

В. Б. Кольцов, О. В. Кондратьева

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ Часть 2

**УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА**

Под общей редакцией **В. И. Каракеяна**

2-е издание, переработанное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника и практикума для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям

Рекомендовано УМО по образованию в области природообустройства и водопользования в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Природообустройство и водопользование»

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 502(075.8)
ББК 20.1я73
К21

Ответственный редактор:

Каракеян Валерий Иванович — профессор, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной экологии факультета интеллектуальных технических систем Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Авторы:

Кольцов Владимир Борисович — доктор химических наук, профессор кафедры промышленной экологии факультета интеллектуальных технических систем Национального исследовательского университета «МИЭТ»;

Кондратьева Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий в строительстве факультета гидротехнического, агропромышленного и гражданского строительства Российского государственного аграрного университета — МСХА имени К. А. Тимирязева.

Рецензенты:

Шубов Л. Я. — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Научно-исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов»;

Роцин М. В. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и физической химии, декан факультета интеллектуальных технических систем Национального исследовательского университета «МИЭТ».

Кольцов, В. Б.

К21

Процессы и аппараты защиты окружающей среды. В 2 ч. Часть 2 : учебник и практикум для академического бакалавриата / В. Б. Кольцов, О. В. Кондратьева ; под общ. ред. В. И. Каракеяна. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 311 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс).

ISBN 978-5-534-06056-0 (ч. 2)

ISBN 978-5-534-06057-7

Учебник состоит из двух частей. В первой части рассматриваются проблемы защиты экологии и классификация процессов окружающей среды, раскрываются методы сепарации газов и аппараты сухой, фильтрующей, электрической и мокрой очистки газового потока. Также в данной части представлены сорбционные и каталитические методы очистки. В работе даются основы защиты гидросферы. Во второй части подробно рассмотрены механические, физико-химические, химические, биохимические и термические методы очистки сточных вод, а также вопросы переработки и утилизации твердых отходов. В каждой главе даны контрольные вопросы и задачи для самостоятельного решения.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов, обучающихся по программе бакалавриата по направлению «Техносферная безопасность»; может быть использован работниками природоохранных служб промышленных предприятий.

УДК 502(075.8)

ББК 20.1я73



Delphi Law Company

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-06056-0 (ч. 2)

ISBN 978-5-534-06057-7

© Кольцов В. Б., Кондратьева О. В., 2014
© Кольцов В. Б., Кондратьева О. В., 2018,
с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2019

Оглавление

Глава 11. Механические методы очистки сточных вод.

Очистка сточных вод от взвешенных частиц	7
11.1. Процеживание, основные аппараты для процеживания и их конструкции.....	7
11.2. Усреднители.....	9
11.3. Процессы отстаивания и применяемое оборудование	10
11.3.1. Песколовки.....	13
11.3.2. Отстойники.....	14
11.3.3. Осветлители.....	16
11.3.4. Удаление всплывающих примесей	17
11.4. Центробежные методы очистки.....	19
11.5. Очистка сточных вод фильтрованием	25
11.5.1. Физические основы фильтрации с образованием осадка. Гидродинамика течения жидкости через пористые и зернистые слои.....	27
11.5.2. Определение оптимальных условий работы фильтров. Экономически выгодный цикл фильтрации.....	31
11.5.3. Фильтровальные перегородки	32
11.6. Классификация и конструкции фильтров	32
11.6.1. Вакуумные фильтры	33
11.6.2. Магнитные фильтры.....	39
11.6.3. Фильтрация эмульгированных веществ.....	40
11.7. Физические основы разделения суспензий в фильтрующих центрифугах	40
11.8. Выбор и расчет фильтров.....	42
11.9. Червячные отжимные аппараты	44
11.10. Комплексная очистка сточных вод от твердых частиц	45
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>46</i>
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	<i>46</i>

Глава 12. Физико-химические методы очистки сточных вод

12.1. Агрегирование частиц малого размера.....	48
12.1.1. Коагуляция.....	48
12.1.2. Флоккуляция.....	51
12.2. Очистка сточных вод флотацией.....	54
12.3. Очистка сточных вод методом адсорбции	62

12.4. Адсорбционная очистка сточных вод ионным обменом	69
12.5. Очистка сточной воды ультрафильтрацией и обратным осмосом	72
12.6. Расчет установки обратного осмоса	76
12.7. Очистка сточных вод методом экстракции	77
12.8. Очистка воды от растворенных газовых примесей	85
12.9. Электрохимические методы очистки воды	86
12.9.1. Классификация методов электрохимической очистки сточных вод	87
12.9.2. Анодное окисление и катодное восстановление	89
12.9.3. Электрокоагуляция	92
12.9.4. Электрофлотация	94
12.9.5. Расчет установок для электрофлотации и электрофлокоагуляции	95
12.9.6. Электродиализ	97
12.9.7. Гальванокоагуляционная очистка сточных вод	99
<i>Контрольные вопросы</i>	99
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	100
Глава 13. Химические методы очистки сточных вод	101
13.1. Нейтрализация	101
13.1.1. Нейтрализация смешением	102
13.1.2. Реагентная нейтрализация	103
13.1.3. Нейтрализация кислых сточных вод путем их фильтрования через нейтрализующие материалы	104
13.1.4. Нейтрализация щелочных сточных вод кислыми газами	104
13.2. Окислительный метод очистки сточных вод	105
13.2.1. Окисление реагентами, содержащими активный хлор	106
13.2.2. Окисление пероксидом водорода	108
13.2.3. Окисление кислородом воздуха	108
13.2.4. Озонирование	109
13.2.5. Окисление перманганатом калия	109
13.2.6. Радиационное окисление	110
13.3. Очистка восстановлением	110
13.4. Реагентные методы выделения загрязняющих веществ в виде малорастворимых и нерастворимых соединений	112
<i>Контрольные вопросы</i>	116
Глава 14. Биохимические методы очистки сточных вод	117
14.1. Основные показатели	117
14.2. Закономерности распада органических веществ	118

14.3. Очистка сточных вод в природных условиях.....	126
14.3.1. Поля орошения.....	126
14.3.2. Биологические пруды	127
14.4. Очистка в биофильтрах.....	128
14.5. Очистка в аэротенках	129
14.6. Окситенки.....	133
14.7. Анаэробные методы биохимической очистки	135
14.8. Технологические показатели работы биологических очистных сооружений (БОС).....	139
14.9. Обработка осадков в процессе очистки сточных вод.....	140
<i>Контрольные вопросы</i>	143
<i>Задачи для самостоятельного решения</i>	144
Глава 15. Термические методы очистки сточных вод	145
15.1. Концентрирование сточных вод.....	145
15.2. Испарительные установки.....	146
15.3. Расчет выпарного аппарата	154
15.4. Другие методы обезвреживания вредных веществ из концентрированных растворов.....	158
<i>Контрольные вопросы</i>	161
Глава 16. Процессы и аппараты защиты литосферы (переработка твердых отходов).....	162
16.1. Классификация твердых отходов	162
16.1.1. Федеральный классификационный каталог отходов.....	168
16.1.2. Международная классификация твердых отходов.....	173
16.2. Административное и правовое регулирование обращения с твердыми отходами	178
<i>Контрольные вопросы</i>	180
Глава 17. Полигонное захоронение отходов. Устройство полигонов для складирования ТБО	182
17.1. Депонирование ТБО на свалках и полигонах	182
17.2. Требования законов РФ к размещению отходов на поверхности земли	183
17.3. Полигоны для размещения ТБО.....	185
17.4. Утилизация свалочного газа	186
17.5. Изоляция полигонов	193
17.6. Увеличение срока службы полигонов.....	196
17.7. Полигоны ТБО в директивах Европейского союза	198
17.8. Процедуры депонирования отходов	200
17.9. Работа полигона	202

17.10. Закрытие и рекультивация полигона.....	204
17.11. Выполнение курсового проекта по полигонному депонированию твердых отходов	205
17.11.1. Этапы проектирования полигона	205
17.11.2. Выбор участка под строительство полигона.....	205
17.11.3. Проект полигона ТБО.....	207
17.11.4. Расчет необходимой площади отвода участка земли для строительства полигона захоронения ТБО	207
17.11.5. Организация сбора отходов	207
17.11.6. Расчет годовой нормы накопления ТБО	208
17.11.7. Определение проектной вместимости полигона.....	209
17.11.8. Расчет требуемой площади земельного участка для размещения полигона. Схема полигона	211
17.11.9. Проектирование участка складирования.....	212
<i>Контрольные вопросы</i>	233
Глава 18. Переработка и утилизация твердых отходов	235
18.1. Безопасность жизнедеятельности в сфере переработки и утилизации твердых отходов	235
18.2. Основные принципы переработки отходов.....	237
18.3. Современные решения по переработке твердых бытовых отходов.....	241
18.4. Предварительная сортировка и переработка твердых отходов.....	243
18.4.1. Измельчение	244
18.4.2. Выбор и расчет дробилок.....	253
18.4.3. Другие методы измельчения.....	254
18.4.4. Грохочение	255
18.4.5. Окускование	260
18.4.6. Гравитационное обогащение твердых отходов	261
18.4.7. Электрические и магнитные методы обогащения.....	270
18.4.8. Физико-химическое разделение компонентов с участием жидкой фазы.....	279
18.5. Санитарная земляная засыпка	280
18.6. Сжигание.....	281
18.7. Биотермическое компостирование.....	283
<i>Контрольные вопросы</i>	287
Приложения	289
Литература.....	309

Глава 11

МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- основные механические методы очистки сточных вод;

уметь

- проводить оценку эффективности очистки сточных вод механическими методами;

владеть

- методиками расчета аппаратов механической очистки сточных вод.
-

11.1. Процеживание, основные аппараты для процеживания и их конструкции

Унос сточными водами твердых частиц приводит к заиливанию водоемов. Это наглядно видно по обмелению рек. Устье Волги, как и русла других рек, нуждается в периодической очистке, что говорит о необходимости очистки сточных вод от взвешенных частиц.

Перед более тонкой очисткой на насосных станциях сточные воды процеживают через решетки и сита, которые устанавливают перед отстойниками с целью извлечения из них крупных примесей, которые могут засорять трубы и каналы.

Решетки могут быть неподвижными, подвижными, а также совмещенными с дробилками (коммутаторы). Наибольшее распространение имеют неподвижные решетки. Решетки изготавливают из металлических стержней и устанавливают на пути движения сточных вод под углом $60-75^\circ$. Стержни могут иметь круглое или прямоугольное сечение. Стержни с круглым сечением имеют меньшее сопротивление, но быстрее засоряются, поэтому чаще используют прямоугольные стержни, закругленные со стороны входа воды, в решетку.

Решетки очищают граблями, которые могут быть установлены по-разному (рис. 11.1, *a–в*).

Ширина прозоров в решетке равна 16–19 мм. Скорость сточной воды между стержнями принимается равной 0,8–1 м/с. Потери напора h в решетке определяют по формуле

$$h_p = \xi \frac{w_k^2 P}{2g}; \quad (11.1)$$

$$\xi = \beta \left[\frac{s}{b} \right]^{4/3} \sin \alpha, \quad (11.2)$$

где w_k — скорость движения воды в канале перед решеткой, м/с; P — коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора вследствие засорения решетки (принимают $P = 3$); ξ — коэффициент местного сопротивления решетки; g — ускорение свободного падения, м/с²; s — толщина стержня, м; b — ширина прозоров между стержнями, м; β — коэффициент (для прямоугольных стержней равен 2,42, для закругленных — 1,83 и для круглых — 1,79); α — угол наклона решетки, град.

Снятые с решеток загрязнения направляют на переработку. Для измельчения отходов используют дробилки. Расход энергии на работу механизированных граблей, транспортеров и дробилок составляет около 1 кВт·ч на 1000 м³ сточных вод.

Решетки-дробилки представляют собой агрегат, совмещающий функции решетки и дробилки. Дробилки измельчают отходы, не извлекая их из воды.

Для удаления более мелких взвешенных веществ, а также ценных продуктов применяют сита, которые могут быть двух типов: барабанные и дисковые. Сито барабанного типа представляет собой сетчатый барабан с отверстиями 0,5–1 мм. При вращении барабана сточная вода фильтруется через его

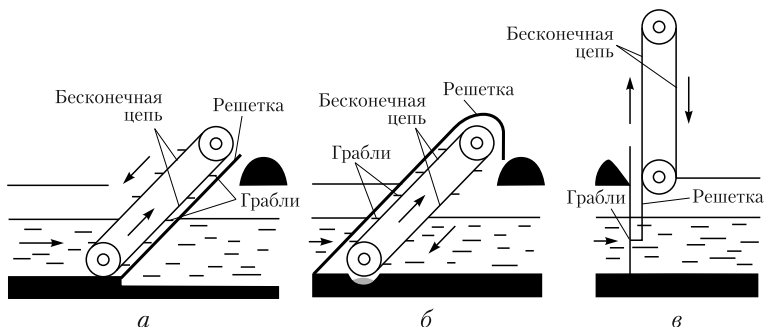


Рис. 11.1. Виды решеток с граблями

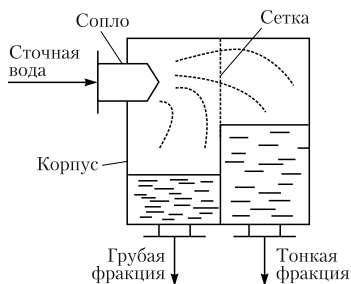


Рис. 11.2. Фракционер

внешнюю или внутреннюю поверхность и в зависимости от подвода воды снаружи или внутрь. Задерживаемые примеси смываются с сетки водой и отводятся в желоб. Производительность сита зависит от диаметра барабана и его длины, а также от свойств примесей. Сита применяют в текстильной, целлюлозно-бумажной и кожевенной промышленности.

Для разделения взвешенных частиц на фракции могут быть использованы фракционаторы, основной частью которых является вертикальная сетка, разделяющая емкость на две части (рис. 11.2). Диаметр отверстий сетки 60–100 мкм. Сточная вода через сопло поступает внутрь фракционатора и делится на грубую и тонкую фракции. При разделении 50–80% взвешенных частиц остается в грубой фракции.

11.2. Усреднители

Усреднители применяются для регулирования состава и расхода сточных вод, поступающих на очистные сооружения.

Поступление на очистные сооружения производственных сточных вод с постоянным расходом и усредненной концентрацией затрязнений позволяет повысить эффективность и надежность работы устройств механической, биологической и физико-химической очистки, в результате чего достигаются более высокие качественные показатели очищенной воды. Экономический эффект достигается в связи с выравниванием пиковых концентраций и расходов сточных вод, поступающих на очистку. Конструктивно усреднители представляют собой прямоугольные резервуары, изготовленные из железобетона. В отечественной практике применяют усреднители, действующие по принципу дифференцирования потока, и усреднители с перемешиванием поступающей сточной воды.

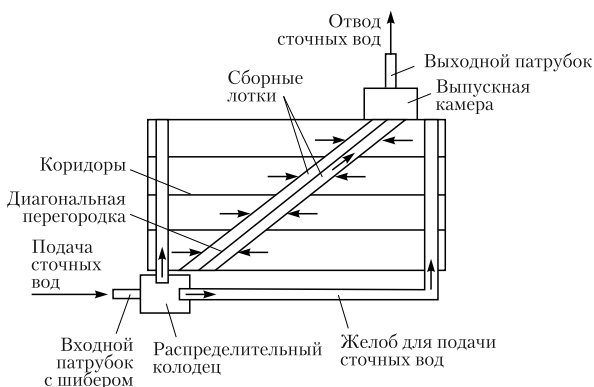


Рис. 11.3. Схема усреднителя прямоугольной формы с дифференцированием потока сточных вод

Схема усреднителя с дифференцированием потока сточных вод представлена на рис. 11.3.

Принцип работы этого усреднителя заключается в следующем: точная вода попадает в распределительный колодец, из которого по желобам направляется в коридоры и собирается затем в диагональные лотки, из них сточная вода поступает в выпускную камеру. Эффективность усреднения по концентрации достигается за счет разного времени добега отдельных порций сточной воды к сборному лотку. Типовой усреднитель состоит из 4–6 параллельно расположенных коридоров.

Кроме того, при очистке производственных сточных вод применяют усреднители барботажного типа суммарной вместимостью 600, 900, 1200, 1500, 1800 м³, а также радиальные отстойники — усреднители, в которых совмещены процессы отстаивания и усреднения производственной сточной воды по концентрации загрязнений. Разработаны также конструкции усреднителей, обеспечивающих поддержание расчетной величины усредненного расхода выпускаемой воды.

11.3. Процессы отстаивания и применяемое оборудование

Оценка содержания твердых частиц в сточных водах производится по отношению массы твердых частиц к массе жидкости — Т : Ж. Выбор метода очистки от взвешенных частиц определяется их размерами. При размере частиц более 0,1 мкм используется гравитационный метод очистки — отстаивание. Подобно осаждению твердых частиц в газовой среде, осажде-

ние твердых частиц в жидкости подчиняется закону Стокса и характеризуется числом Архимеда:

$$Ar = \frac{gd_{\text{пр}}^3(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})}{v_{\text{ж}}^2 \rho_{\text{ж}}}.$$

Скорость осаждения находится по числу Рейнольдса $Re = \frac{w_{\text{ос}} d_{\text{пр}}}{v_{\text{ж}}}$ как функция числа Архимеда. Поскольку $(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) \ll (\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{г}})$, а $v_{\text{ж}} \gg v_{\text{г}}$, то осаждение в жидкости будет более медленным. Большое влияние на скорость осаждения, как и в газовой фазе, оказывает приведенный (эквивалентный) диаметр частиц ($d_{\text{пр}}$).

Основным параметром, который используют при расчете отстойников, является скорость осаждения частиц (гидравлическая крупность) — $w_{\text{ос}}$.

Для ламинарного, переходного и турбулентного режимов скорость свободного осаждения шарообразных частиц вычисляют по формуле

$$Re_0 = \frac{Ar}{18 + 0,6\sqrt{Ar}}. \quad (11.3)$$

Для нешарообразных частиц в формулы подставляют эквивалентный (приведенный) диаметр частиц

$$d_3 = \sqrt{\frac{V_{\text{ч}}}{\pi}},$$

где $V_{\text{ч}}$ — объем частицы.

При отстаивании сточных вод наблюдается стесненное осаждение, которое сопровождается столкновением частиц, трением между ними и изменением скоростей как больших, так и малых частиц. Скорость стесненного осаждения меньше скорости осаждения свободного вследствие возникновения восходящего потока жидкости и большей вязкости среды.

Скорость стесненного осаждения шарообразных частиц одинакового размера можно рассчитать при ламинарном режиме по формуле Стокса с поправочным коэффициентом, который учитывает влияние концентрации взвешенных частиц и реологические свойства системы:

$$w_{\text{ос}} = \frac{d^2 g (\rho_{\text{тв}} - \rho) R}{18 \mu_0}; \quad R = \frac{\varepsilon \mu_0}{\mu_{\text{с}}}, \quad (11.4)$$

где $\varepsilon = V_{\text{ж}} / (V_{\text{ж}} + V_{\text{тв}})$, а $\mu_{\text{с}}$ и μ_0 — динамическая вязкость сточной и чистой воды, Па·с; $V_{\text{ж}}$ и $V_{\text{тв}}$ — объем жидкой и твердой фаз в сточной воде, м³.

Скорость осаждения полидисперсной системы непрерывно изменяется во времени. Вследствие агломерации частиц она может изменяться в несколько раз по сравнению с теоретической.

Способность к агломерации зависит от концентрации, формы, размера и плотности взвешенных частиц, а также от соотношения частиц различного диаметра и вязкости среды.

Коэффициент агломерации характеризуется отношением

$$K_a = \frac{d_{\text{ф}}}{d_0},$$

где $d_{\text{ф}}$ — фиктивный диаметр частицы, эквивалентный теоретической скорости ее осаждения.

Для полидисперсных систем кинетику осаждения устанавливают опытным путем. При периодическом процессе осаждения взвешенные частицы в отстойнике распределяются неравномерно по высоте слоя сточных вод. Через какой-то промежуток времени после начала отстаивания в верхней части отстойника появляется осветленный слой жидкости. Чем ближе ко дну отстойника, тем больше концентрация взвешенных частиц в сточной воде, а у самого дна образуется слой осадка. Во времени высота слоя осветленной жидкости и высота слоя осадка возрастают за счет промежуточных слоев. Через определенный промежуток времени в отстойнике будет находиться только слой осветленной жидкости и слой осадка. В дальнейшем, если осадок не удалить, он будет уплотняться с уменьшением высоты. При непрерывном отстаивании наблюдаются те же зоны, но высота их не меняется в ходе процесса.

При ориентировочных расчетах, учитывая приближенно отличие реальных условий осаждения от теоретических (стесненность осаждения, форма частиц, движение среды), среднюю расчетную скорость осаждения часто принимают равной половине теоретической скорости осаждения одиночной шарообразной частицы.

$$w'_{\text{ос}} = 0,5w_{\text{ос}}. \quad (11.5)$$

Выражая скорость осаждения через объемный расход жидкой фазы V_0 , содержащейся в начальной суспензии, м³/с,

в применении к отстойнику непрерывного действия, получим следующее выражение:

$$F_{oc} = \frac{G_n \left(1 - \frac{c_n}{c_{cr}} \right)}{\rho_c \omega'_{oc}}, \quad \text{или} \quad F_{oc} = \frac{V_0 (x_{cr} - x_n)}{\omega'_{oc} x_{cr}}, \quad (11.6)$$

где F_{oc} — площадь осаждения отстойника, м²; G_n — массовый расход начальной (разбавленной) суспензии, кг/с; c_n — массовая концентрация твердой фазы в начальной суспензии, кг/кг; c_{cr} — массовая концентрация твердой фазы в сгущенной суспензии (шламе), кг/кг; ρ_c — плотность осветленной жидкости, кг/м³; V_0 — объемный расход жидкой фазы, содержащейся в начальной суспензии, м³/с; x_n и x_{cr} — концентрация начальной суспензии и шлама, кг твердой фазы/кг жидкой фазы.

11.3.1. Песколовки

Их применяют для предварительного выделения минеральных и органических загрязнений (0,2—0,25 мм) из сточных вод. Горизонтальные песколовки представляют собой резервуары с треугольным или трапециевидным поперечным сечением (рис. 11.4). Глубина песколовков 0,25—1 м. Скорость движения воды в них не превышает 0,3 м/с. Разновидностью горизонтальных песколовков являются песколовки с круговым движением воды в виде круглого резервуара конической формы с периферийным лотком для протекания сточной воды. Осадок собирается в коническом днище, откуда его направляют на переработку или в отвал. Применяются при расходах до 7000 м³/сут. Вертикальные песколовки имеют прямоугольную или круглую форму, в них сточные воды движутся с вертикальным восходящим потоком со скоростью 0,05 м/с. Конструкцию песколовки выбирают в зависимости от

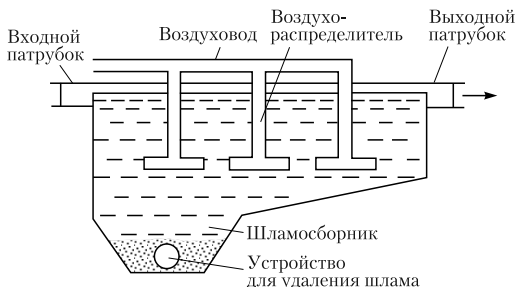


Рис. 11.4. Схема аэрируемой песколовки

количества сточных вод, концентрации взвешенных веществ. Наиболее часто используют горизонтальные песколовки.

Рассмотрим пример решения задачи.

Задача 11.1. Дано: $Q = 0,042 \text{ м}^3/\text{с}$; $d_{\text{ч}} = 0,0003 \text{ м}$; $\rho_{\text{ч}} = 2300 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\mu_{\text{ж}} = 0,00102 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$.

Рассчитать геометрические размеры аэрируемой песколовки, предназначенной для очистки сточной воды от частиц песка.

Решение.

1. Определяем скорость осаждения твердых частиц в жидкости:

$$w_0 = \frac{9,81 \cdot 9 \cdot 10^{-8} \cdot 1300}{18 \cdot 0,00102} = 0,0625 \text{ м/с.}$$

2. Находим площадь поперечного сечения песколовки:

$$S = \frac{0,042}{0,0625} = 0,672 \text{ м}^2.$$

3. Принимая $B/H = 1$, определяем $B = H = \sqrt{0,672} = 0,82 \text{ м}$.

4. Принимаем $k = 1,5 \text{ м}$; $w = 0,12 \text{ м/с}$.

5. Определяем длину песколовки:

$$L = \frac{1,5 \cdot 0,41 \cdot 0,12}{0,0625} = 1,18 \text{ м.}$$

11.3.2. Отстойники

На рис. 11.5 приведена схема отстойника для очистки сточных вод от твердых частиц. При малой скорости движения воды в отстойнике твердые частицы успевают осесть на дно, откуда шлам периодически откачивается насосом. Наряду с твердыми частицами сточные воды часто бывают загрязнены нефтепродуктами (легкая фракция), которые собираются на поверхности воды и периодически отводятся из

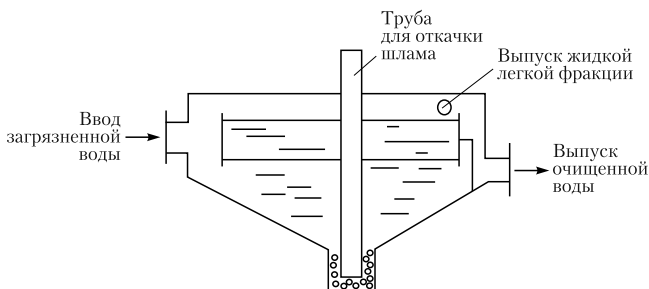


Рис. 11.5. Схема отстойника для очистки стоков от твердых частиц и легкой жидкой фракции

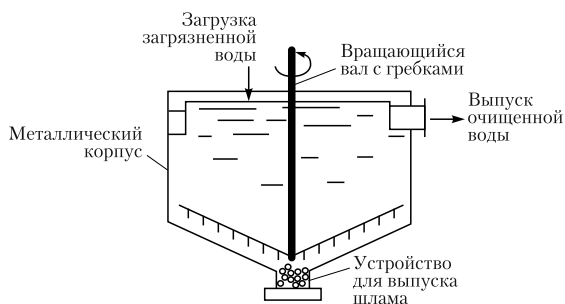


Рис. 11.6. Схема устройства сгустителя

отстойника. Очищенная вода через гидравлический затвор сливается из верхних ее слоев. В отстойниках удается повысить содержание твердой фракции до $T : Ж = 1 : (3 \dots 5)$ при начальном отношении $T : Ж = 1 : (10 \dots 20)$. Такой же эффект очистки, но быстрее достигается в сгустителе, схема которого показана на рис. 11.6.

В цилиндрическом корпусе с коническим дном размещен по центру вал, на котором укреплены скребки, сдвигающие осадок со дна сгустителя к устройству для выпуска шлама. Медленное вращение лопастей сгустителя способствует осаждению твердой фазы. Загрязненные стоки воды поступают в сгуститель сверху. Очищенная вода сливается из верхних слоев сгустителя.

Процесс очистки в рассмотренных устройствах дешев, но требует больших помещений для их размещения. При теплом климате такие устройства размещаются на открытом воздухе.

Рассмотрим пример решения задачи.

Задача 11.2. Определить диаметр отстойника для непрерывного осаждения отмученного мела в воде. Производительность отстойника 80 т/ч начальной суспензии, содержащей 8 мас. % CaCO_3 . Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению, 35 мкм. Температура суспензии 15°C. Влажность шлама 70%. Плотность мела 2710 кг/м³.

Решение.

1. Для определения диаметра отстойника надо вычислить необходимую площадь осаждения по формуле (11.4), для чего предварительно находят скорость осаждения:

$$\omega_{\text{ос}} = \frac{d^2 g (\rho - \rho_c)}{18 \mu_c} = \frac{(3,5 \cdot 10^{-5})^2 (2710 - 1000) \cdot 9,81}{18 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,001 \text{ м/с,}$$

где $\mu_0 = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

2. Проверим значение критерия Re :

$$w_{oc} = \frac{w_{oc} d \rho_c}{\mu_c} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3}{1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,0307 < 0,2.$$

3. Действительная скорость осаждения:

$$w'_{oc} = 0,5 w_{oc} = 0,5 \cdot 0,001 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

4. Площадь отстойника:

$$F_{oc} = \frac{G_n \left(1 - \frac{c_n}{c_{cr}}\right)}{\rho_c w'_{oc}} = \frac{80 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{8}{30}\right)}{3600 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 32,5 \text{ м}^2.$$

5. Диаметр отстойника:

$$D = \sqrt{\frac{32,5}{0,785}} = 6,4 \text{ м.}$$

11.3.3. Осветлители

Осветлители применяют для очистки природных вод и для предварительного осветления сточных вод некоторых производств. Используют, в частности, осветлители со взвешенным слоем осадка, через который пропускают воду, предварительно обработанную коагулянтom.

Принципиальная схема осветлителя показана на рис. 11.7. Воду с коагулянтom подают в нижнюю часть осветлителя. Хлопья коагулянта и увлекаемые им частицы взвеси поднимаются восходящим потоком воды до тех пор, пока скорость выпадения их не станет равной скорости восходящего потока — сечение I—I. Выше этого сечения образуется слой взвешенного осадка, через который фильтруется осветленная вода.

При этом наблюдается процесс прилипания частиц взвеси к хлопьям коагулянта. Осадок удаляется в осадкоуплотнитель

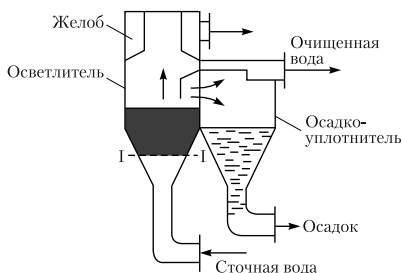


Рис. 11.7. Блок осветлителя

тель, а осветленная вода поступает в желоб, из которого ее направляют на дальнейшую очистку.

11.3.4. Удаление всплывающих примесей

Процесс отстаивания используют и для очистки производственных сточных вод от нефти, масел, смол, жиров и др. Очистка от всплывающих примесей аналогична осаждению твердых веществ. Различие заключается в том, что плотность всплывающих частиц меньше, чем плотность воды. Для улавливания частичек нефти используют нефтеловушки. Для улавливания жиров применяют жироловушки.

Схема горизонтальной прямоугольной нефтеловушки показана на рис. 11.8, *а*. Всплытие нефти на поверхность воды происходит в отстойной камере. При помощи скребкового транспорта нефть подают к нефтесборным трубам, через которые она удаляется. Скорость движения воды в нефтеловушке изменяется в пределах 0,005–0,01 м/с. Для частичек нефти диаметром 80–100 мкм скорость всплытия равна 1–4 мм/с. При этом всплывает 96–98% нефти. Горизонтальные нефтеловушки имеют не менее двух секций. Ширина секций 2–3 м, глубина отстаиваемого слоя воды 1,2–1,5 м; продолжительность отстаивания не менее 2 ч.

Имеются также радиальные и полочные тонкослойные нефтеловушки, представляющие собой (рис. 11.8, *б*) усовершенствованные конструкции горизонтальных нефтеловушек. Они имеют меньшие габариты и более экономичны. Расстояние между полками равняется 50 мм, угол наклона

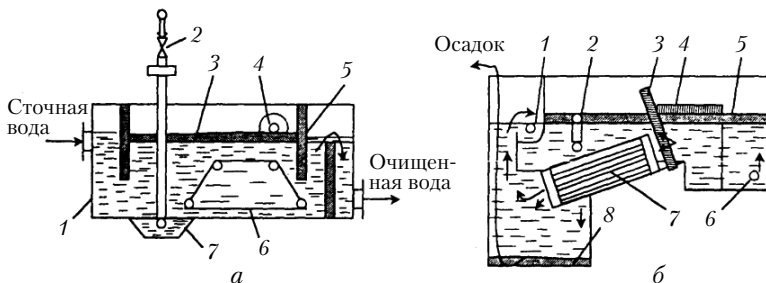


Рис. 11.8. Нефтеловушки:

а – горизонтальная: 1 – корпус; 2 – гидроэлеватор; 3 – слой нефти; 4 – нефтесборная труба; 5 – нефтеудерживающая перегородка; 6 – скребковый транспортер; 7 – приямок для осадка; *б* – тонкослойная: 1 – вывод очищенной воды; 2 – нефтесборная труба; 3 – перегородка; 4 – плавающий пенопласт; 5 – слой нефти; 6 – ввод сточной воды; 7 – секция из гофрированных пластин; 8 – осадок

полок 45° , время пребывания сточных вод в зоне отстаивания 2—4 мин, толщина слоя всплывающих нефтепродуктов 0,1 м; остаточное содержание их в воде 100 мг/л.

Сточные воды маслозаводов, фабрик первичной обработки шерсти, мясокомбинатов, столовых содержат жиры. Для их улавливания используют жироловушки, которые устроены аналогично нефтеловушкам. Для увеличения эффективности удаления из вод жира применяют аэрированные жироловушки.

Скорость подъема частиц w легкой жидкости зависит от размера частиц, плотности и вязкости, т.е. от числа $Re = \frac{w_{oc} d \rho}{\mu_0}$.

В области $Re < 0,25$ всплывание происходит по закону Стокса.

Движение частицы легкой фазы вверх вызывает в сточной воде вторичные потоки, тормозящие подъем. Скорость подъема с учетом торможения равна:

$$w'_{bc} = \frac{w_{bc}(3\mu_l + 2\mu_0)}{3\mu_l + 3\mu_0}, \quad (11.7)$$

где w_{bc} — скорость всплывания легкой жидкости, м/с; μ_l — коэффициент динамической вязкости всплывающей жидкости.

На процесс разделения оказывают влияние турбулентность, коагуляция и гидродинамическое комплексообразование. При вводе сточной воды может произойти измельчение легкой жидкости, особенно при ударе струи о поверхность, что сопровождается изменением давления. Начальный размер частиц поддерживается капиллярным давлением ($P_k = \frac{4w}{d}$).

При ударе струи возникает результирующее давление P_1 . Если $P_1 > P_k$, то происходит измельчение капель. Отношение числа отстоявшихся частиц легкой жидкости определенного размера к общему числу частиц легкой жидкости называют эффектом отстаивания Φ . При условии равномерного распределения легкой жидкости в сточной воде (реальным условиям соответствует более сложный механизм процесса) он равен:

$$\Phi = \frac{w_{bc} L}{wh}, \quad (11.8)$$

где L — длина нефтеловушки; w — скорость сточной воды в нефтеловушке; h — высота слоя легкой жидкости от дна нефтеловушки.

11.4. Центробежные методы очистки

Повысить очистку стоков от твердых частиц удается в циклонах, подобных тем, что используются для очистки газов от пыли, и центрифугах. За счет центробежных сил очистка значительно ускоряется, и размеры оборудования сокращаются. В первом случае вращательное движение суспензии происходит за счет подачи по касательной в аппарат цилиндрической формы (называемой гидроциклоном), а во втором — за счет вращения суспензии в роторе центрифуги.

Величина центробежной силы F зависит от радиуса:

$$F = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R = \frac{m\pi^2 n^2 R}{900}, \quad (11.9)$$

где m — масса; v — линейная скорость; ω — угловая скорость; n — число оборотов; R — текущий радиус.

Поэтому аналитическое описание процессов расслоения осложняется. Центробежная сила в современных аппаратах может превышать силу тяжести в сотни и тысячи раз. Отношение центробежной силы к силе тяжести называется фактором разделения:

$$K = \frac{\pi^2 n^2 R}{900g}. \quad (11.10)$$

Следовательно, в аппаратах, в которых развивается центробежная сила, процессы разделения ускоряются и происходят более полно.

Скорость осаждающейся частицы под действием центробежной силы не достигает предельного значения, как это имеет место при осаждении в поле тяжести.

Расчет циклона аналогичен расчету подобных устройств для очистки газа от твердых частиц.

Скорость движения частицы в жидкости под действием центробежной силы ($V_{ц}$) может быть определена по формуле

$$V_{ц} = \frac{C^{0,385} d^m \rho_c^{(m-2)/3} \Delta\rho^{(m+1)/3} I^{(m+1)/3}}{\mu^{(2m-1)/3}}, \quad (11.11)$$

где C — коэффициент пропорциональности; d — диаметр частицы; m — константа, определенная эмпирически; ρ_c — плотность сточной воды; $\Delta\rho$ — разность плотностей фаз (твердое — жидкое); I — ускорение центробежного поля; μ — динамический коэффициент вязкости жидкости (сточной воды).

Величины коэффициентов C и констант m не зависят от гидродинамического режима, определяемого значением критерия Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{ц} d \rho}{\mu}.$$

Их числовые значения представлены в табл. 11.1.

Для очистки сточных вод от твердых частиц используют открытые и напорные гидроциклоны (рис. 11.9).

Таблица 11.1

Числовые значения коэффициентов C и констант m в формуле

Гидродинамический режим	Re	C	m
Ламинарный	До 1,6	$1,7 \cdot 10^{-4}$	2
Переходный	1,6—420	$2,49 \cdot 10^{-3}$	1,2
Турбулентный	Более 420	0,5	5,36

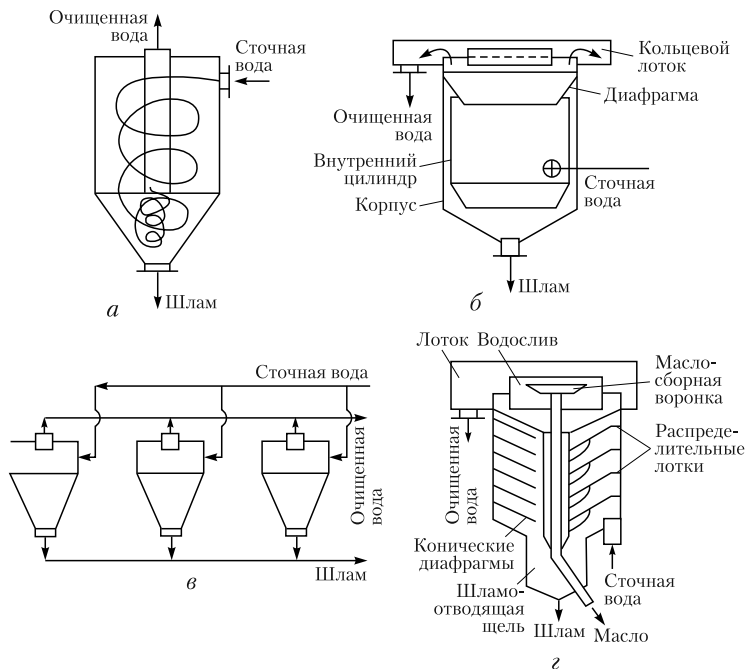


Рис. 11.9. Гидроциклоны:

a — напорный; $б$ — с внутренним цилиндром и конической диафрагмой; $в$ — блок напорных гидроциклонов; z — многоярусный гидроциклон с наклонными патрубками для отвода очищенной воды

Открытые гидроциклоны используют для выделения всплывающих и оседающих грубодисперсных примесей гидравлической крупностью более 0,2 мм/с и скоагулированных взвешенных веществ. Применяют следующие типы открытых гидроциклонов:

- без внутренних устройств для выделения из сточных вод крупных и мелкодисперсных взвешенных веществ;
- с конической диафрагмой и с внутренним цилиндром выделения оседающих и всплывающих мелкодисперсных взвешенных веществ;
- многоярусный с наклонными выпусками очищенной воды из каждого яруса для выделения крупных и мелкодисперсных взвешенных веществ;
- многоярусный с периферийным отбором очищенной воды для выделений оседающих крупно- и мелкодисперсных взвешенных веществ.

Для повышения эффективности очистки в конструкции многоярусного гидроциклона совмещены принципы работы открытого гидроциклона и тонкослойного отстойника.

Диаметр (D) первого из вышеуказанных гидроциклонов лежит в пределах от 2 до 10 м. Для всех остальных типов $D = 2-6$ м. Производительность открытого гидроциклона может быть рассчитана по следующей формуле:

$$Q = 0,785qD^2, \quad (11.12)$$

где Q — производительность гидроциклона, м³/ч; q — удельная гидравлическая нагрузка, м³/(м²·ч); D — диаметр гидроциклона, м.

Напорные гидроциклоны используют для очистки сточных вод от грубодисперсных примесей (в основном минерального происхождения), таких как песок, уголь, окалина, компоненты керамики, стекла, строительных материалов, а также отходов литейного, горнорудного, асбестоцементного, химического и металлургического производств.

Указанные устройства могут быть единичными и батарейными (мультициклоны).

В напорном гидроциклоне формируются внешний и внутренний потоки воды, направление вращения которых совпадает. Внешний поток при вращении проходит цилиндрическую и коническую части циклона и направляется к шламовому отверстию, а внутренний поток удаляется через сливной патрубок.

Указанные гидроциклоны производятся с диаметрами цилиндрической части 100–500 мм. Разработаны также кон-

струкции напорных гидроциклонов с монолитными элементами рабочей камеры (марки ГН) и диаметрами цилиндрической части 25–80 мм.

Гидроциклоны малого диаметра объединяют в общий агрегат, в котором они работают параллельно. Такие устройства называют мультигидроциклонами. Их наиболее эффективно использовать для очистки небольших количеств вод от тонкодисперсных примесей. Производительность напорного гидроциклона ($Q_{\text{пит}}$) может быть рассчитана по следующей формуле:

$$Q_{\text{пит}} = 1,03D^{0,053}d_{\text{пит}}^{1,28}d_{\text{сл}}^{0,405}d_{\text{шл}}^{0,143}H_{\text{ц}}^{0,015}\alpha^{0,026}P_{\text{пит}}, \quad (11.13)$$

где $Q_{\text{пит}}$ — производительность напорного гидроциклона, л/с; D — диаметр цилиндрической части гидроциклона, см; $d_{\text{пит}}$ — диаметр питающего патрубка, см; $d_{\text{сл}}$ — диаметр сливного патрубка, см; $d_{\text{шл}}$ — диаметр шламового патрубка, см; $H_{\text{ц}}$ — высота цилиндрической части гидроциклона, см; α — угол конусности конической части, град; $P_{\text{пит}}$ — давление питания (на входе в гидроциклон), МПа.

Представленное уравнение справедливо для гидроциклонов марки и ГНС при условии, что эти устройства работают без противодействия со стороны сливного и шламового патрубков, т.е. давление на выходе из сливного и шламового патрубков соответствует атмосферному.

Требуемое число напорных гидроциклонов $N_{\text{раб}}$ определяется по следующей формуле:

$$N_{\text{раб}} = \frac{Q}{Q_{\text{пит}}}, \quad (11.14)$$

где Q — расчетная производительность установки, л/с.

Эффективность очистки в гидроциклонах достигает 70–80 %. Значительно больший эффект очистки достигается в центрифугах, где внутри корпуса с большой скоростью (сотни и тысячи оборотов в минуту) вращается барабан, увлекающая за собой жидкость. Легкая фракция поднимается вверх, а тяжелая собирается внизу. Схема центрифуги приведена на рис. 11.10. Корпус центрифуги вращается с большой скоростью вокруг полой оси, через которую поступает загрязненная вода. Благодаря трению о стенки жидкость приобретает большую скорость вращения. За счет центробежных сил твердые частицы направляются к внешней стенке центрифуги и через отдельный патрубок выводятся наружу в виде концентрированного шлама. Более легкая фракция

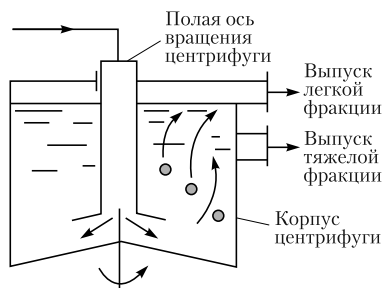


Рис. 11.10. Схема центрифуги для очистки воды от мелких твердых частиц

(вода) выводится через верхний патрубок. Из расчета циклона известно, что время, необходимое для перемещения твердой частицы от внутренней трубы до наружной стенки центрифуги, обратно пропорционально квадрату угловой скорости вращения. Быстрое вращение (сотни и тысячи оборотов в минуту) обеспечивает высокую эффективность разделения в центрифуге. Расчет центрифуг аналогичен расчету циклона. Находится время движения твердой частицы от внутренней стенки к наружной, и по заданной производительности определяется необходимый объем центрифуги.

Дифференциальное уравнение движения частицы относительно жидкости, находящейся в поле центробежных сил, имеет вид:

$$m \frac{dv}{dt} + \frac{\pi d^3}{6} \nabla \omega^2 r = \frac{\lambda R_{\text{в}}^2 \mu^2}{\rho_{\text{ж}}}, \quad (11.15)$$

где m — масса частицы, кг; v — относительная скорость радиального движения частицы, м/с; d — диаметр частицы, см; $\nabla = \rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{ж}}$, кг/м³; r — радиус вращения частицы; ω — угловая скорость, рад/с; λ — коэффициент сопротивления; μ — вязкость кг/(м·с).

При $Re < 0,2$, когда имеем ламинарный закон движения частицы и сила сопротивления (второй член уравнения (11.15)) определяется законом Ньютона: $F = 6\pi\mu r v$, решение уравнения приобретает вид:

$$v = \frac{\omega^2 r \Delta d^2}{18}. \quad (11.16)$$

Данное выражение аналогично закону Стокса, в котором g заменено на $\omega^2 r$.

Производительность ($\text{м}^3/\text{с}$) по твердому можно приблизительно оценить по формуле

$$Q_{\text{ТВ}} = \frac{\nabla d V \omega^2 r}{9 \mu h}, \quad (11.17)$$

где V — объем суспензии в роторе центрифуги; r — радиус трубчатого ротора центрифуги; h — толщина осадка.

Задавшись $Q_{\text{ТВ}}$ из этого уравнения, можно оценить граничный диаметр частиц, уходящих в слив.

Уравнение для расхода часто записывают в виде ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$Q_{\text{ТВ}} = 2 U_g \Sigma, \quad (11.18)$$

где U_g — предельная скорость осаждения в поле силы тяжести, $\text{м}/\text{с}$; Σ — индекс производительности центрифуги.

Он показывает, во сколько раз нужна большая площадь в м^2 ротора в отсутствии центробежного ускорения, обеспечивающего такое же осаждение частиц, как и в центрифуге.

Индекс производительности Σ можно определить через фактор разделения K_p , как:

$$\Sigma = FK_p \text{ (для ламинарного движения);}$$

$$\Sigma = FK_p^{0,785} \text{ (в переходном режиме);}$$

$$\Sigma = FK_p^{0,5} \text{ (в турбулентном режиме),}$$

где F — площадь цилиндрической поверхности осаждения.

При увеличении значения Re происходит замедление роста эффективности действия центрифуг.

Для цилиндрической центрифуги значения K_p и F можно рассчитать по формулам

$$K = \frac{\omega^2 r}{g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \frac{r}{g} \approx \frac{n^2 D}{1800}; \quad F = \frac{\pi D^2}{4} l, \quad (11.19)$$

где n — число оборотов ротора; D — его диаметр; l — длина цилиндрической части ротора.

На практике жидкость находится на расстоянии, равном не диаметру центрифуги, а $(D - h)$, где h — толщина слоя осадка. Поэтому величину фактора разделения относят к среднему диаметру $(D - h)$ и выражения для K_p и F примут вид:

$$K_p = \frac{(D - h)n^2}{1800}; \quad F = 2\pi r_0 l, \quad (11.20)$$

где r_0 — радиус свободной поверхности жидкости; l — длина ротора.

Подставив значение для F и K_p , получим:

$$\Sigma = FK_p^n = \pi l \left[\frac{(D-h)^2 n^2}{1800} \right]. \quad (11.21)$$

Для трубчатых $\Sigma = 120-2520$; для тарельчатых $\Sigma = 6300-12\,400$; со шнековой выгрузкой $\Sigma = 560-600$.

11.5. Очистка сточных вод фильтрованием

Очистка стоков от мелких твердых частиц ($< 0,1$ мкм) с получением более концентрированного твердого осадка производится с помощью фильтров. Известны фильтры с различным конструктивным оформлением, отличающиеся условиями их обслуживания.

Процессы фильтрования и фильтры для очистки воды классифицируют по ряду признаков.

1. По характеру процесса с образованием осадка и без него (с закупориванием пор или без осадка). Целью первого процесса является получение товарного продукта в виде осадка, а второго — фильтрата. В первом случае содержание твердого в исходной суспензии обычно не менее 50,0% (объемных), а во втором — не более 0,1–1,0%. В каналах осадка преимущественно задерживаются твердые частицы более 1–2 мкм. Частицы менее 1 мкм можно отделить только фильтрованием с закупориванием пор или ультрафильтрованием. При обогащении полезных ископаемых в химической промышленности, металлургии имеет место фильтрация с образованием осадка, так как даже в случае осветления оборотных вод чаще всего получают осадки. На практике часто оба вида фильтрования протекают одновременно. Однако преимущественно в каждом конкретном случае наблюдается либо первый, либо второй вид. Смена типов фильтрования может происходить во времени.

2. По способу создания разности давлений — под вакуумом или под избыточным давлением. Отделение жидкости производится за счет собственного веса (дренирование) и за счет центробежных сил (центробежное фильтрование).

3. По взаимному направлению действия силы тяжести и движения фильтрата в фильтрах (рис. 11.11).

4. По свойствам осадка. Накапливающийся в фильтре осадок может быть как сжимаемым, так и почти несжимаемым. Под несжимаемыми понимают такие осадки, в которых пористость ε , т.е. отношение объема пор (V_n) к объему осадка

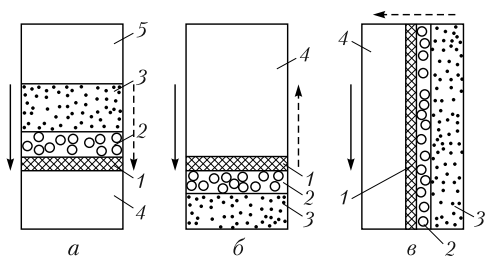


Рис. 11.11. Взаимные направления действия силы тяжести и движения фильтрата в фильтрах:

a — направления совпадают; *б* — направления противоположны; *в* — направления перпендикулярны; сплошные стрелки — направление действия силы тяжести; пунктирные стрелки — направление движения фильтрата; 1 — фильтровальная перегородка; 2 — осадок; 3 — суспензия; 4 — фильтрат; 5 — чистая жидкость

(V_{oc}) не уменьшается при увеличении разности давлений. Пористость сжимаемых осадков уменьшается, а их гидравлическое сопротивление потоку жидкой фазы возрастает с увеличением давления. К числу практически несжимаемых можно отнести осадки, состоящие из относительно крупных кристаллических частиц — более 70–100 мкм, к сильно сжимаемым относятся аморфные осадки гидроокисей металлов, а также осадки, состоящие из легкодеформируемых агрегатов, которые образуются из первичных мелких частиц. По этой причине флокулированные пульпы не всегда быстрее обезвоживаются при фильтрации, и, вероятно, необходимо в ряде случаев уменьшать давление.

5. Фильтрация с применением вспомогательного вещества, которое препятствует проникновению твердых частиц в поры фильтровальной перегородки.

В качестве вспомогательных веществ используют доломит, перлит, асбест, целлюлозу, активированный уголь, древесную муку. Слой вспомогательного вещества наносят на фильтровальную перегородку толщиной не более 50 мм или добавляют в суспензию в количестве не более 1% веса суспензии. При непрерывном съеме осадка срезается небольшой слой (около 0,1 мм) вспомогательного вещества, и поэтому процесс идет как бы с самоочищающейся разделительной перегородкой. Добавление вспомогательного вещества к разделяемой суспензии способствует повышению ее концентрации и переходу от процесса с закупориванием пор к процессу с образованием осадка. Предполагается, что образуются сводники над входами в поры фильтровальной перегородки,

что предотвращает их закупоривание. В производственных условиях под фильтрованием понимают не только операцию разделения суспензии на фильтрат и осадок, но и последующие операции промывки, продувки и сушки осадка на фильтре. Все эти операции и процесс загрузки и снятия осадка называют вспомогательными.

11.5.1. Физические основы фильтрации с образованием осадка. Гидродинамика течения жидкости через пористые и зернистые слои

В самом общем виде скорость течения жидкости через пористый или зернистый слой — осадок определяется размерами пор и перепадом давления:

$$\Delta p = \lambda \frac{l \rho_{\text{ж}} W^2}{2d_3}, \quad (11.22)$$

где Δp — перепад давлений; $\rho_{\text{ж}}$ — удельная масса воды; W — скорость течения воды; l — длина капилляров в осадке; d_3 — эквивалентный диаметр, соответствующий суммарному поперечному сечению каналов в зернистом слое; λ — общий коэффициент сопротивления.

Коэффициент сопротивления отражает не только влияние сопротивления трению, но и дополнительных местных сопротивлений. Значение коэффициента λ зависит от режима течения жидкости. Для всех режимов движения применимо, в частности, обобщенное уравнение:

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34. \quad (11.23)$$

Характерной особенностью движения жидкости через зернистый слой является более раннее наступление переходного режима, чем при течении по трубам, так как поры в осадке не гладкие, что способствует образованию вихрей. Ламинарный режим практически существует примерно при $Re < 50$. Необходимо отметить, что при течении жидкости в осадке нет резких границ между режимами.

При больших значениях числа Re коэффициент сопротивления λ практически постоянен: $\lambda \cong 2,34$.

Эквивалентный диаметр d_3 , как показано в гл. 5, находят через основные характеристики зернистого слоя:

$$d_3 = \frac{2\Phi \varepsilon d}{3(1 - \varepsilon)}.$$

Поскольку на практике скорость прохождения воды через осадок W_0 определяют как частное от деления объема воды V на геометрическую поверхность осадка, а в формулу входит истинная скорость течения жидкости W по каналам осадка, то ее можно найти из уравнения

$$W = \frac{W_0}{\varepsilon} = \frac{V}{S_{oc}\varepsilon t}, \quad (11.24)$$

где t — время фильтрации объема V .

Необходимо отметить, что длина пор в осадке l , как правило, больше высоты осадка H . Это различие учитывается коэффициентом кривизны k , полагая, что $kH = L$. Очевидно, что $k > 1$. Однако эту кривизну не учитывают, так как она не существенна. Основное уравнение течения жидкости через пористую среду имеет вид:

$$\Delta p = \frac{\lambda \frac{H}{2\Phi \varepsilon d} \rho_{ж} \left(\frac{W_0}{\varepsilon} \right)}{3(1-\varepsilon) \cdot 2} = \lambda \frac{3H(1-\varepsilon) \rho_{ж} W_0^2}{4d\Phi \varepsilon^2}. \quad (11.25)$$

При фильтровании через пористую среду часто имеет место ламинарный режим течения жидкости. В этом случае можно принять, что:

$$\lambda = \frac{133}{Re}; \quad Re = \frac{Wd_0 \rho_{ж}}{\mu} = \frac{2}{3} \frac{W_0 d \rho_{ж} \Phi}{\mu(1-\varepsilon)} \quad (11.26)$$

или

$$\Delta p = 150 \frac{\varphi_{\Phi}(1-\varepsilon)^2 \mu H W_0}{\varepsilon^2 d^2}, \quad (11.27)$$

где φ_{Φ} — коэффициент формы, связанный с фактором формы соотношением

$$\varphi_{\Phi} = \frac{1}{\Phi^2}. \quad (11.28)$$

Как видно, перепад давления пропорционален скорости течения жидкости в первой степени. Коэффициент пропорциональности называют коэффициентом сопротивления осадка:

$$\Delta p = \mu R_{oc} W_0 \rightarrow W_0 = \frac{\Delta p}{\mu R_{oc}}; \quad (11.29)$$

$$R_{oc} = \frac{150 \varphi_{\Phi} (1-\varepsilon)^2 H}{\varepsilon^2 d^2}. \quad (11.30)$$

Как видно, R_{oc} обратно пропорционально d^2 частиц, поэтому размер частиц в осадке в первую очередь определяет его сопротивление течению жидкости.

Скорость процесса пропорциональна движущей силе (Δp) и обратно пропорциональна сопротивлению. В общем случае в процессе фильтрования значения разности давлений и гидравлического сопротивления слоя осадка с течением времени изменяются. Переменную скорость фильтрования выражают, как показано в гл. 5, в дифференциальной форме:

$$W = \frac{dV}{Sd\tau},$$

где V — объем жидкости, прошедший через поверхность осадка S за время τ .

При описании процесса фильтрации принято общее сопротивление движению жидкости представлять в виде суммы сопротивлений осадка R_{oc} и фильтрованной перегородки $R_{фп}$: $R = R_{oc} + R_{фп}$. Тогда в общем виде дифференциальное уравнение фильтрации примет вид:

$$W = \frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(R_{oc} + R_{фп})}. \quad (11.31)$$

Гидравлическое сопротивление осадка R_{oc} в среднем можно считать постоянным, хотя оно нередко меняется по ходу процесса фильтрования из-за засорения пор мелкими частицами, а также некоторого сжатия осадка. Считается, что диапазон изменения пористости вследствие засорения и сжатия осадка при постоянных условиях фильтрации более или менее одинаков. Поэтому целесообразно в ряде случаев оперировать величинами удельных сопротивлений осадков. Значение R_{oc} с увеличением толщины осадка изменяется от нуля в начале фильтрования до максимального значения в конце процесса. Объем осадка пропорционален объему пульпы. Если этот коэффициент равен x_0 , а его объем равен V , то высота осадка составляет:

$$H = \frac{x_0 V}{S}. \quad (11.32)$$

Тогда удельное и полное сопротивления осадка будут связаны между собой выражением

$$R_{oc} = r_0 H = r_0 x_0 \frac{V}{S}. \quad (11.33)$$

С учетом этого соотношения дифференциальное уравнение фильтрации примет вид:

$$W = \frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta p}{\mu \left(r_0 x_0 \frac{V}{S} + R_{\text{фи}} \right)}. \quad (11.34)$$

При допущении постоянства удельного сопротивления осадка это дифференциальное уравнение фильтрации можно проинтегрировать в трех предельных случаях.

1. При $\Delta p = \text{const}$:

$$V^2 + \frac{2R_{\text{фи}}S}{r_0 x_0} V = 2 \frac{\Delta p S^2}{\mu r_0 x_0} \tau. \quad (11.35)$$

Поскольку при $\Delta p = \text{const}$ величины r_0 и x_0 обычно постоянны, то это уравнение применимо для сжимаемых и несжимаемых осадков.

2. При $\frac{dV}{d\tau} = \text{const}$.

При постоянной скорости фильтрации, т.е. когда скорость подачи пульпы равна скорости фильтрации, дифференциал V/τ можно заменить отношением конечных величин и уравнение фильтрации примет вид

$$\Delta p = \mu r_0 x_0 \frac{V^2}{S^2 \tau} + \mu R_{\text{фи}} \frac{V}{S\tau}, \quad (11.36)$$

а учитывая, что $W = \frac{V}{S\tau} = \text{const}$, можно записать:

$$\Delta p = \mu r_0 x_0 W^2 + \mu R_{\text{фи}} W. \quad (11.37)$$

Из уравнения видно, что для увеличения скорости фильтрации необходимо повысить давление. Это уравнение применимо только к несжимаемым осадкам, так как с ростом давления осадок сжимается и увеличивается его удельное сопротивление r_0 .

3. Если жидкость фильтруется сквозь осадок постоянной толщины, то $\Delta p = \text{const}$, $W = \text{const}$ и дифференциальное уравнение фильтрации упрощается:

$$V = \frac{\Delta p S \tau}{\mu (r_0 H + R_{\text{фи}})}. \quad (11.38)$$

Так как H постоянна, то в последнем выражении величина $x_0 \frac{V}{S}$ заменяется на H .

Данное уравнение применимо при фильтрации обратных вод через пористые фильтры для сжимаемых и несжимаемых осадков, так как $\Delta p = \text{const}$.

11.5.2. Определение оптимальных условий работы фильтров. Экономически выгодный цикл фильтрации

Наибольшая производительность фильтров (или наибольшая скорость фильтрования) наблюдается при минимальном гидравлическом сопротивлении осадка. Практически это условие равнозначно снятию осадка при минимально возможной его толщине. При непрерывной работе фильтра так и поступают. При периодической работе операция удаления осадка производится за время, которое могло быть использовано для фильтрации. Полный цикл работы на таком фильтре состоит из операций подготовки фильтра, загрузки суспензии, фильтрования, промывки осадка, продувки его и удаления. Фильтрование, промывку и продувку называют *основными операциями*. Их продолжительность прямо пропорциональна объему фильтра или толщине осадка. Подготовку фильтра, загрузку суспензии и удаление осадка называют *вспомогательными операциями*, продолжительность которых в практических расчетах может быть принята независимой от объема фильтрата или толщины осадка. Из основного уравнения фильтрации при $\Delta p = \text{const}$ следует, что для периодического процесса максимум производительности достигается при равенстве времен основных и вспомогательных операций: $\tau_{\text{осн}} = \tau_{\text{всп}}$. Однако такой цикл работы на практике невыгоден, так как часто приходится повторять вспомогательные операции, на которые расходуются энергия и материалы.

Установлено, что условная скорость фильтраций $W_{\text{ус}}$ за один цикл в единицы поверхности фильтра в зависимости от продолжительности основных операций имеет максимум (рис. 11.12), причем после его достижения (при $\tau_{\text{осн}} = \tau_{\text{всп}}$) условная скорость фильтрации уменьшается медленно. Поэтому без большого ущерба для производительности время основного цикла можно увеличить. При этом резко сокращаются эксплуатационные расходы. На практике продолжительность вспомогательных операций увеличивают в 4–6 раз по сравнению с их оптимальным теоретическим значением:

$$\frac{\tau_{\text{практ.всп}}}{\tau_{\text{теор.всп}}} = (4 \div 6). \quad (11.39)$$