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\bar{x}_1} = \frac{1}{1 + 10^{\frac{\omega_{\Phi} + \lg \frac{1-\Phi_n}{\Phi_n}}{2,3\beta}}}. \quad (3.111)$$

Средняя концентрация растворённых веществ в исходном растворе

$$x_1 = \frac{\bar{x}_{1H} + \bar{x}_{1K}}{2}, \text{ кг п. / кг сл.} \quad (3.112)$$

Скорость движения раствора по направлению к мембране, вызванного отводом пермеата из аппарата:

$$\omega_{\Phi} = \frac{\bar{\omega}_c}{\rho_{сл}}, \text{ м/с,} \quad (3.113)$$

где $\rho_{сл}$ – плотность исходного раствора, кг/м³.

Средняя удельная производительность мембраны

$$\bar{\omega}_c = \frac{\omega_{сн} + \omega_{ск}}{2}, \text{ кг/м}^3, \quad (3.114)$$

где $\rho_{сл}$ – удельная производительность мембраны на входе раствора в аппарат, кг/(м²·с); $\omega_{ск}$ – удельная производительность мембраны на выходе раствора из аппарата, кг/(м²·с).

Коэффициент массоотдачи

$$\beta = \frac{Nu D}{d'_{ЭК}}, \quad (3.115)$$

где D – коэффициент диффузии вещества через мембраны, м²/с; $d'_{ЭК}$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала в аппарате, м.

Диффузионный критерий Нуссельта

$$Nu' = 1,67 Re^{0,34} (Pr')^{0,33} \left(\frac{d'_{ЭК}}{l'_k} \right)^{0,3}, \quad (3.116)$$

где l'_k – эквивалентная длина (высота) кольцевого канала аппарата, по которому движется очищаемый раствор, м.

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\bar{\omega}' d'_{ЭК} \rho_{сл}}{\mu_{сл}}, \quad (3.117)$$

где $\mu_{сл}$ – вязкость исходного загрязнённого раствора, Па·с.

Средняя линейная скорость движения очищаемого раствора в кольцевых каналах

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_H + \omega_K}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{G_H}{\rho_{сл,К}^H S_c n_H} + \frac{G_K}{\rho_{сл,К}^K S_c n_K} \right), \quad (3.118)$$

где ω_n , ω_k – начальная и конечная скорости движения раствора и ретанта в кольцевых каналах аппарата, соответственно, м/с ; G_k – расход ретанта, кг/с ; $\rho_{сл}^n$, $\rho_{сл}^k$ – начальная плотность раствора и конечная плотность ретанта, соответственно, кг/м³; S_c – сечение аппарата, по которому проходит очищаемый раствор, м²; n_n , n_k – число параллельно работающих аппаратов в первой и последней секциях установки, соответственно.

Гидравлическое сопротивление в аппаратах мембранной фильтрации (развиваемое насосом давление)

$$\Delta P_n = \Delta P + \Delta P_a + \Delta P_d + \Delta P_r + \Delta P_r. \quad (3.119)$$

Гидравлическое сопротивление движению потока раствора в аппарате:

$$\Delta P_a = \Delta P_{пк} \varepsilon_1, \quad (3.120)$$

где ε_1 – коэффициент, зависящий от вида сепарирующей сетки, $\varepsilon_1 = 5 \dots 10$.

Гидравлическое сопротивление полых кольцевых каналов между мембранами

$$\Delta P_{пк} = \lambda \frac{l'_k}{d'_{эк}} \frac{\rho_{сл} (\overline{\omega})^2}{2}. \quad (3.121)$$

Гидравлическое сопротивление движению потока пермеата в дренажах

$$\Delta P_d = \Delta P_{пк} \varepsilon_2, \quad (3.122)$$

где ε_2 – коэффициент, зависящий от вида дренажного материала, $\varepsilon_2 = 100 \dots 200$.

Потери давления на трение и местные сопротивления в трубопроводах и арматуре

$$\Delta P_r \approx (0,1 \dots 0,2) \Delta P_a. \quad (3.123)$$

Потери давления при подъёме загрязнённого раствора на определённую геометрическую высоту:

$$\Delta P_r = \rho_{сл} g h_r, \quad (3.124)$$

где h_r – геометрическая высота (расстояние) между входом раствора в аппарат и выходом ретанта из аппарата, м [11, с. 319 – 350].

Виды мембранной фильтрации:

- гиперфильтрация (обратный осмос) – выделение низкомолекулярных растворённых веществ из растворов под давлением через полупроницаемые мембраны;
- ультрафильтрация – выделение высокомолекулярных растворённых веществ из сточной воды;

- испарение через мембрану – испарение растворителя (чистой воды) через мембрану в вакуум или поток инертного газа;
- диализ – самопроизвольное ионное разделение однородных и неоднородных систем через полупроницаемую мембрану;
- диффузионное разделение газов – разделение газов под действием разности их концентраций по обе стороны мембраны [7, с. 429–430];
- микрофильтрация – выделение из загрязнённых систем частиц загрязнений размерами 0,02...10 мкм.

Область применения процесса мембранной фильтрации. Процесс мембранной фильтрации применяют для очистки сточных вод от минеральных примесей (катионов железа (II, III), калия, кальция, магния, марганца (II), натрия, анионов бикарбонатов, боратов, нитратов, силикатов, сульфатов, фосфатов, фтора, хлора), сбрасываемых предприятиями химической, нефтехимической, целлюлозно-бумажной и других промышленности; очистки сточных вод гальванических производств: $K_2Cr_2O_7$, $CuSO_4$, $ZnSO_4$, $NiCl_2$, $NiSO$.

Для очистки сточных вод в производстве удобрений, глицерина и спиртов от щелочей, аммонийных, фосфатных и нитратных солей; для третичной очистки бытовых сточных вод от соединений фосфора, азота, аммиака, нитратов, фосфатов, сульфатов, щелочноземельных элементов; для очистки сточных вод от радиоактивных элементов и снижения собственно уровня радиоактивности воды; для очистки сточных вод в производствах фотоэмульсий от серебра; для очистки сточных вод от хлорбензола в производствах полиамина и изоцианатов; для очистки сточных вод от ПАВ (сульфонола, алкилсульфатов, тридецил-, тетрадецил-, пентадецил- и гексадецилсульфатов натрия, ОП-7); для очистки сточных вод от ацилазы, органических и неорганических примесей и снижения цветности, мутности и химической потребности в кислороде в производствах сульфитной и сульфатной целлюлозы и на других предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности; для очистки сточных вод от бактерий и вирусов; для очистки воздуха от азота, для очистки продувочных газов на предприятиях синтеза аммиака и нефтепродуктов от водорода; для очистки природных газов от гелия, диоксида углерода и сероводорода; для обогащения воздуха кислородом; для поддержания состава газовой среды, обеспечивающего длительную сохранность фруктов и овощей.

Аппараты реализации процесса мембранной фильтрации: аппараты типа «фильтр-пресс» с плоскокамерными фильтрующими элементами; аппараты с трубчатыми фильтрующими элементами; аппараты с фильтрующими элементами рулонного или спирального типа; аппараты с фильтрующими элементами из полых волокон; установки обратного осмоса, установки концентрирования, установки ультрафильтрации.

3.10. ЭЛЕКТРОМЕМБРАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Определение. Электромембранная фильтрация (электродиализ, электроосмос, электрохимический метод) – процесс ионного разделения однородных систем (растворов Ж–Ж) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (катионитовые и анионитовые диафрагмы – мембраны); при этом ионы определённого знака двигаются к катоду или аноду под действием постоянного электрического тока, проходя через перегородку определённого знака, но задерживаясь этой же перегородкой на обратном пути.

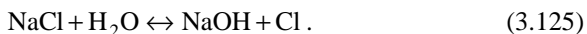
Сущность процесса электромембранной фильтрации. Пример процесса электромембранной фильтрации NaCl из сточной воды через неактивные диафрагмы показан на рис. 3.19 (А – катод; Б – чистая вода; В – раствор; Г – анод; Д – пористые диафрагмы).

В центральную камеру аппарата подаётся сточная вода (рис. 3.19, а). При включении тока отрицательно заряженные ионы (анионы) загрязнений Cl⁻ начинают двигаться к аноду, проходя сквозь диафрагму 2. На аноде выделяются кислород и водород и образуется кислота HCl. Одновременно положительно заряженные ионы (катионы) загрязнений (натрия) переносятся к катоду, на котором выделяются водород и гидроксильная группа OH⁻ и образуется щёлочь NaOH (рис. 3.19, б). С течением времени большая часть анионов и катионов загрязнений уходит из центральной части аппарата, где остаётся очищенная вода (рис. 3.19, в). Обратный переход анионов и катионов из боковых камер в центральную затруднён диафрагмами, но при этом ионы H⁺ и OH⁻ могут свободно проникать из боковых камер в центральную (рис. 3.19, б).

Механизм и кинетика процесса электромембранной фильтрации. Процесс электромембранной фильтрации основан на следующих механизмах:

- 1) электрофорез – движение заряженных ионов загрязнений к электродам определённого знака под действием электрического тока;
- 2) электроосаждение – осаждение заряженных ионов загрязнений на электроде определённого знака под действием электрического тока;
- 3) электродиализ – переход заряженных ионов через пористую мембрану под действием электрического тока;
- 4) электроосмос – движение заряженных ионов в порах мембраны под действием электрического тока;
- 5) ионный обмен – диссоциация и переход ионов определённого знака в раствор с последующей их ассоциацией ионами противоположно знака [10, с. 202–203].

Реакцию ионного обмена в процессе электрической фильтрации воды от NaCl можно записать в виде:



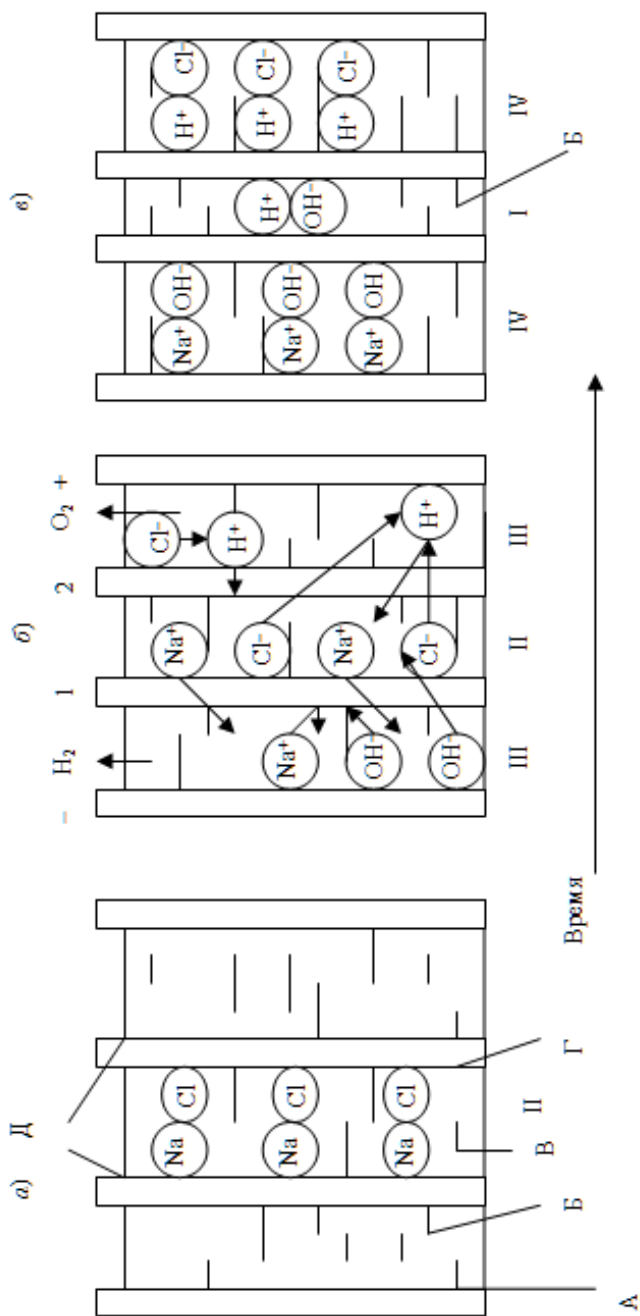


Рис. 3.19

При этом диссоциация и переход ионов в раствор происходят по реакциям:



Последующая ассоциация ионов в боковых камерах аппарата происходит по реакциям [10, с. 203]:



Остальные механизмы и кинетика процесса электромембранной фильтрации описываются, в основном, формулами, приведёнными в разделах 2.6 («Электрическое осаждение»), 3.2 («Фильтрование»), 3.10 («Электромембранная фильтрация»).

Область применения процесса электромембранной фильтрации. Процесс электромембранной фильтрации применяют для обессоливания (опреснения) природных вод, для очистки сточных вод криолитовых и других производств от соединений фтора и ионов F^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Fe^{3+} , SiO_2 , от соединений хрома (CrO_3) и натрия (Na_2SO_4 , NaOH , NaCl , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, NaNO_3), от анилина; для очистки сточных вод от радиоактивных загрязнений (радиоактивных изотопов ^{137}Cs , ^{131}I , ^{89}Sr , ^{90}Sr) и для снижения активности и минерализации радиоактивных сточных вод.

Аппараты реализации процесса электромембранной фильтрации: электродиализаторы, электродиализные аппараты, электродиализные установки прокладочные (ЭДу-50 «Родник-3» и др.) и лабиринтные (Э-400М, АЭ-25 и др.) прямоточные, циркуляционные порционные, циркуляционные непрерывного действия, с последовательной гидравлической системой, трёх- и многокамерные диализаторы, электролизёры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном учебном пособии рассматриваются физические особенности организации технологических процессов защиты окружающей среды.

Основное внимание уделяется процессам отстаивания и фильтрации. Указанные процессы наиболее часто применяются в технологиях очистки сточных вод, газовых выбросов и переработки отходов.

Главными параметрами в микромире загрязнений можно назвать силы, действующие на загрязняющие частицы. Именно такие силы вызывают движение загрязняющих частиц в различные стороны. И именно такие силы, создаваемые в аппаратах очистки, способствуют движению загрязняющих частиц в специальные бункеры для шлама, очищая таким образом воду до требуемых значений.

Поэтому в учебном пособии силы физического взаимодействия применительно к загрязняющим частицам рассматриваются достаточно полно, с использованием математического аппарата и графических иллюстраций.

Изучение таких процессов изнутри, на уровне частиц, молекул имеет большое значение в инженерно-экологической деятельности, так как позволяет специалисту понять устройство микромира загрязнений, уяснить его особенности, выявить основные физические воздействия, знание которых позволит ему в дальнейшем правильно и эффективно проектировать очистное оборудование и управлять его работой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
2. Проскураков, В.А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В.А. Проскураков, Л.И. Шмидт. – Л. : Химия, 1977. – 464 с.
3. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков ; под ред. чл.-кор. АН СССР П.Г. Романкова. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1981. – 560 с.
4. Родионов, А.И. Техника защиты окружающей среды : учебник для вузов / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1989. – 512 с.
5. Химия : справ. издание / Б. Шретер, К.-Х. Лаутеншлегер, Х. Бибрак и др. ; пер. с нем. – М. : Химия, 1989. – Пер изд. ГДР, 1986. – 648 с.
6. Халиуллин, А.К. Введение в промышленную экологию : учебное пособие / А.К. Халиуллин, Б.А. Ульянов. – Иркутск : ИПИ, 1989. – 72 с.
7. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии : учебник для вузов / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1984. – 496 с.
8. Охрана окружающей среды : учебное пособие для студентов вузов / под ред. С.В. Белова. – М. : Высш. школа, 1983. – 264 с.
9. Бертокс, П. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений / П. Бертокс, Д. Радд. – М. : Мир, 1980. – 608 с.
10. Ввозная, Н.Ф. Химия воды и микробиология : учебное пособие для вузов / Н.Ф. Ввозная. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1979. – 340 с.
11. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др. ; под ред. Ю.И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.
12. Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – М. : Химия, 1977. – 368 с.

13. Очистка сточных вод (примеры расчётов) : учебное пособие для вузов по спец. «Водоснабжение и канализация» / М.П. Лапицкая, Л.И. Зуева, Н.М. Баласскул, Л.В. Кулешова. – Мн. : Высш. школа, 1983. – 255 с.

14. Жидко, Е.А. Теоретические основы проектирования и конструкции жидкостных пылеулавливающих устройств / Е.А. Жидко, В.В. Колотушкин, Э.В. Соловьева // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 2. – С. 8 – 12.

15. Очистка производственных сточных вод : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по спец. «Водоснабжение и канализация» и «Очистка природных и сточных вод» / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков. Ю.В. Воронов. – М. : Стройиздат, 1979. – 320 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ	4
1.1. Классификация загрязнений	4
1.2. Классификация процессов защиты окружающей среды	6
2. СЕДИМЕНТАЦИЯ	9
2.1. Общие основы седиментации	9
2.2. Отстаивание (гравитационное осаждение)	14
2.3. Инерционное осаждение	18
2.4. Всплывание	22
2.5. Псевдооживление	24
2.6. Электрическое осаждение	29
2.7. Магнитное осаждение	36
3. ФИЛЬТРАЦИЯ	40
3.1. Общие основы фильтрации	40
3.2. Фильтрование	45
3.3. Центробежное фильтрование	50
3.4. Промывка (продувка)	53
3.5. Зернистое фильтрование	59
3.6. Процеживание	63
3.7. Грохочение	65
3.8. Пенная фильтрация	69
3.9. Мембранная фильтрация	73
3.10. Электромембранная фильтрация	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	85

Учебное издание

КОЗАЧЕК Артемий Владимирович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Часть I. СЕДИМЕНТАЦИЯ И ФИЛЬТРАЦИЯ

Учебное пособие

Редактор Т.М. Г л и н к и н а

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Р ы ж к о в а

Подписано в печать 07.03.2013

Формат 60 × 84/16. 5,11 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 96

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14