

Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!

Если вы скопируете данный файл,

Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.

Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .

Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.

Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ–ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

**Приоритетный национальный проект «Образование»  
Национальный исследовательский университет**

*Л. М. МОЛОДКИНА*

## **МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ПИТЬЕВЫХ, ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по университетскому политехническому образованию в  
качестве учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по направлению подготовки  
«Техносферная безопасность»*

Санкт-Петербург

Издательство Политехнического университета

2010

УДК 628.3:504.06

ББК 20.1:38.761

М

Рецензенты

Доктор химических наук,  
профессор Санкт-Петербургского государственного  
университета технологии и дизайна *С.Ф. Гребенников*,  
Доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургского государственного  
политехнического университета *В.В. Яковлев*

*Молодкина Л.М.* **Методы очистки питьевых, природных и сточных вод: учебное пособие.** — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 275 с.

ISBN

В учебном пособии изложены теоретические основы процессов очистки природных и сточных вод, представлено базовое оборудование, применяемое для реализации каждого метода, приведены формулы и алгоритмы расчета реагентного хозяйства или оборудования.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки «Техносферная безопасность», «Защита окружающей среды», «Природообустройство и водопользование». Пособие может быть полезно для студентов, обучающихся по специальностям, связанным с защитой водных систем, в пределах других направлений.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики»

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Молодкина Л.М. 2010

© Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет, 2010

ISBN

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД. КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОВ ИХ ОЧИСТКИ. ....	10
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИМЕСЕЙ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ИХ ФАЗОВО-ДИСПЕРСНОГО СОСТОЯНИЯ.....	10
1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД.....	12
2. КАНАЛИЗОВАНИЕ И УСРЕДНЕНИЕ СТОЧНЫХ ВОД.....	15
2.1. КАНАЛИЗОВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	15
2.2. УСРЕДНЕНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	17
3. ОСАЖДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ.....	22
3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОСАЖДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ .....	22
3.2. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ГРУБОДИСПЕРСНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПЕСКОЛОВКАХ.....	25
<b>3.2.1. Характеристика и устройство песколовок</b>	26
<b>3.2.2. Расчет песколовок</b>	32
3.3. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В ОТСТОЙНИКАХ .....	36
<b>3.3.1. Характеристика и устройство первичных отстойников</b>	36
<b>3.3.2. Расчет первичных отстойников</b>	46
3.3. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В МАСЛОЛОВУШКАХ.....	57
<b>3.3.1. Движение частиц в высококонцентрированных системах</b>	57
<b>3.3.2. Устройство и характеристики маслоловушек</b>	60
4. ОСАЖДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ .....	67
4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОСАЖДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ .....	67
4.2. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В ГИДРОЦИКЛОНАХ .....	70
4.3. РАСЧЕТ ГИДРОЦИКЛОНОВ.....	83
4.4. ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ.....	90
5. ФИЛЬТРОВАНИЕ .....	99
5.1. ПРОЦЕЖИВАНИЕ .....	99

5.2. ФИЛЬТРОВАНИЕ.....	105
6. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД.....	119
6.1. ОБРАБОТКА ВОДЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ .....	119
6.2. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ВОДЫ И НА ПРИМЕСНЫЕ КОМПОНЕНТЫ.....	120
6.3. УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ .....	126
6.4. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД.....	131
6.5. СОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД.....	133
<b>6.5.1. Электроплазменные технологии</b>	133
<b>6.5.2. Радиационные технологии</b>	135
7. ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД.....	140
7.1. НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ СТОЧНЫХ ВОД .....	140
7.2. ОКИСЛЕНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ В ОЧИСТКЕ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИИ СТОЧНЫХ ВОД .....	152
7.3. ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ В ОЧИСТКЕ ПИТЬЕВЫХ И СТОЧНЫХ ВОД.....	160
8. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД.....	166
8.1. КОАГУЛЯЦИЯ И ФЛОКУЛЯЦИЯ .....	166
<b>8.1.1. Теоретические представления, лежащие в основе коагуляции и флокуляции</b>	166
<b>8.1.2. Технологические основы очистки природных и сточных вод путем коагуляции и флокуляции</b>	185
8.2. АДСОРБЦИЯ.....	193
<b>8.1.2. Теоретические представления, лежащие в основе адсорбционной очистки сточных вод</b>	193
<b>8.1.2. Технологические основы адсорбционной очистки природных и сточных вод</b>	200
8.3. ИОННЫЙ ОБМЕН .....	208
<b>8.1.2. Теоретические представления, лежащие в основе ионообменной очистки сточных вод</b>	208

8.4. ФЛОТАЦИЯ .....	222
<b>8.4.1. Флотация с диспергированием воздуха</b>	224
<b>8.4.2. Флотация с выделением воздуха из раствора</b>	227
8.5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ .....	230
<b>8.4.1. Электрохимические процессы восстановления         и окисления</b>	231
<b>8.4.2. Электрокоагуляция</b>	233
<b>8.4.3. Электродиализ</b>	234
9. БИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....	240
9.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД .....	240
9.2. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ.....	249
<b>9.2.1. Очистка сточных вод в аэротенках</b>	253
<b>9.2.2. Биологическая очистка сточных вод с одновременным                 удалением углерода, азота и фосфора</b>	264
10. ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....	270
10.1. ТЕРМИЧЕСКОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ .....	270
10.2. ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ .....	273
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	276

## ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $a$  — величина адсорбции;
- $C$  — мольно-объемная концентрация;
- $D_i$  — коэффициент диффузии  $i$ -го компонента;
- $g$  — ускорение свободного падения;
- $k$  — постоянная Больцмана;
- $K, K', K''$  — константы в уравнениях изотерм адсорбции;
- $K_{1,2}$  — константа ионного обмена;
- $m$  — масса вещества;
- $M$  — молекулярная масса;
- $N$  — число Авогадро;
- $n$  — число молей вещества;
- $n_+, n_-$  — числа переноса катионов и анионов;
- $R$  — универсальная газовая постоянная;
- $Re$  — число Рейнольдса;
- $S_{уд}$  — удельная поверхность;
- $T$  — температура, К;
- $t$  — температура, °С;
- $u_0$  — гидравлическая крупность;
- $V$  — объем;
- $w$  — угловая скорость;
- $v_\tau$  — тангенциальная скорость;
- $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды (относительная);
- $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума);
- $\zeta$  — электрокинетический потенциал;
- $\rho$  — плотность дисперсной фазы;
- $\rho_0, \rho_{ср}$  — плотность дисперсионной среды;
- $\pi$  — осмотическое давление;
- $\sigma$  — поверхностное натяжение;

$\tau$  — время;

$\psi_0$  — потенциал границы раздела фаз;

$\psi_1$  — штерновский потенциал;

БПК<sub>полн</sub> — биохимическое потребление кислорода полное;

Г — адсорбция Гиббса;

Д — дисперсность;

П — пористость носителя;

ВМС — высокомолекулярные соединения;

ВМФ — высокомолекулярные флокулянты;

ДЭС — двойной электрический слой;

ПДК — предельно допустимая концентрация;

ЭМИ — электромагнитное излучение.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие создано в качестве базового при освоении дисциплины «Методы очистки питьевых, природных и сточных вод», студентами, обучающимся по программе «Техносферная безопасность водных систем» магистерского направления «Техносферная безопасность».

К объектам профессиональной деятельности выпускников высшей школы по данному направлению относятся методы и средства защиты человека и среды обитания от опасностей. Одной из опасностей, которой постоянно подвергается гидросфера, является сброс неочищенных и мало очищенных бытовых и производственных сточных вод. А одной из опасностей, которой также постоянно подвергается человек, является потребление недостаточно чистой питьевой воды. Поэтому методы очистки питьевых, природных и сточных вод относятся к средствам защиты от опасностей и человека, и водной среды.

В задачи учебного пособия входит освоение студентами теоретических знаний и практических приемов расчетов по основным группам методов очистки различных водных систем. Поэтому в большинстве разделов учебного пособия сначала даются теоретические основы методов очистки вод, затем приводится информация о технологических процессах и базовом оборудовании, применяемом при реализации методов, а также расчеты основных параметров процессов и оборудования.

Одной из поставленных задач учебного пособия являлось приложение знаний, полученных студентами ранее в разных дисциплинах, к вопросам очистки природных и сточных вод.

Материал учебного пособия тесно связан с рядом разделов таких дисциплин, как аналитическая химия, физика, коллоидная химия, биотехнология, без знания которых могут возникнуть сложности в освоении изложенного материала. И хотя по каждому методу водо-

очистки в пособии представлена основополагающая информация, она, естественно, не является полной. Поэтому при освоении учебного пособия потребуется самостоятельное повторение соответствующих разделов названных дисциплин.

В учебном пособии не даются примеры расчетов процессов и конструкций, поскольку этот материал выносится на практические занятия. Формулы и алгоритмы расчетов, представленных в пособии, используются на аудиторных занятиях, в процессе самостоятельной работы и при выполнении курсового проекта.

Методики расчетов в основном опираются на нормативные документы, в первую очередь, на СНиП. Также привлечены подходы, предлагаемые ведущими специалистами в данной области.

Материалы, изложенные в пособии, особенно, теоретической направленности, описывают более широкие, чем водоочистка, явления и процессы поведения ионно- и молекулярно растворенных веществ, коллоидных и взвешенных частиц минеральной и органоминеральной природы во всех водных системах, поэтому могут служить также основой для мониторинга, защиты и регулирования состояния природных и природно-технических водных систем.

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД. КЛАССИФИКАЦИИ МЕТОДОВ ИХ ОЧИСТКИ.

## 1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИМЕСЕЙ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ИХ ФАЗОВО-ДИСПЕРСНОГО СОСТОЯНИЯ

Классификация примесей воды на основе их фазово-дисперсного состояния, предложенная Л.А. Кульским<sup>1</sup>, является наиболее универсальной, поскольку охватывает все виды примесей и определяет выбор методов их анализа и удаления из воды, либо обезвреживания. В данной классификации все водные системы делятся на гетерогенные (многофазные<sup>2</sup>, имеющие границы раздела фаз) и гомогенные (однофазные). Внутри класса гетерогенных систем примеси подразделяются по размерам на две группы, которые соответствуют грубодисперсным и истинно коллоидным системам. Внутри класса гомогенных систем примеси также подразделяются на две группы по наличию заряда (зарядов), что соответствует молекулярным и ионным растворам. Деление водных систем на группы и основные представители всех групп приведены в табл. 1 в варианте, предложенном

---

<sup>1</sup> Академик АН УССР заслуженный деятель науки и техники УССР профессор Леонид Адольфович Кульский — известный специалист в области очистки и обеззараживания природных и сточных вод. Он является одним из создателей нового направления химической технологии — химии и технологии очистки воды. Л.А. Кульский своими трудами заложил теоретическую основу для разработки важных проблем химической очистки природных и промышленных сточных вод.

<sup>2</sup> Фаза — часть системы, ограниченная от других частей поверхностью раздела и характеризующаяся в отсутствие внешнего поля одинаковыми химическими и физическими свойствами во всех своих точках. Гомогенная система состоит из одной фазы, следовательно, имеет одинаковые макроскопические свойства во всех ее точках. Гетерогенная система состоит из двух или более фаз.

Л.А. Кульским. Графы «методы контроля» дополнены современными методами анализа, с которыми студенты, специализирующиеся в области инженерной охраны окружающей среды, уже познакомились в дисциплинах «Аналитическая химия и физико-химические методы анализа» и «Коллоидная химия».

Таблица 1.1

### Классификация примесей воды на основе фазово-дисперсного состояния

Системы	Гетерогенные			Гомогенные		
Группы	I	II	III	IV		
Физико-химическая характеристика	Суспензии и эмульсии	Коллоидно-растворенные вещества	Молекулярно-растворенные вещества	Вещества диссоциированные на ионы		
Размеры, м	$10^{-3}$ $10^{-4}$ $10^{-5}$ $10^{-6}$	$10^{-7}$ $10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$		
Основные представители	<p>↔ ↔</p> <p>крупная взвесь тонкая взвесь</p> <p>↔</p> <p>планктон</p> <p>↔</p> <p>бактерии</p>	<p>↔</p> <p>гидрофобные коллоиды</p> <p>↔</p> <p>гуминовые вещества</p> <p>↔</p> <p>вирусы</p>	<p>↔</p> <p>растворенные газы</p> <p>↔</p> <p>органические вещества</p> <p>↔</p> <p>органические электролиты</p>	<p>↔</p> <p>катионы</p> <p>↔</p> <p>анионы</p>		
Методы контроля	<p>↔</p> <p>световая микроскопия</p> <p>↔</p> <p>поточная ультрамикроскопия</p> <p>↔</p> <p>микро- ультра- нано- фильтрация</p> <p>↔</p> <p>седиментация в гравитационном центробежном полях</p> <p>↔</p> <p>спектро- турбидиметрия</p>	<p>↔</p> <p>электронная микроскопия</p> <p>↔</p> <p>ультра- нано- фильтрация</p> <p>↔</p> <p>турбидиметрия</p> <p>↔</p> <p>нефелометрия</p>	<p>↔</p> <p>эксклюзионная хроматография</p> <p>↔</p> <p>адсорбционная и распределительная хроматография</p> <p>↔</p> <p>фотометрия, спектрофотометрия</p>	<p>↔</p> <p>кондуктометрия</p> <p>↔</p> <p>вольтамперометрия</p> <p>↔</p> <p>потенциометрия</p> <p>↔</p> <p>ионообменная хроматография</p>		

## 1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД

В табл. 1.2 приведены процессы, которые были рекомендованы Л.А. Кульским для удаления из природных и сточных вод примесей I – IV групп (в соответствии с представленной выше классификацией примесей).

Таблица 1.2

### Процессы, используемые для удаления из природных и сточных вод примесей четырех групп по классификации Кульского

I группа	II группа	III группа	IV группа
Механическое безреагентное разделение (отстаивание, фильтрация, микропроцеживание, центрифугирование)	Мембранное разделение (диализ, микрофильтрация)	Аэрирование, эвапорация, десорбция газов и летучих органических соединений при аэрировании	Гиперфильтрация
Адгезия на гидроксидах алюминия или железа, а также на зернистых и высокодисперсных материалах	Адсорбция на гидроксидах алюминия или железа, а также на зернистых и высокодисперсных глинистых минералах	Адсорбция на активированном угле и других материалах	Фиксация ионов на твердой фазе ионитов
Флотация суспензий и эмульсий	Коагуляция коллоидных систем	Экстракция органическими растворителями	Сепарация ионов при различном фазовом состоянии воды
Агрегация флокулянтами	Агрегация высокомолекулярными флокулянтами катионного типа	Ассоциация молекул	Перевод ионов в малорастворимые соединения
Окисление хлором, озоном и др.	Окисление хлором, озоном и др.	Окисление хлором, оксидом хлора, озоном, перманганатом калия	Перевод ионов в малодиссоциированные соединения

Таблица 1.2 (окончание)

I группа	II группа	III группа	IV группа
Бактерицидное воздействие на патогенные микроорганизмы и споры	Вирулицидное воздействие	Биохимическое разложение	Выделение ионов металлов микроорганизмами
Электрофильтрация и электроудерживание микроорганизмов	Электрофорез и электродиализ	Поляризация молекул и электрическом поле	Использование подвижности ионов и электрическом поле

Почти в каждой строке приведенной таблицы скомпонованы процессы, близкие по принципам воздействия на примеси четырех групп. В отдельных строках четыре группы объединены по другому принципу — например, в предпоследней строке перечислены методы, имеющие отношение к биологическим структурам (бактериям и вирусам). При этом в одну строку попадают как методы инактивации вирусов и бактерий, так и методы, использующие микроорганизмы для биохимического окисления органических примесей, либо восстановления катионов до нейтральных молекул с последующей фиксацией на клеточной поверхности.

Большее распространение получила классификация методов очистки различных типов вод, приведенная в табл. 1.3 в ее общепринятом виде. Однако термин «механические» почти не применим к методам, перечисленным в первом столбце. Только процеживание воды, содержащей крупноразмерные примеси, через решетки (здесь процеживание входит в понятие «фильтрация») может быть отнесено к механическим методам. Во втором столбце методы окисления и восстановления искусственно разделены, хотя в химическом варианте окислительно-восстановительная реакция представляет собой единство двух противоположных превращений — окисления и восстановления, происходящих одновременно и без отрыва одного от другого. И только в электрохимическом варианте полуреакции восстановления и окисления протекают отдельно, каждая на своем электроде. Однако электрохимические методы очистки относятся к другой группе (к фи-

зико-химическим методам). Выделение диализа в отдельный метод также не совсем правильно — в варианте «электродиализ» он относится к электрохимическим методам, а диализ в отсутствие электрического поля — к мембранным методам.

Таблица 1.3

**Методы очистки природных и сточных вод**

Механические и физические	Химические	Физико-химические	Термические	Биохимические
Осаждение в гравитационном поле	Нейтрализация	Ионный обмен	Низкотемпературные	Аэробные
Осаждение в центробежном поле	Окисление	Коагуляция	Высокотемпературные	Анаэробные
Фильтрация	Восстановление	Коалесценция		
Адгезия	Химическое осаждение	Флокуляция		
Обработка в электромагнитном поле		Флотация		
Ультразвуковое воздействие		Адсорбция		
Ультрафиолетовое облучение		Мембранная фильтрация		
Разделение в электрическом поле		Диализ		
		Электрохимические		

Несмотря на отмеченные недостатки классификации, приведенной в табл. 1.3, в дальнейшем мы будем использовать именно ее, внося поправки в соответствующих разделах.

**Задание 1**

1. Объясните, в чем разница между гомогенными и гетерогенными системами.
2. Объясните, чем обосновано применение тех или иных методов для анализа примесей четырех групп в классификации Кульского.
3. Объясните, чем различаются классификации методов очистки природных и сточных вод, приведенные в табл. 1.2 и 1.3.

## **2. КАНАЛИЗОВАНИЕ И УСРЕДНЕНИЕ СТОЧНЫХ ВОД**

### **2.1. КАНАЛИЗОВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Эффективность систем очистки промышленных сточных вод в существенной степени зависит от группировки отдельных видов стоков и систем их канализования. На всех предприятиях целесообразно выделение ливневой канализации, разделение канализации бытовых сточных вод и канализации производственных стоков.

Производственные сточные воды в зависимости от минерализации, совместимости содержащихся в них соединений и содержания продуктов, представляющих техническую ценность, должны транспортироваться отдельными системами канализационных сетей.

Схема канализования конкретного предприятия выбирается в зависимости от наличия на нем отдельных групп сточных вод. Наиболее простая и старая схема общесплавной канализации (рис.2.1, а) применяется, если минерализация смеси ливневых, бытовых и производственных сточных вод допускает совместную биологическую очистку сточных вод, а общее количество сбрасываемых со сточными водами минеральных солей не изменяет солесодержания воды в водоеме-приемнике очищенных стоков более чем на величину, определяемую ПДК.

Если территория предприятия не загрязнена токсичными продуктами производства, то ливневые воды можно сбрасывать в водоем непосредственно или после отстаивания в контрольном бассейне (рис. 2.1, б). При наличии такого бассейна отстоянные ливневые воды могут быть использованы для производственного водоснабжения, например, для подпитки систем оборотного водоснабжения.

На том же рис. 2.1, б, отвечающем случаю раздельной канализации с двумя сетями, условно чистые производственные сточные воды (не бывшие в контакте с продуктами производства и отличающиеся

от чистой воды лишь температурой и содержанием взвешенных веществ) могут поступать в ливневую канализацию. В этом варианте минерализация смеси бытовых и производственных сточных вод допускает их совместную биологическую очистку.

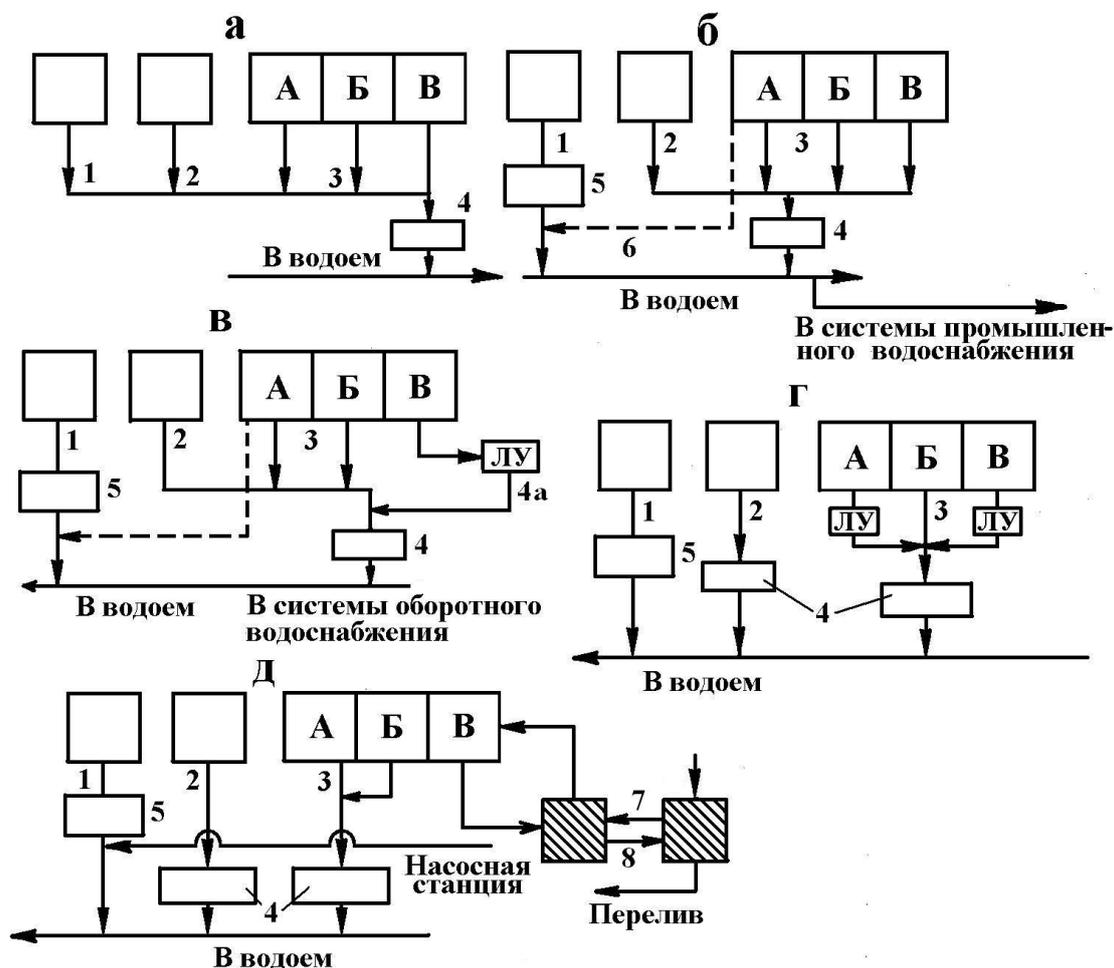


Рис. 2.1. Схемы канализования сточных вод:

- а — общесплавная, б — раздельная с двумя сетями, в — раздельная с местными очистными установками, г — раздельная с тремя сетями, д — раздельная с использованием производственных сточных вод для оборотного водоснабжения: 1 — ливневые воды, 2 — бытовые воды, 3 — производственные воды, 4 — очистные сооружения, 4а — местные очистные установки, 5 — контрольный бассейн для отстоя ливневых вод, 6 — условно чистые производственные воды; 7 — добавка свежей воды, 8 — охладительные сооружения; А, Б, В — цехи; ЛУ — локальные очистные установки

В ряде производств или отдельных технологических операциях могут образовываться сточные воды, загрязненные преимущественно одним или несколькими веществами, представляющими техническую ценность. Такие стоки подаются по отдельным линиям на локальные очистные сооружения для извлечения и регенерации ценных продуктов. Воды, очищенные на локальных очистных сооружениях, могут возвращаться в цех для повторного использования или сбрасываться в общий коллектор с другими сточными водами для их последующей очистки на общезаводских очистных сооружениях (рис. 2.1, в.).

В тех случаях, когда минерализация или состав производственных сточных вод не позволяет направлять их на биологическую очистку, таким образом, не допускает совместной очистки производственных и бытовых сточных вод, канализацию стоков осуществляют по трехсетевой (или более) схеме. Так, на рис. 3.1, г, приведен случай подачи производственных сточных вод на очистные сооружения, использующие физико-химические методы очистки. Это вариант может также использоваться, если производственные стоки не загрязнены растворенными органическими веществами.

На рис. 2.1, д, приведена схема отдельного трехсетевого канализования с использованием производственных сточных вод для оборотного водоснабжения и сбросом ливневых и очищенных бытовых сточных вод в водоем.

## **2.2. УСРЕДНЕНИЕ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Усреднение сточных вод перед поступлением на очистные сооружения необходимо в тех случаях, когда расход сточных вод или концентрация в них загрязнений подвергается значительным колебаниям в течение относительно короткого времени (смены или суток). Равномерный расход сточных вод, поступающих на очистку, позволяет добиться значительной экономии электроэнергии при эксплуатации сооружений и повышает надежность их работы. Применение усреднителей, выравнивающих расход и концентрацию сточных вод, по-

зволяет разрабатывать более экономичные проекты очистных сооружений, принимая для расчета усредненные данные.

Различают три вида нестационарности потока:

- залповые сбросы концентрированных сточных вод,
- циклические колебания,
- произвольные (случайный) характер колебаний.

Тип усреднителя выбирают с учетом характера колебаний концентрации загрязняющих веществ, а также вида и количества взвешенных веществ (см. табл. 2.1).

При небольших расходах воды и периодическом сбросе применяют контактные усреднители. Но, как правило, применяют усреднители проточного типа. Среди них различают:

- многоканальные — прямоугольные в плане (конструкции Д.М. Ванякина) и круглые (конструкции Д.А. Шпилева) с неравномерным распределением расхода воды по каналам;
- усреднители-смесители (с перемешивающими устройствами) барботажного типа и с механическим перемешиванием.

Таблица 2.1

**Область применения усреднителей различных типов**

Тип усреднителя	Характер нестационарности	Взвешенные вещества	
		Концентрация, мг/л	Гидравлическая крупность, мм/с
Многоканальный	Залповый	≤500	≤5
Баборажный	Любой	≤500	≤10
С механическим перемешиванием	Любой	>500	-

Схема многоканального усреднителя конструкции Ванякина представлена на рис. 2.2. Усреднение сточных вод в таком устройстве происходит путем распределения потока воды, поступающей в распределительный колодец, на несколько струй, протекающих по коридорам усреднителя. Коридоры имеют разную длину, поэтому в сборном лотке происходит смешивание струй воды, поступивших в рас-

пределительный колодец в разное время. Таким путем смешиваются воды с разной концентрацией.

На рис. 2.3 представлена схема барботажного усреднителя, в котором усреднение достигается за счет интенсивного перемешивания воды, которое обеспечивается барботированием сточных вод воздухом. Одним из важных условий эффективного усреднения является максимально равномерное распределения сточных вод по площади усреднителя. Для этого используют системы подающих с придонными водосливными окнами или треугольными водосливами.

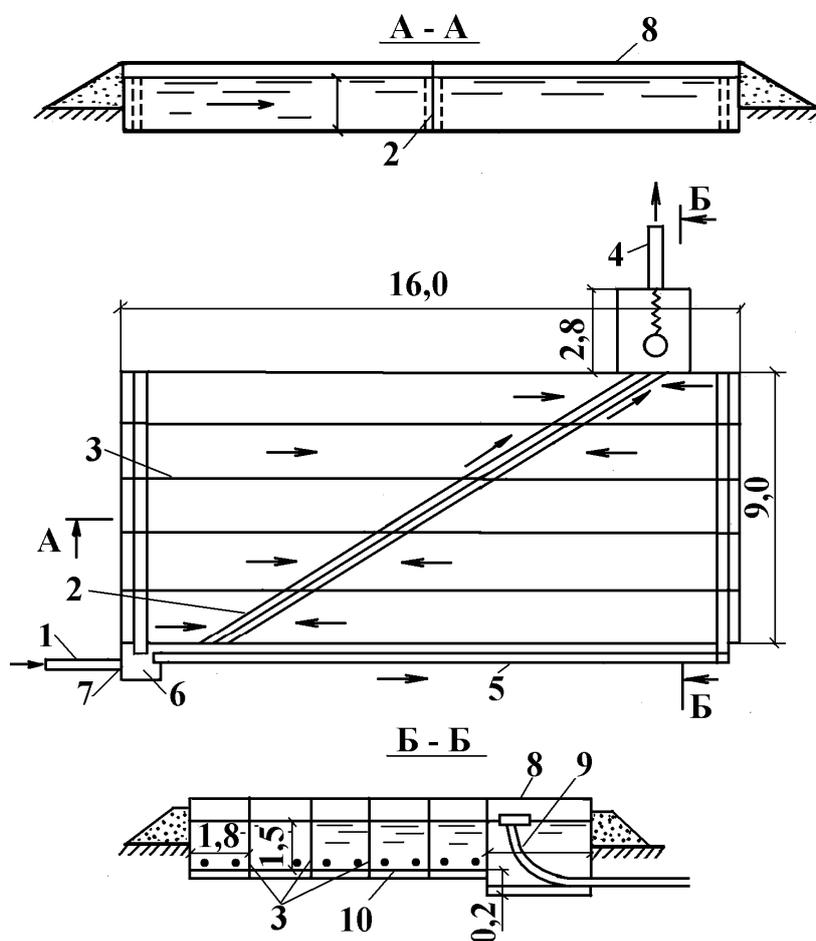


Рис. 2.2. Усреднитель прямоугольной формы с дифференцированием потока сточных вод: 1 — подача сточных вод, 2 — деревянная диагональная перегородка и сборный желоб, 3 — деревянные перегородки, 4 — отвод воды, 5 — желоб для подачи сточных вод, 6 — распределительный колодец, 7 — шибер, 8 — настил, 9 — плавающий рукав, 10 — дырчатые воздухопроводы

Наиболее целесообразной является самотечная подача стоков, иначе (при напорной подаче) перед усреднителем необходимо устанавливать колодец гашения напора.

В качестве барботеров используют перфорированные трубы с отверстиями диаметром 3 мм, прокладываемые горизонтально на подставках высотой 6 – 10 см. Барботеры бывают пристенные, которые создают один циркуляционный поток, и промежуточные, создающие два циркуляционных потока.

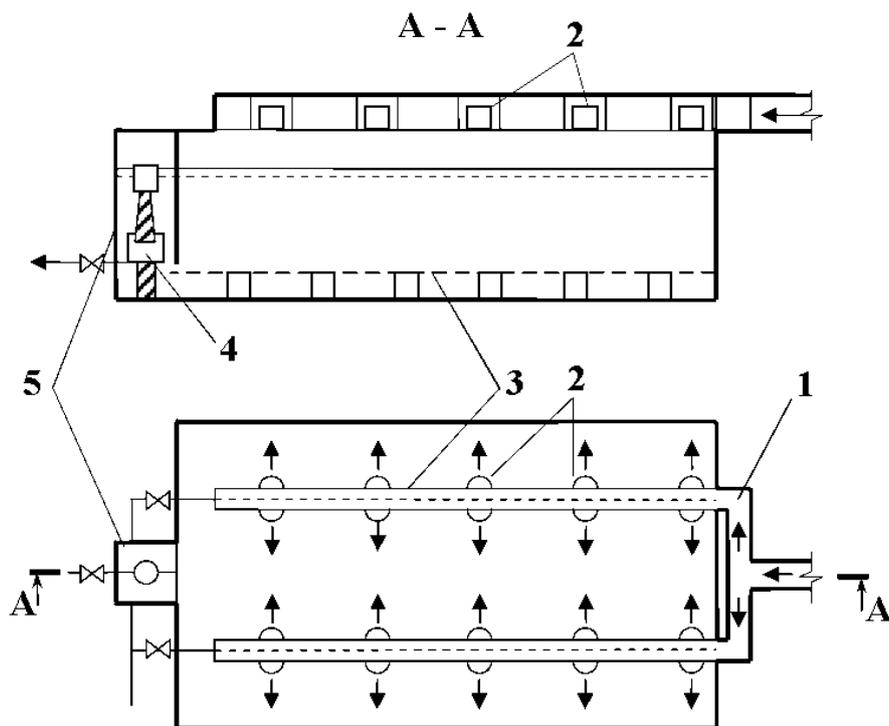


Рис. 2.3. Усреднитель с барботированием воды: 1 — подающий лоток, 2 — впускные отверстия, 3 — барботер, 4 — выпускное отверстие, 5 — выпускная камера

Для усреднителя-накопителя рассчитывают объем рабочего резервуара  $W$ , м<sup>3</sup>

$$W = \sum_{i=1}^T q_i, \quad (2.1)$$

где  $T$  — продолжительность цикла усреднения,  $q_i$  — расход сточной воды за каждый час усреднения, м<sup>3</sup>.

Концентрация загрязнителей в усредненной вода равна

$$C_y = \frac{\sum_{i=1}^T q_i \cdot C_i}{W}, \quad (2.2)$$

где  $C_i$  — концентрация загрязнений, г/м<sup>3</sup>, в поступающей за каждый час воде.

Для усреднителя прямоугольной формы с дифференцированием потока сточных вод объем рабочего резервуара равен

$$W = \frac{\sum_{i=1}^T q_i}{2\eta}, \quad (2.3)$$

где  $\eta$  — коэффициент запаса, примерно равный 0,7.

Полная длина усреднителя  $L$ , м, находится по выражению

$$L = \frac{\sum_{i=1}^T q_i}{2\eta \cdot N \cdot b \cdot H}, \quad (2.4)$$

где  $N$  — количество коридоров,  $b$  — ширина коридора, м,  $H$  — глубина коридора, м ( $b = 2H$ ).

Расчет всех типов усреднителей при залповом сбросе, циклических колебаниях и произвольном характере колебаний см. в СНиП 2.04.03-85.

Поскольку сточные воды находятся в усреднителях довольно длительное время (часы), то их устанавливают в технологической схеме обычно после первичных отстойников (обязательно после песколовки, в которой вода находится 1 – 2 минуты). Если усреднитель установлен до отстойника, то необходимо принять меры для недопущения выпадения осадка на дно сооружения.

### ***Задание 2***

1. Выберите тип усреднителя для залпового выброса, концентрации взвешенных примесей 300 мг/л и гидравлической крупности взвешенных примесей 4 мм/с.

2. Объясните принцип действия усреднителя прямоугольной формы с дифференцированием потока сточных вод

### 3. ОСАЖДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

#### 3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОСАЖДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

В грубодисперсных системах частицы дисперсной фазы постепенно оседают (если их плотность  $\rho$  больше плотности среды  $\rho_0$ ) или всплывают (при  $\rho < \rho_0$ ) под действием силы тяжести (веса  $P$ ). При движении частицы в жидкой или газообразной среде возникает встречная сила вязкого сопротивления среды  $f_{\text{сопр}}$ , возрастающая с увеличением скорости  $v$  согласно закону Стокса, вплоть до установления стационарного режима, в котором равноускоренное вначале движение становится равномерным, следовательно

$$P - f_{\text{сопр}} = 0. \quad (3.1)$$

Выведем из выражения (3.1) связь между скоростью осаждения и размером частицы. Сила тяжести равна

$$P = g \cdot m', \quad (3.2)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $m' = m - m_0$  — эффективная масса частицы;  $m$  — масса частицы;  $m_0$  — масса дисперсионной среды, объем которой равен объему частицы.

Сила сопротивления среды определяется как

$$f_{\text{сопр}} = \omega v = 3\pi\eta d v, \quad (3.3)$$

где  $\omega$  — коэффициент вязкостного сопротивления;  $\eta$  — коэффициент вязкости;  $d$  — диаметр частицы,  $v$  — скорость движения частицы.

Для шарообразных частиц получаем

$$g \cdot \frac{\pi d^3}{6} \cdot (\rho - \rho_0) = 3\pi\eta d v, \quad (3.4)$$

отсюда

$$d^2 = 18 \frac{\eta}{g \cdot (\rho - \rho_0)} \cdot \nu. \quad (3.5)$$

Следовательно,

$$d = \sqrt{18 \frac{\eta}{g \cdot (\rho - \rho_0)} \cdot \nu} \quad (3.6)$$

или

$$\nu = \frac{g(\rho - \rho_0)}{18\eta} \cdot d^2. \quad (3.7)$$

Возможность применения закона Стокса к оседанию частиц в жидкой среде ограничена рядом условий, некоторые из них перечислены ниже:

1. частицы должны быть сферическими; в противном случае используют эквивалентный диаметр;
2. частицы должны иметь одинаковую плотность;
3. должно отсутствовать взаимодействие между частицами (в том числе, частицы не должны коагулировать в процессе осаждения);
4. необходимо постоянство температуры;
5. частицы должны быть твердыми и гладкими, чтобы не образовывались микропотоки;
6. должно отсутствовать скольжение между оседающей частицей и средой;
7. оседание должно происходить в спокойной жидкости;
8. скорость оседания не должна превышать предела, за которым движение становится турбулентным.

Последнее условие в гидродинамике принято записывать с помощью числа Рейнольдса (Re)

$$Re = \frac{\nu \cdot d \cdot \rho_0}{\eta}, \quad (3.8)$$

причем  $\nu$  и  $d$  относятся к частице,  $\eta$  и  $\rho_0$  к среде.

При ламинарном течении  $Re < 2$ , в этом случае сила сопротивления описывается формулой Стокса.

В общем виде

$$f_{\text{сопр}} = \zeta_{\text{сопр}} \cdot s \frac{v^2 \cdot \rho_0}{2}, \quad (3.9)$$

где  $\zeta_{\text{сопр}}$  — коэффициент сопротивления;  $s$  — проекция поперечного сечения частицы на направление ее движения.

Значения коэффициента сопротивления, соответствующие различным интервалам значений числа Рейнольдса, представлены в табл. 3.1 и на рис. 3.1.

Подстановка в выражение (3.9) значений коэффициента сопротивления для ламинарного режима, а также проекции поперечного сечения сферической частицы на направление ее движения, равной  $\pi d^2/4$ , приводит к выражению

$$f_{\text{сопр}} = \zeta_{\text{сопр}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_0}{2} = \frac{24\pi d^2 \cdot v^2 \cdot \rho_0 \cdot \eta}{4 \cdot 2 \cdot v \cdot d \cdot \rho_0} = 3\pi\eta d, \quad (3.10)$$

которое идентично выражению (3.3) и приводит к зависимости скорости осаждения от диаметра (3.7).

Таблица 3.1

**Коэффициенты сопротивления и характер зависимостей скорости осаждения частиц от диаметра при разных числах Рейнольдса**

Область	По Стоксу	По Аллену	По Ньютону
Режим	Ламинарный	Промежуточный	Турбулентный
Re	< 2	2...500	500...150000
$\zeta_{\text{сопр}}$	$\frac{24}{\text{Re}}$	$\frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}$	~0,44
$v = f(d)$	$v = A' \cdot d^2$	$v = A'' \cdot d^{1,143}$	$v = A''' \cdot d^{0,5}$

Примечание:  $A', A'', A'''$  — константы, не зависящие от диаметра частиц

Аналогичное определение силы сопротивления для промежуточного и турбулентного режима и подстановка ее в выражение (3.1) дает, соответственно, зависимости скорости оседания частицы от диаметра в степени 1,143 и от корня квадратного из диаметра. Общий вид зависимостей скорости оседания частиц от диаметра представлен в последней строке табл. 3.1, а также на рис. 3.2.

Область I на рис. 3.2 соответствует преобладанию вклада броуновского движения в смещение частицы над седиментацией в гравитационном поле, что характерно для частиц второй группы классификации Кульского (подразд. 1.1). Таким образом, частицы коллоидных размеров невозможно осадить в сооружениях, предназначенных для очистки природных и сточных вод методами седиментации в гравитационном поле (в песколовках, отстойниках).



Рис. 3.1 Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для трех режимов потока

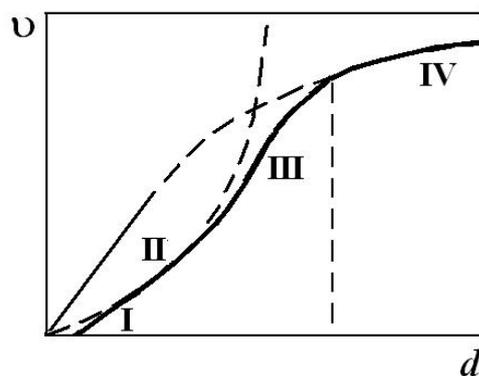


Рис. 3.2 Зависимость скорости оседания частиц от их диаметра: I – область броуновского движения; II – ламинарный режим; III – промежуточный; IV – турбулентный

### 3.2. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ГРУБОДИСПЕРСНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПЕСКОЛОВКАХ

Согласно одной из классификаций свободнодисперсных систем по дисперсности, к грубодисперсным относятся системы, частицы которых имеют размер 0,1 мкм...0,1 мм. Согласно другой классификации — системы с частицами размером свыше 10 мкм. Одним из представителей таких примесей в природных и сточных водах является песок. Так, например, из общего количества загрязнителей, содержащихся в бытовых сточных водах, 5 – 10 % составляют нерастворенные минеральные загрязнения, из них 70 – 90 % песок. Наличие песка в сточной воде отрицательно влияет на работу очистных сооружений,

приводит к быстрому износу насосов и оборудования очистных сооружений.

Для улавливания песка применяют песколовки. Их также используют для очистки сточных вод от окалины, шлака, боя стекла и др. Традиционно песколовки использовали для удаления примесей с гидравлической крупностью не менее 11 мм/с (гидравлической крупностью называют скорость осаждения примесей в стоячей воде при температуре 10 °С). Однако в последние годы изменился качественный состав песка в бытовых сточных водах, и в настоящее время песколовки используют и для удаления примесей с гидравлической крупностью до 2 мм/с.

Песколовки устанавливают при пропускной способности станции очистки сточных вод более 100 м<sup>3</sup>/сут. В зависимости от направления движения воды песколовки подразделяются на горизонтальные, вертикальные, тангенциальные, аэрируемые и др.

### 3.2.1. Характеристика и устройство песколовок

**Горизонтальные песколовки** — уширенные каналы, в которых под действием силы тяжести песок выпадает в осадок. Скорость течения воды составляет 0,15 – 0,30 м/с; продолжительность пребывания воды в сооружении — 30 – 60 секунд (при максимальном расходе сточных вод). Рекомендуются при расходах свыше 10000 м<sup>3</sup>/сут. Простейшая схема горизонтальной песколовки представлена на рис. 3.3.

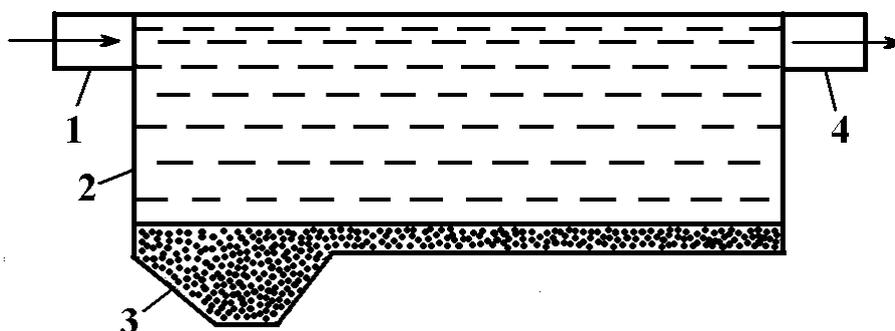


Рис. 3.3. Схема горизонтальной песколовки: 1 — входной патрубок, 2 — корпус песколовки, 3 — шламособорник (бункер, песковой приемок), 4 — выходной патрубок

Входная часть песколовки представляет собой канал, ширина которого равна ширине самой песколовки; выходная — канал, ширина которого сужена от ширины песколовки до ширины отводящего канала. Бункер для сбора осадка обычно располагается в начале песколовки под днищем. Возможно устройство бункера и над песколовкой.

Песколовки содержат механизмы для перемещения осадка в бункер, гидроэлеваторы и насосы для удаления осадка из песколовки и транспорта его к месту обезвоживания.

Применяют два типа механизмов для перемещения осадка — цепные и тележечные. Цепные механизмы содержат две бесконечные цепи, расположенные по краям песколовки, с закрепленными на них скребками. Тележечные механизмы содержат тележку, перемещающую по одному или двум рельсам вперед и назад, на которой подвешен скребок. При движении к бункеру скребок опущен, при возвратном — поднимается.

Можно также применять гидромеханические системы (рис. 3.4) — по дну в лотках уложены смывные трубопроводы со sprысками, сориентированными в сторону бункеров для сбора осадка. В этом случае бункеры выполняют в виде круглых тангенциальных песколовочек (см. ниже).

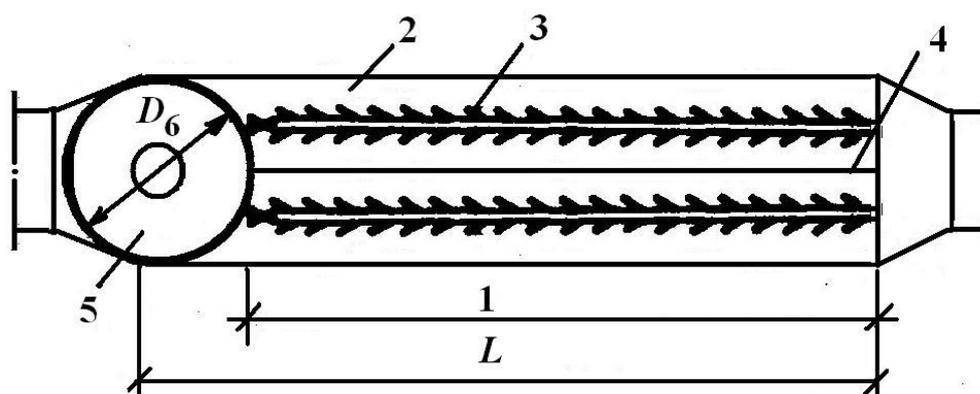


Рис. 3.4. Схема горизонтальной песколовки с гидромеханической системой удаления осадка: 1 — проточная часть песколовки; 2 — песковой лоток; 3 — смывной трубопровод; 4 — перегородка; 5 — песковой бункер

**Вертикальные песколовки** — цилиндрические или призматические резервуары с подводом воды в основание сооружения. Вода движется снизу вверх, скорость восходящего потока равна 0,02 — 0,05 м/с; продолжительность пребывания воды в сооружении — 2 — 2,5 минуты. Рекомендуется для расходов ниже 10000 м<sup>3</sup>/сут. Скорость восходящего потока должна быть меньше гидравлической крупности песчинок улавливаемого песка. Схема вертикальной песколовки представлена на рис. 3.5.

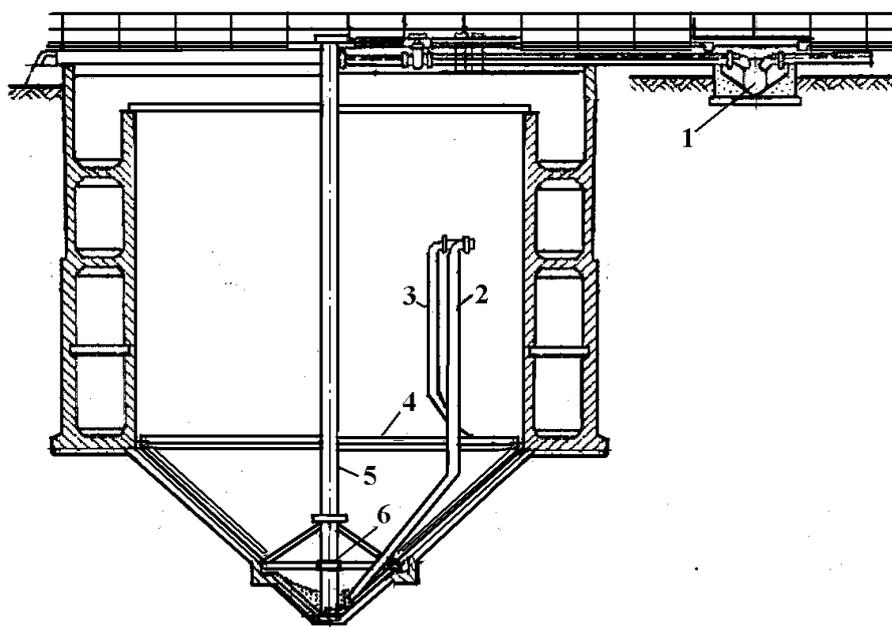


Рис. 3.5. Вертикальная песколовка: 1 — отводящий лоток ( $i = 0,01$ ); 2, 3, 4, 5 — трубопроводы для подачи воды к гидроэлеватору, кольцевой для смыва осадка, для подачи к нему воды, напорный; 6 — гидроэлеватор

**Тангенциальные песколовки** — форма круглая в плане с подводом воды по касательной к наружной стенке сооружения (по периферии вода движется вниз, а в центре — вверх). Такое движение воды способствует поддержанию в потоке органических примесей. При этом скорость вращательного движения невелика и не препятствует выпадению песка в осадок.

Вода приобретает дополнительное вращательное и винтовое движение, что способствует более интенсивному выпадению песка из

сточной воды. Время нахождения воды в сооружении — 30–60 секунд, нагрузка — 70 – 130 м<sup>3</sup> воды на 1 м<sup>2</sup> поверхности сооружения в 1 час. Рекомендуется применять при расходах до (50 – 70)·10<sup>3</sup> м<sup>3</sup>/сут.

Схема тангенциальной песколовки приведена на рис. 3.6.

В последнее время получили распространение тангенциальные песколовки со шнековым пескопромывателем. При скорости движения сточной воды в подающем лотке 0,7 – 1,1 м/с задерживается 92 – 98 % содержащегося в сточной воде песка с гидравлической крупностью 18 – 24 мм/с. Схема подобной установки приведена на рис. 3.7.

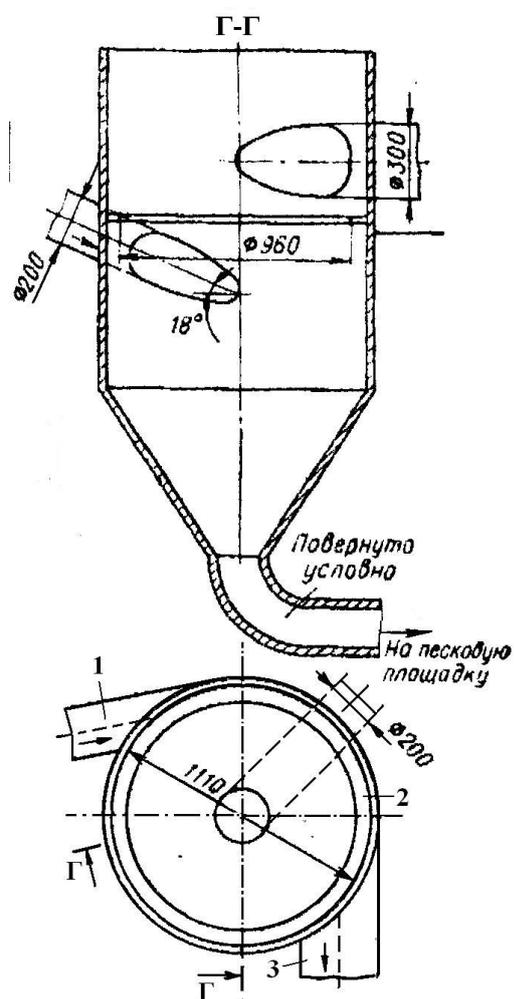


Рис. 3.6. Тангенциальная песколовка: 1 — подающая труба; 2 — кольцо; 3 — отводящая труба

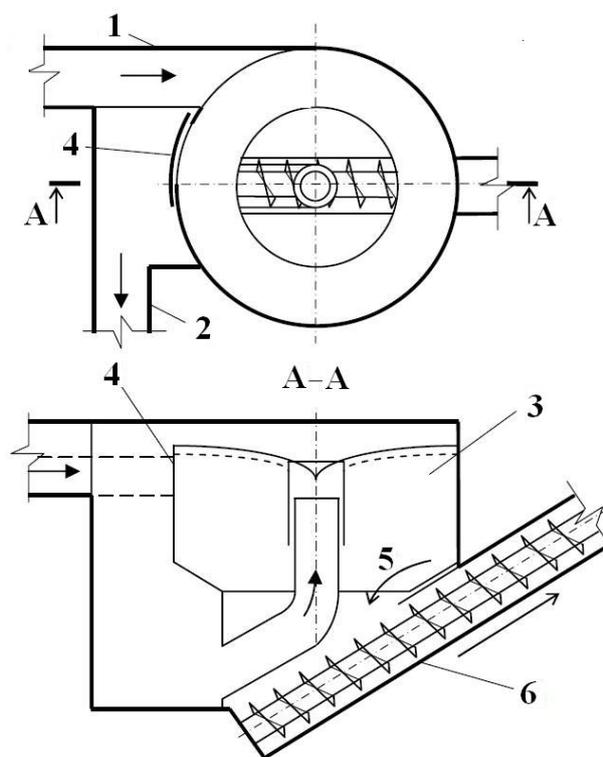


Рис. 3.7. Тангенциальная песколовка с вихревой водяной воронкой: 1 — подводящий канал; 2 — отводящий канал; 3 — рабочая часть; 4 — регулируемый водослив; 5 — песок; 6 — шнековый подъемник

**Аэрируемые песколовки** имеют удлиненную форму в плане и прямоугольное, полигональное многоугольное) или близкое к эллиптическому поперечное сечение. Важнейшие элементы песколовок: входная и выходная части, бункер для сброса осадка и песковой лоток (см. рис.3.8). Последний расположен вдоль одной из продольных стенок сооружения. Днище песколовки в поперечном сечении имеет уклон в сторону лотка. Вдоль одной из стенок на глубине  $2/3$  от общей гидравлической глубины расположен аэратор, выполненный из дырчатых труб. Аэрация жидкости создает вращательное движение воды в песколовке. Вращательное и поступательное движение приводит к винтовому. Песколовка оборудована гидромеханической системой удаления осадка, которая представляет собой смывной трубопровод со sprысками, уложенный по днищу пескового лотка. Для удаления можно применять и скребковые механизмы. Рекомендуются при расходе сточных вод свыше  $20000 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Оптимальная интенсивность аэрации —  $3 - 5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , при этом зольность осадка равна  $90 - 95 \%$ .

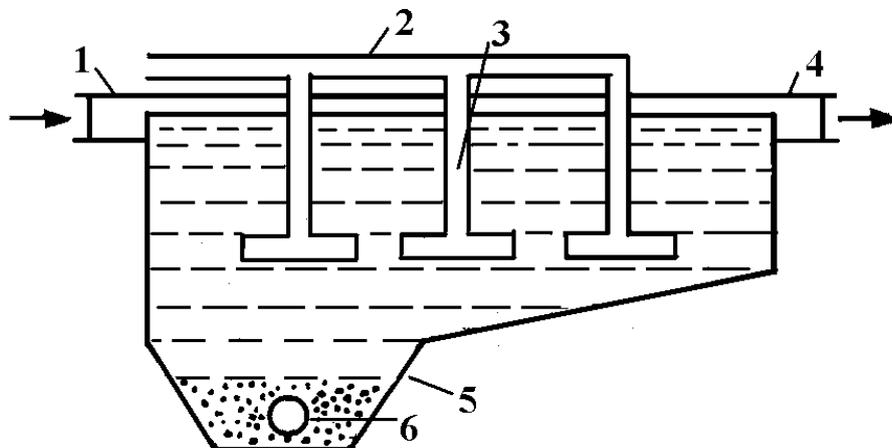


Рис. 3.8. Схема аэрируемой песколовки: 1 — входной патрубок, 2 — воздуховод, 3 — воздухораспределитель, 4 — выходной патрубок, 5 — шламоборник (песковой приямок), 6 — устройство для удаления шлама

Аэрируемые песколовки используют для разделения твердых частиц по фракционному составу или по плотности. Сточная вода поступает в песколовку по патрубку 1 (см. обозначения на рис. 3.8).

Крупные фракции осаждаются как и в горизонтальных песколовках. Мелкие фракции, обволакиваясь пузырьками воздуха, который подается в песколовку по воздуховоду 2 через воздухораспределители 3, всплывают вверх и с помощью скребковых механизмов удаляются с поверхности. Очищенная вода отводится через патрубок 4. Крупные фракции удаляются из шламосборника 5 при помощи устройства для удаления шлама 6.

Направление движения воды песколовках может быть комбинированным, например, горизонтальное или вертикальное с круговым (вращательным) движением. Примеры см. на рис. 3.9 и 3.10.

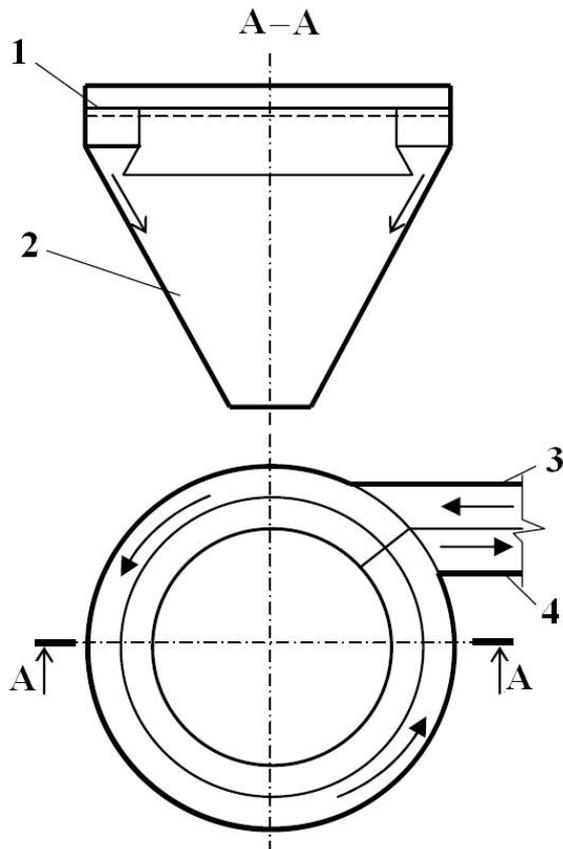


Рис. 3.9. Горизонтальная песколовка с круговым движением воды:

1 — кольцевой желоб; 2 — осадочный конус; 3 — подводящий канал; 4 — отводящий канал

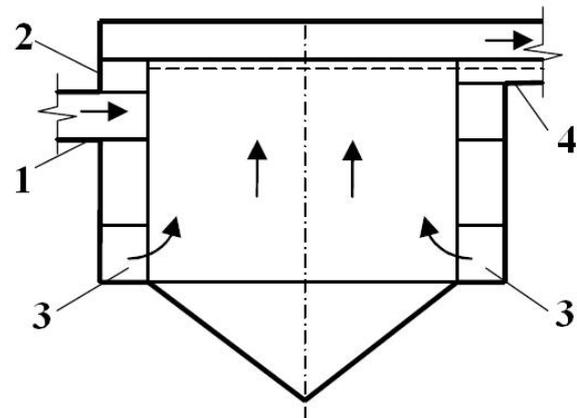


Рис. 3.10. Вертикальная песколовка с вращательным движением:

1 — подводящий канал;  
2 — сборный кольцевой лоток;  
3 — ввод воды в рабочую зону;  
4 — отводной канал

### 3.2.2. Расчет песколовков

Действующий СНиП 2.04.03-85<sup>1</sup> определяет следующие правила в расчете песколовков.

Число песколовков или отделений песколовков надлежит принимать не менее двух, причем все песколовки или отделения должны быть рабочими.

При расчете горизонтальных и аэрируемых песколовков следуют определять их длину  $L_s$ , м, по формуле

$$L_s = \frac{1000 K_s H_s v_s}{u_0}, \quad (3.11)$$

где  $K_s$  — коэффициент, принимаемый по табл. 3.2;  $H_s$  — расчетная глубина песколовки, м, принимаемая для аэрируемых песколовков равной половине общей глубины;  $v_s$  — скорость движения сточных вод, м/с, принимаемая по табл.3.3;  $u_0$  — гидравлическая крупность песка, мм/с, принимаемая в зависимости от требуемого диаметра задерживаемых частиц песка.

Таблица 3.2

#### Значения коэффициента $K_s$ для горизонтальной и аэрируемой песколовков песколовков

Диаметр задерживаемых частиц песка, мм	Гидравлическая крупность песка $u_0$ , мм/с	Значение $K_s$ в зависимости от типа песколовков и отношения ширины $B$ к глубине $H$ аэрируемых песколовков			
		горизонтальные	аэрируемые		
			$B:H = 1$	$B:H = 1,25$	$B:H = 1,5$
0,15	13,2	-	2,62	2,50	2,39
0,20	18,7	1,7	2,43	2,25	2,08
0,25	24,2	1,3	-	-	-

<sup>1</sup> СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения.

Таблица 3.3

**Параметры горизонтальной, аэрируемой и тангенциальной песколовок**

Песколовка	Гидравлическая крупность песка $u_0$ , мм/с	Скорость движения сточных вод $v_s$ , м/с, при притоке		Глубина $H$ , м	Количество задерживаемого песка, л/чел.-сут	Влажность песка, %	Содержание песка в осадке, %
		минимальном	максимальном				
Горизонтальная	18,7 – 24,2	0,15	0,3	0,5 – 2	0,02	60	55 – 60
Аэрируемая	13,2 – 18,7	-	0,08 – 0,12	0,7 – 3,5	0,03	-	90 – 95
Тангенциальная	18,7 – 24,2	-	-	0,5	0,02	60	70 – 75

Как отмечалось выше, в последние годы произошло изменение качественного состава песка, поэтому в настоящее время чаще используют данные табл. 3.4

Таблица 3.4

**Параметры горизонтальной и аэрируемой песколовок**

Диаметр частиц песка, мм	Гидравлическая крупность $u_0$ , мм/с	Продольная скорость движения воды в песколовках $v_s$ , м/с	
		горизонтальных	аэрируемых
0,005	2,0	0,1 – 0,15	0,02 – 0,05
0,10	5,9	0,1 – 0,15	0,02 – 0,05
0,15	13,2	0,15 – 0,2	0,05 – 0,1
0,20	18,7	0,15 – 0,200	0,05 – 0,1

На практике при расчете параметров горизонтальной песколовки исходят из данных о размере частиц песка ( $d$ ), расходе воды ( $q$ ) и скорости движения воды, выбранной в соответствии с табл. 3.3 или 3.4.

### Последовательность расчета:

1. по  $d$  считают гидравлическую крупность по формуле (3.7) для ламинарного режима или с использованием формулы (3.9.) для промежуточного (по Аллену). Из графика зависимости гидравлической крупности частиц песка от их размера (рис. 3.11) видно, что до значений диаметра частиц песка, равных 0,1 – 0,13 мм, график подчиняется квадратичному закону (область Стокса); при больших — близок к линейному (область Аллена).

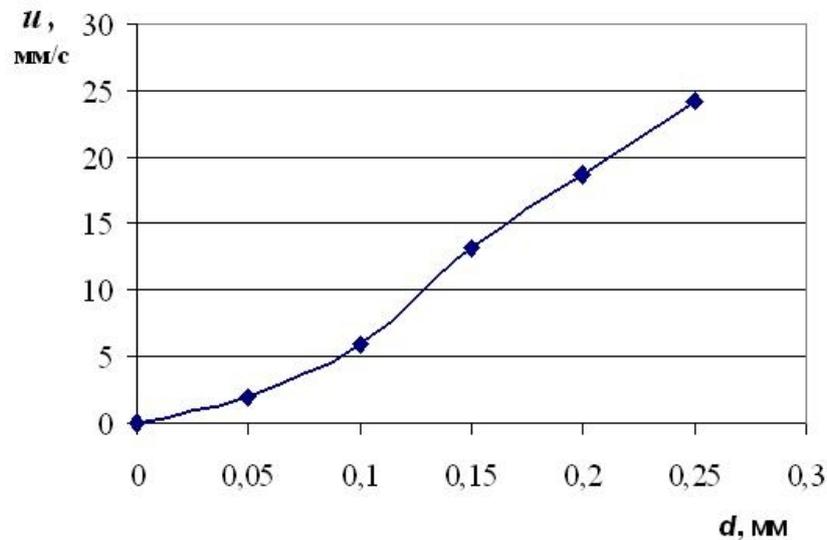


Рис. 3.11. Зависимость гидравлической крупности от диаметра частиц песка

2. Определяют скорость оседания частиц ( $u$ ) с учетом вертикальной турбулентной составляющей продольной скорости ( $\omega$ )

$$u = \sqrt{u_0^2 - \omega^2}, \quad (3.12)$$

где  $\omega = 0,05v_s$ .

3. Определяют площадь живого сечения  $S$

$$S = q / (v_s \cdot n), \quad (3.13)$$

где  $n$  число отделений песколовки.

4. Рассчитывают длину песколовки  $L$

$$L = \frac{H}{u} \cdot v_s. \quad (3.14)$$

5. Определяют площадь зеркала воды  $F$

$$F = q/u \quad (3.15)$$

6. Определяют общую ширину песколовки,  $B_{\text{общ}}$ .

$$B_{\text{общ}} = F/L \quad (3.16)$$

На основании полученных данных выбирают параметры типовых песколовки и определяют скорость течения сточных вод в песколовке при максимальном ( $v_{\text{max}}$ ) и минимальном режимах ( $v_{\text{min}}$ )

$$v_{\text{max}} = \frac{q_{\text{max}}}{B \cdot n \cdot H}, \text{ м/с}; \quad v_{\text{min}} = \frac{q_{\text{min}}}{B \cdot n \cdot H}, \text{ м/с}; \quad v \quad (3.17)$$

Полученные скорости должны находиться в пределах 0,15 – 0,30 м/с.

Параметры типовых горизонтальных песколовки приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

### Основные типоразмеры горизонтальных песколовки

Показатели	Пропускная способность очистной станции, тыс. м <sup>3</sup> /сут				
	70	100	140	200	280
Расчетный расход, м <sup>3</sup> /сут;	0,97	1,36	1,87	2,68	3,76
Число отделений	2	3	4	3	4
Размеры отделения: - сечение, м <sup>2</sup>	1,62	1,54	3,02	2,9	3,02
- длина, м, при гидравлической крупности частиц, мм/с:					
18,7	15,8	15,4	18,2	17,7	18,2
24,2	13	12,4	16,3	15,6	16,3
- глубина, м	0,58	0,55	0,67	0,65	0,67
- ширина, м	3	3	3	4,5	4,5

Расчет **вертикальной песколовки** проводят из условия задержания частиц с расчетной гидравлической крупностью ( $v < u_0$ ):

1. Рассчитывают площадь зеркала воды песколовки

$$F = \frac{Q_{\max}}{n \cdot u_0} \quad (3.18)$$

2. Определяют высоту песколовки

$$H = t \cdot v, \quad (3.19)$$

где  $v = u_0$ , где  $t = 120 - 180$  с

### 3.3. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В ОТСТОЙНИКАХ

Отстойники являются сравнительно простым, наименее энергоемким и дешевым методом выделения из сточных вод грубодисперсных примесей с плотностью, отличной от плотности воды.

Существует ряд классификаций отстойников, основанных на разных принципах. Например, по технологической роли отстойники подразделяют на первичные (для осветления<sup>1</sup> сточной воды), вторичные (для отстаивания биологически очищенной воды), третичные (для доочистки), илоуплотнители, осадкоуплотнители. По направлению движения потока воды — на горизонтальные, вертикальные, радиальные, наклонные тонкослойные. По способу перемещения осадка различают отстойники с механизмами цепного, тележечного типа, с радиальной фермой и с гидросмывом.

Ниже будут рассмотрены только первичные отстойники.

#### 3.3.1. Характеристика и устройство первичных отстойников

В табл. 3.6 представлены характерные параметры горизонтальных, вертикальных, радиальных и наклонных тонкослойных отстойников

---

<sup>1</sup>Осветление воды предполагает удаление из нее взвешенных примесей, т. е. тех, которые обуславливают ее мутность.

Таблица 3.6

**Основные характеристики первичных отстойников**

Параметр	Тип отстойника			
	Горизонтальный	Вертикальный	Радиальный	Наклонный тонкослойный*
Длина, $L$ , м	15 – 50	-	-	0,5 – 1,0
Глубина, $H$ , м	1,5 – 4	2,7 – 3,8	1,5 – 5	-
Диаметр, $D$ , м		4 – 9	15 – 50	0,025 – 0,05
Скорость движения воды в зоне отстаивания, $v$ , мм/с	5 – 10	0,5 – 0,7	Меняется от центра к периферии	
Расход, $Q$ , м <sup>3</sup> /сут	15000 – 100000	< 50000 (2000 – 20000)	> 20000	100 – 10000
Время отстаивания, $t$ , час	1 – 3	~2	1,5 – 2	Мало по сравнению с другими отстойниками
Эффект осветления, $\mathcal{E}$ , %	50 – 60	≤40**	≤ 60	≤ 85

Примечание: \* приведены параметры трубчатого отстойника; \*\* эффект осветления приведен для отстойника с центральным впуском

**Горизонтальные отстойники** представляют собой прямоугольные в плане резервуары, разделенные перегородками на несколько отделений (см. рис. 3.12 и 3.13). Поток осветляемой воды распределяется по ширине отстойника с помощью лотка с впускными отверстиями. Вода в отстойнике движется горизонтально в направлении водослива, который расположен с противоположного торца отстойника. Взвешенные примеси выпадают на дно отстойника по всей его длине, при этом основная доля грубодисперсных примесей с высокой гидравлической крупностью оседает в начале сооружения, где располагается иловый приямок. Примеси, осевшие на дно по всей

длине отстойника, перемещают к приямку скребковым механизмом (или гидросмывом). Из приямка осадок выгружается под гидростатическим напором в самотечный трубопровод и далее отводится его на перекачивающую насосную станцию. Всплывающие нефтemasляные и жировые вещества собираются в конце сооружения в жиросборный лоток, из которого самотеком отводятся на перекачку.

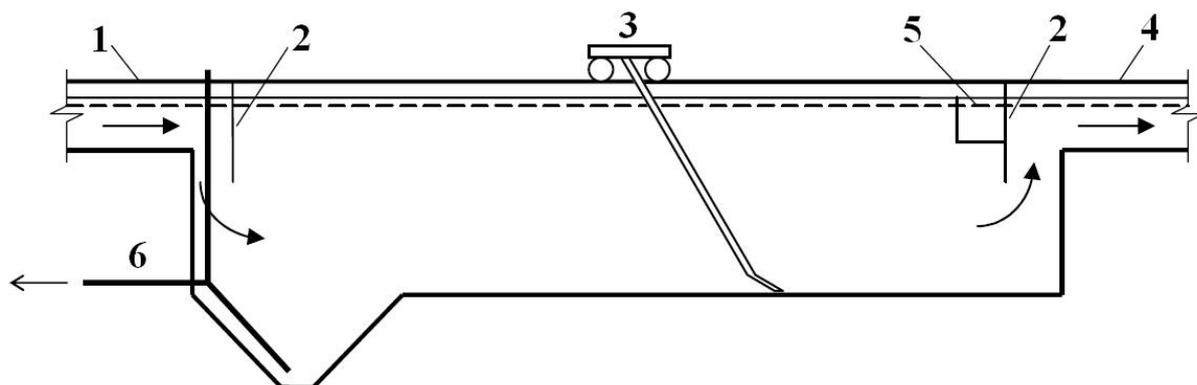


Рис. 3.12. Схема первичного горизонтального отстойника:

- 1 — подводный лоток; 2 — полупогружная доска; 3 — скребковая тележка; 4 — отводящий лоток; 5 — жиросборный лоток; 6 — удаление осадка

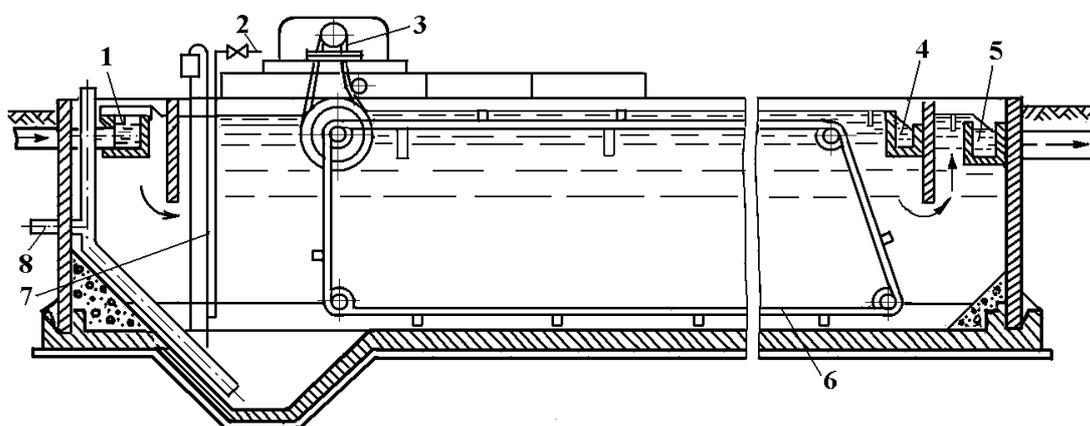


Рис. 3.13. Первичный горизонтальный отстойник конструкции Союзводоканалпроекта: 1 — лоток для распределения сточной воды; 2 — трубопровод для подачи воздуха к эрлифту; 3 — привод скребкового механизма; 4 — лоток для сбора всплывающих загрязнений; 5 — лоток для сбора осветленной воды; 6 — скребковый механизм; 7 — эрлифт для определения уровня шлама; 8 — иловая труба

По сравнению с другими типами отстойных сооружений горизонтальные отстойники обладают как достоинствами, так и недостатками. К достоинствам можно отнести относительно высокий коэффициент использования объема (равный 0,5); эффективность осветления воды по взвешенным веществам (50 – 60 %), возможность компактного расположения отстойников и блокирования их с аэротенками (например, при ширине 6 и 9 м, равной ширине аэротенков).

К недостаткам горизонтальных отстойников относятся: низкая надежность работы механизмов для сгребания осадка тележечного или цепного типа, особенно в зимний период; более высокий расход железобетона (на единицу строительного объема) по сравнению с радиальными отстойниками, поскольку цилиндрическая форма радиальных сооружений позволяет использовать предварительно напряженную высокопрочную арматуру, в результате чего уменьшается требуемая толщина стеновых панелей и удельный расход железобетона.

**Вертикальные отстойники** это круглые в плане резервуары с коническим дном, в которых поток осветляемой воды движется в вертикальном направлении. В зависимости от впускного устройства вертикальные отстойники подразделяются на аппараты с центральным впуском воды, с нисходяще-восходящим движением воды; с периферийным впуском воды.

В вертикальном отстойнике с центральным впуском (с центральной трубой) сточная вода подводится лотком к центральной раструбной трубе, опускается по ней и, отражаясь от конусного отражательного щита, поступает в зону осветления (см. рис.3.14).

В восходящем потоке осветляемой воды происходит флокуляция частиц взвеси. Образующиеся более крупные частицы с гидравлической крупностью  $U_0$ , превышающей скорость восходящего вертикального потока  $v_{\text{верт}}$ , выпадают в осадок. Частицы с  $U_0 < v_{\text{верт}}$  выносятся с восходящим потоком воды.

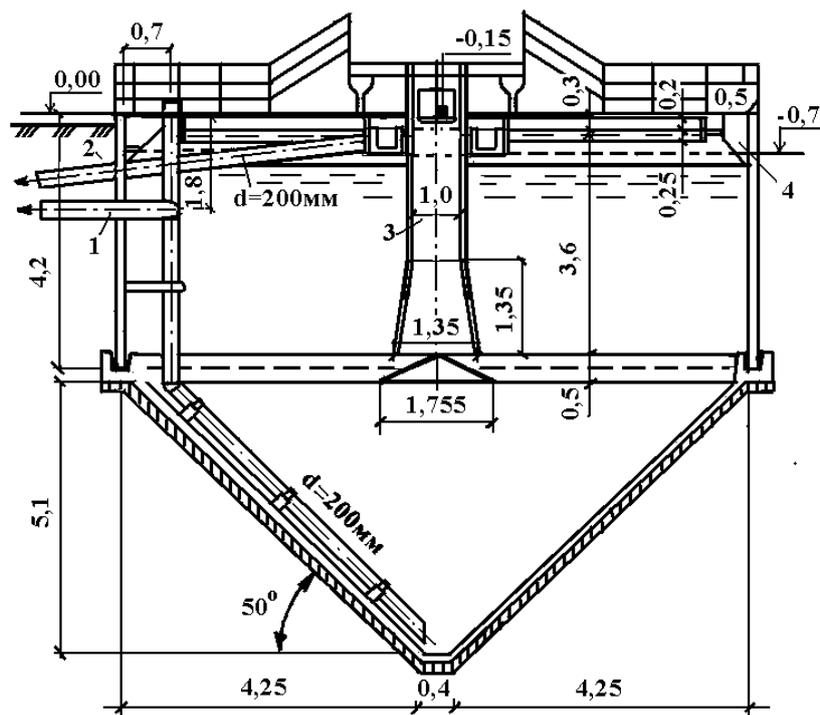


Рис. 3.14. Вертикальный отстойник с центральным впуском конструкции Союзводоканалпроекта: 1 — подающий лоток; 2 — отводящий лоток; 3 — центральная распределительная труба; 4 — расширенная часть трубы; 5 — отражательный щит; 6 — лоток для отвода всплывающих веществ; 7 — полупогружная доска; 8 — иловая труба; 9 — труба для отвода всплывающих веществ

Осветленная вода собирается периферийным сборным лотком. Всплывающие вещества собираются в центре отстойника кольцевым лотком, откуда отводятся трубопроводом в самотечную иловую сеть. Скорость восходящего потока вода составляет для городских сточных вод 0,5 – 0,7 мм/с.

Выпадающий осадок накапливается в конусной части отстойника, из которой удаляется гидростатическим напором 1,5 – 2,0 м через иловую трубу в самотечную иловую сеть. Объем иловой части рассчитывают на двухсуточный объем образующегося осадка.

К достоинствам вертикальных первичных отстойников относится простота их конструкции и удобство в эксплуатации. К недостаткам — большая глубина сооружений, что ограничивает их максимальный диаметр (9 м). Для вертикального отстойника с центральным

впуском также характерны низкий коэффициент использования объема (0,4) и невысокая эффективность осветления воды (обычно не выше 40 %), что объясняется образованием обширных вихревых зон в центральной части сооружения и в районе водосборных лотков.

Более эффективным является первичный вертикальный отстойник с нисходяще-восходящим потоком (см. рис. 3.15 ).В нем зона осветления разделена полупогружной перегородкой на две части, равные по площади зеркала воды.

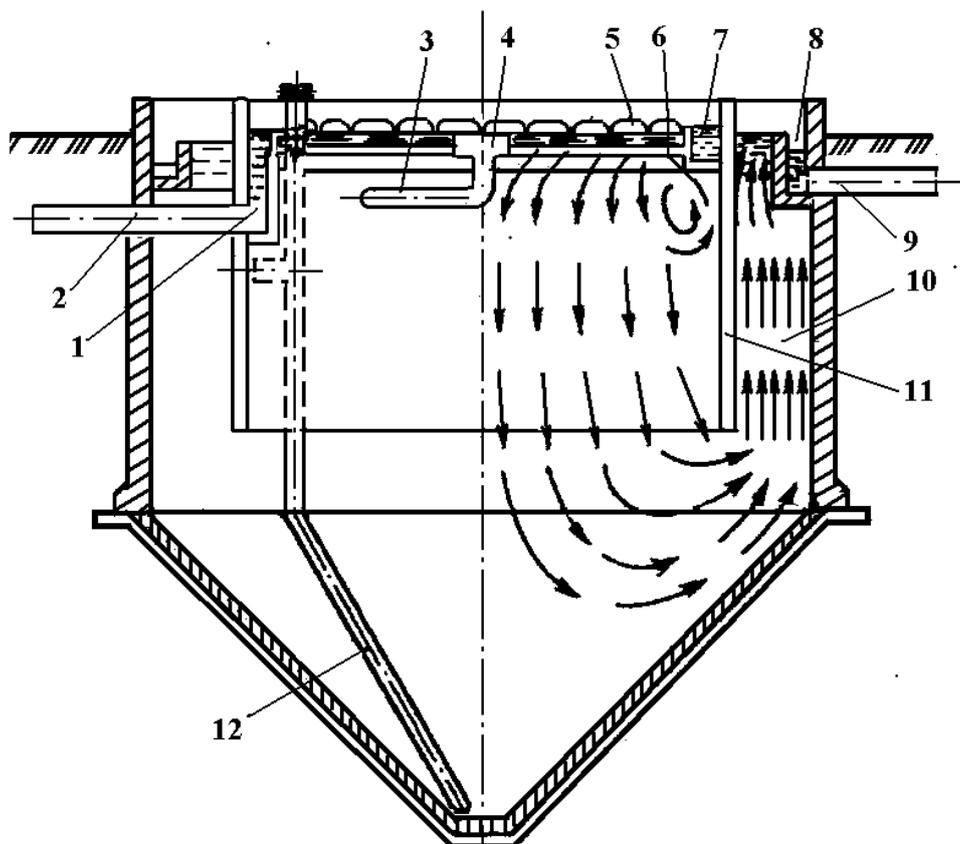


Рис. 3.15. Первичный вертикальный отстойник с нисходяще-восходящим потоком: 1 — подводящий лоток; 2 — воронка для сбора всплывающих веществ; 3 — затопленный козырек; 4 — подающий распределительный лоток с зубчатым водосливом; 5 — отводящий лоток; 6 — полупогружная перегородка; 7 — иловая труба; 8 — трубопровод для удаления всплывающих веществ

Сточная вода поступает в центральную часть отстойника по лотку или трубопроводу; через зубчатый водослив отражательным

козырьком она распределяется по площади зоны осветления. В этой зоне нисходящего потока воды происходит лучшее совпадение векторов направлений его движения и оседания агломерирующейся взвеси, чем в отстойниках с центральной распределительной трубой.

Основная масса взвешенных примесей воды выпадает в осадок до ее поступления в кольцевую зону восходящего движения, где происходит доосветление воды. Осветленная вода собирается периферийным сборным лотком. Осадок выгружается через центральный илопровод под действием гидростатического давления; всплывающие вещества удаляются из центральной части через приемную воронку, и самотечный трубопровод.

Коэффициент использования объема в вертикальных отстойниках с нисходяще-восходящим потоком повышается до 0,65, эффект осветления воды — до 60 – 65 %.

Вертикальные отстойники с периферийным впуском воды и сбором осветленной воды в центральной зоне (разработанные в НИИВодгео) характеризуются такими же значениями коэффициента использования объема и эффективности осветления, как и вертикальные отстойники с восходяще-нисходящим потоком.

**Радиальные отстойники** имеют круглую в плане форму резервуаров, в которых сточная вода подается в центр отстойника и движется радиально от центра к периферии (см. рис. 3.16). Скорость движения максимальна в центре отстойника и минимальна на периферии.

Выпавшие в осадок взвешенные примеси перемещаются в иловый приямок скребками, расположенными на вращающейся ферме. На этой же ферме расположено подвесное устройство, сгребующее всплывающие вещества к жиросборнику. Частота вращения фермы с илоскребами составляет 2 – 3 ч<sup>-1</sup>. Осадок удаляется с помощью плунжерных и центробежных насосов. Эффективность радиальных отстойников по взвешенным примесям составляет 50 – 55 %.

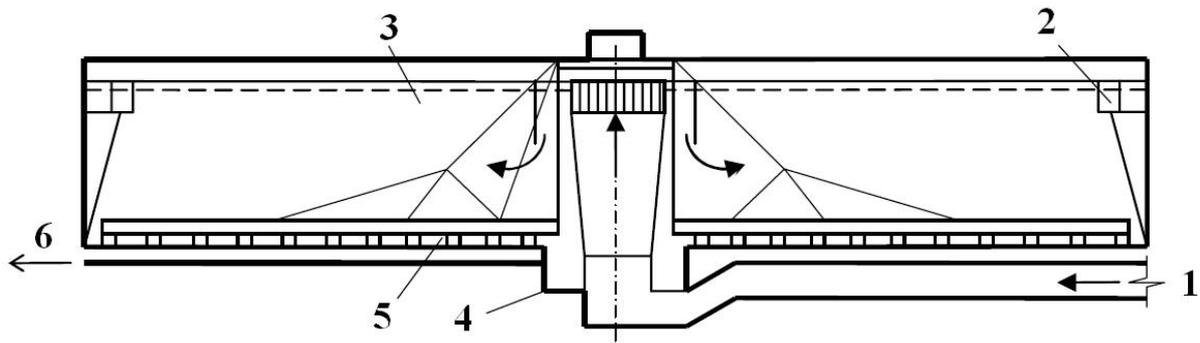


Рис. 3.16. Радиальный первичный отстойник: 1 — подача сточной воды; 2 — сборный лоток; 3 — отстойная зона; 4 — иловый приямок; 5 — скребковый механизм; 6 — удаление осадка

Диаметр типовых радиальных отстойников составляет 18 – 50 м, эти сооружения можно использовать при расходе сточных вод, начиная от 20000 м<sup>3</sup>/сут.

Достоинством радиальных отстойников по сравнению с прямоугольными горизонтальными, как отмечалось выше, является меньшая материалоемкость за счет применения высокопрочной предварительно напряженной арматуры. Недостатком рассмотренного радиального отстойника с центральным впуском является невысокий коэффициент объемного использования из-за высоких градиентов скорости в центральной части. Такого недостатка лишены отстойники с периферийным впуском сточной воды (см. рис. 3.17).

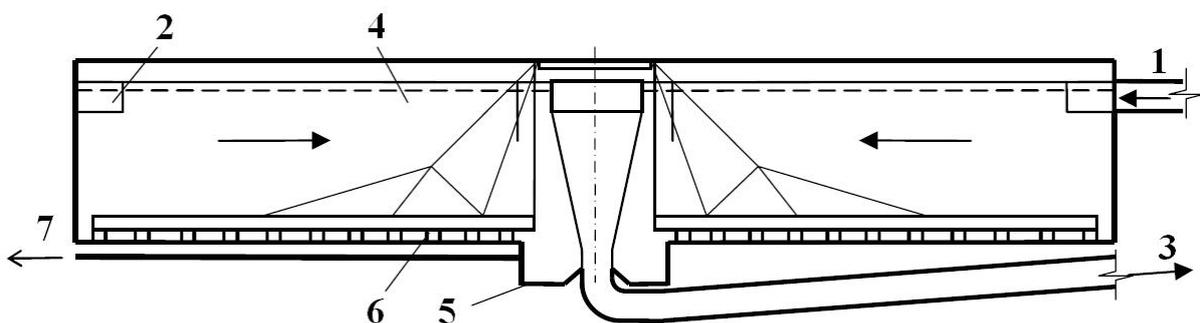


Рис. 3.17. Радиальный отстойник с периферийным впуском: 1 — подача сточной воды; 2 — водораспределительный желоб; 3 — отводящий трубопровод; 4 — отстойная зона; 5 — иловый приямок; 6 — скребковый механизм; 7 — удаление осадка

В радиальный отстойник с периферийным впуском сточная вода поступает в водораспределительный желоб, расположенный на периферии отстойника, и движется в центральную зону. Движение воды происходит более равномерно по всему живому сечению отстойника (чем при центральном впуске), при этом местные завихрения практически отсутствуют. Осветленная вода отводится из центрального водоотводящего кольцевого желоба через отводящий трубопровод.

В радиальном отстойнике с вращающимся сборно-распределительным устройством (рис. 3.18) основная масса воды находится в состоянии покоя. Подача сточной и отвод осветленной осуществляется с помощью свободно вращающегося желоба, разделенного перегородкой на две части. С внутренней стороны лоток ограничен перегородкой, снизу — щелевым днищем, снаружи — распределительной решеткой с вертикальными щелями, снабженной струенаправляющими лопатками.

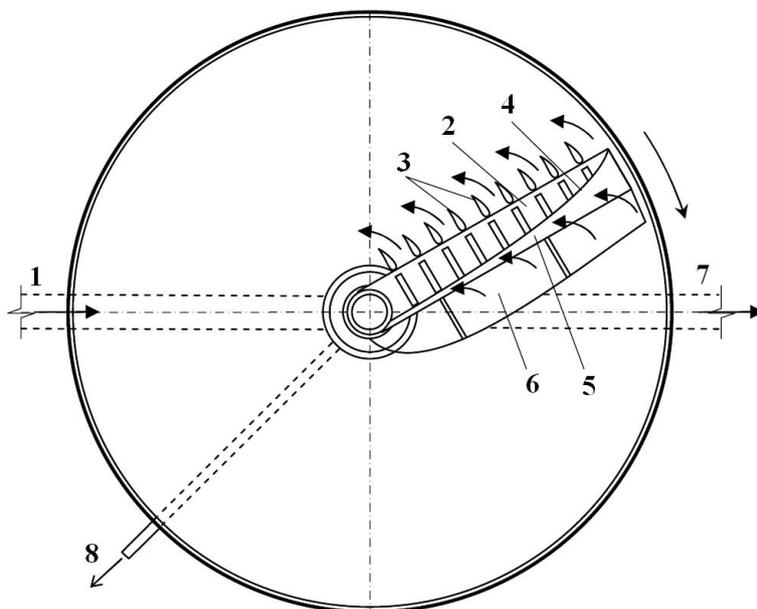


Рис. 3.18. Отстойник с вращающимся сборно-распределительным устройством: 1 — подача сточной воды; 2 — щелевое днище; 3 — струенаправляющие лопатки; 4 — продольная перегородка; 5 — водосборный лоток; 6 — направляющий козырек; 7 — отвод осветленной воды; 8 — удаление осадка

Вращение желоба происходит под действием реактивной силы вытекающей струи. Во многих случаях этой силы достаточно для вращения не только лотка, но и скребковой фермы.

Диаметры типовых отстойников с вращающимся сборно-распределительным устройством составляют 18 и 24 м.

**Тонкослойные отстойники** в виде самостоятельных сооружений или блоков из плоских, рифленых, трубчатых элементов, установленных в другие типы отстойников, используют для повышения эффекта осветления воды (на 25 – 30 %), уменьшения площади застройки очистными сооружениями. Эффект достигается за счет уменьшения времени осаждения взвеси (расстояние между пластинами или диаметр труб составляет, в основном, десятки миллиметров, что во много раз меньше глубины рассмотренных выше отстойников) и улучшения гидродинамики осаждения. Такие же блоки используют для повышения эффективности работы нефте- и маслотовушек (см. следующий подраздел). В зависимости от направления движения потока воды и осадка существуют три схемы расположения модулей в отстойнике — прямоточная, противоточная и перекрестная (см. рис. 3.19). При прямоточной схеме направление движения потока воды совпадает с направлением перемещения осадка; при противоточной эти направления противоположны; при перекрестной перпендикулярны.

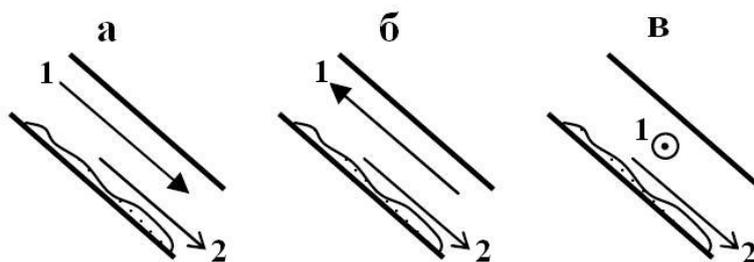


Рис. 3.19. Схемы движения воды в тонком слое: а — прямоточная; б — противоточная; в — перекрестная; 1 — направление движения воды; 2 — направление движения осадка

Тонкослойные отстойники применяют как для сокращения объема очистных сооружений при неизменном эффекте осветления, так и

для повышения эффективности существующих отстойников. В первом варианте тонкослойные отстойники применяют как самостоятельные сооружения, во втором — как вставки (тонкослойные модули) в существующие отстойники. Тонкослойные блоки можно встраивать в горизонтальные (см. рис. 3.20), вертикальные или радиальные отстойники.

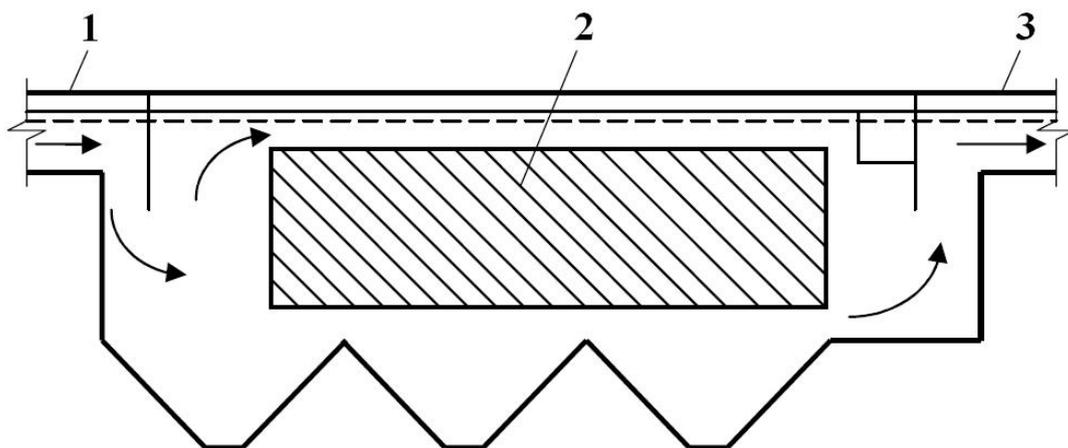


Рис. 3.20. Горизонтальный отстойник с тонкослойными блоками: 1 — подача стоков; 2 — тонкослойный блок; 3 — отвод осветленной воды

Угол наклона пластин в блоках составляет  $45 - 60^\circ$ , высота яруса —  $25 - 200$  мм. Тонкослойные элементы могут быть выполнены как из гибких материалов, не обладающих достаточной жесткостью, так и из материалов достаточной жесткости.

К достоинствам тонкослойных отстойников следует отнести устойчивость их работы при значительных колебаниях расходов поступающей на очистку воды, изменениях ее температуры и концентраций загрязнений. Рекомендуется применять при очистке вод с малой и средней мутностью.

### 3.3.2. Расчет первичных отстойников

Расчет первичных отстойников проводят в соответствии с действующим СНиП 2.04.03-85.

Число отстойников следует принимать: первичных — не менее двух при условии, что все отстойники являются рабочими. При ми-

нимальном числе их расчетный объем необходимо увеличивать в 1,2 – 1,3 раза.

Расчет отстойников надлежит производить по кинетике выпадения взвешенных веществ с учетом необходимого эффекта осветления. Кинетические данные получают экспериментально в лабораторных условиях на реальной сточной воде при различных концентрациях взвешенных примесей.

Для определения гидравлической крупности взвешенных примесей  $u_0$ , (что является исходным пунктом расчетов) необходимо экспериментально определить два параметра, входящих в формулу

$$u_0 = \frac{1000 H_{set} K_{set}}{t_{set} \left( \frac{K_{set} H_{set}}{h_1} \right)^{n_2}}, \quad (3.20)$$

где  $H_{set}$  — глубина проточной части в отстойнике, м;  $K_{set}$  — коэффициент использования объема проточной части отстойника;  $t_{set}$  — продолжительность отстаивания, с, соответствующая заданному эффекту очистки и полученная в лабораторном цилиндре в слое  $h_1$ ;  $n_2$  — показатель степени, зависящий от агломерации взвеси в процессе осаждения.

Время  $t_{set}$  выбирается из кинетических зависимостей эффективности осветления воды от времени, полученных при разных концентрациях взвешенных примесей в лабораторном цилиндре высотой  $h_1$ . Показатель степени  $n_2$  определяется из аналогичных экспериментов, но проведенных с использованием двух цилиндров, например, высотой  $h'$ , равной 500 мм и высотой  $h''$ , равной 1000 мм.

Если бы взвешенные примеси не агломерировали при оседании, то

$$t''/t' = h''/h', \quad (3.21)$$

где  $t'$  — время оседания примесей на глубину  $h'$  для достижения определенной эффективности осветления;  $t''$  — время оседания примесей на глубину  $h''$  для достижения той же эффективности осветления.

При агломерации взвешенных примесей отношение (3.21) преобразуется в следующее:

$$t''/t' = (h''/h')^{n_2}, \quad (3.22)$$

откуда  $n_2$  определяется путем логарифмирования приведенного выражения и при  $h'' = 1000$  мм,  $h' = 500$  мм равняется

$$n_2 = \frac{\lg(t''/t')}{\lg(h''/h')} = \frac{\lg(t''/t')}{\lg 2}. \quad (3.23)$$

Показатель степени  $n_2$  зависит от концентрации взвешенных примесей, поэтому в лабораторных условиях последовательно проводят эксперименты по осаждению взвешенных примесей сточной воды при их разных концентрациях ( $C$ ) в цилиндрах разной глубины. На парах зависимостей эффективности осветления от времени отстаивания (см. пример на рис. 3.21) проводят перпендикуляры к оси ординат при разных значениях эффективности осветления до пересечения с кинетическими кривыми. Из точек пересечения опускают перпендикуляры до пересечения с осью абсцисс и таким образом определяют времена  $t'$  и  $t''$ , которые подставляют в выражение (3.23), и тем самым определяют значение  $n_2$  при соответствующей концентрации  $C$  и эффективности  $\mathcal{E}$ .

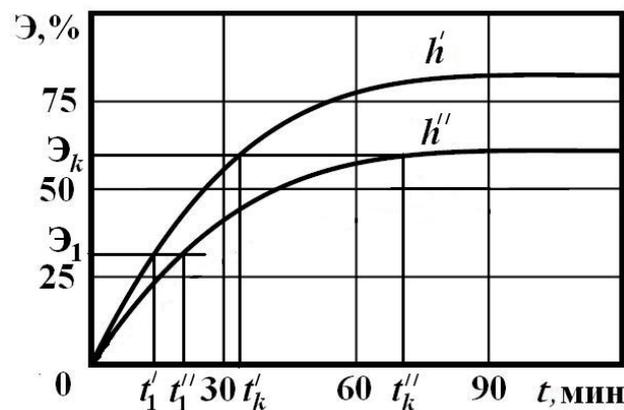


Рис.3.21. Зависимости эффективности осветления сточной воды от времени осаждения

$h'$  и  $h''$  — значения глубины лабораторных цилиндров

После определения  $n_2$  при различных концентрациях взвешенных примесей ( $C$ ) и значениях эффективности осветления воды ( $\mathcal{E}$ ) строят зависимость  $n_2 = f(C)$  при разных  $\mathcal{E}$ .

Для нахождения гидравлической крупности по формуле (3.20) необходимо подставить в нее время  $t_{set}$  и показатель степени  $n_2$ , соответствующие заданной концентрации взвешенных примесей и выбранной эффективности осветления, а также значения  $H_{set}$  и  $K_{set}$ . Для городских сточных вод  $t_{set}$  можно определить по данным табл. 3.7,  $n_2$  по кривым, приведенным на рис. 3.22. Коэффициент использования объема различных типов отстойников, а также значения их глубины приведены в табл. 3.8

Таблица 3.7

**Продолжительность отстаивания взвешенных примесей  $t_{set}$ , с,  
в слое  $h_1 = 500$  мм**

Эффект осветления, %	Концентрации взвешенных веществ, мг/л		
	200	300	400
20	600	540	480
30	960	900	840
40	1440	1200	1080
50	2160	1800	1500
60	7200	3600	2700
70	-	-	7200

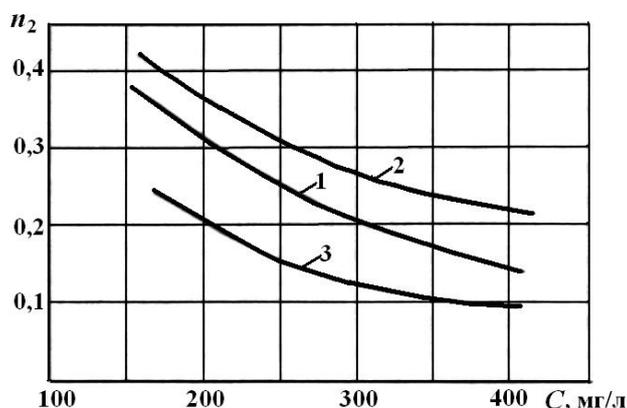


Рис.3.22. Зависимость показателя степени  $n_2$  от исходной концентрации взвешенных веществ в городских сточных водах ( $C$ ) при эффекте отстаивания 1 —  $\mathcal{E} = 50$  %; 2 —  $\mathcal{E} = 60$  %; 3 —  $\mathcal{E} = 70$  %

Таблица 3.8

**Параметры отстойников и скорость рабочего потока**

Отстойник	Коэффициент использования объема $K_{set}$	Рабочая глубина части $H_{set}$ , м	Ширина $B_{set}$ , м	Скорость рабочего потока $v_w$ , мм/с	Уклон днища к иловому приемку
Горизонтальный	0,5	1,5 – 4	$2H_{set} - 5H_{set}$	5 – 10	0,005 – 0,05
Радиальный	0,45	1,5 – 5	-	5 – 10	0,005 – 0,05
Вертикальный	0,35	2,7 – 3,8	-	-	-
С вращающимся сборно-распределительным устройством	0,85	0,8 – 1,2	-	-	0,05
С нисходяще-восходящим потоком	0,65	2,7 – 3,8	-	$2u_o - 3u_o$	-
С тонкослойными блоками:					
противоточная (прямоточная) схема работы	0,5 – 0,7	0,025 – 0,2	2 – 6	-	-
перекрестная схема работы	0,8	0,025 – 0,2	1,5	-	0,005

Примечания: 1. Коэффициент  $K_{set}$  определяет гидравлическую эффективность отстойника и зависит от конструкции водораспределительных и водосборных устройств; указывается организацией-разработчиком.

2. Величину турбулентной составляющей  $v_{tb}$ , мм/с, в зависимости от скорости рабочего потока  $v_w$ , мм/с, надлежит определять по табл. 3.9.

**Определение турбулентной составляющей по скорости рабочего потока**

$v_w$ , мм/с	5	10	15
$v_{tb}$ , мм/с	0	0,05	0,1

Если температура сточной воды в производственных условиях отличается от температуры воды, при которой определялась кинетика отстаивания (20°С), в формулу (3.20) необходимо вводить поправку

$$u_0^t = \frac{\mu_{lab}}{\mu_{pr}} u_0, \quad (3.24)$$

где  $\mu_{lab}$ ,  $\mu_{pr}$  — вязкость воды при соответствующих температурах в лабораторных и производственных условиях.

В СНиП 2.04.03-85 приведены формулы для расчета производительности одного отстойника  $q_{set}$ , м<sup>3</sup>/ч:

а) для горизонтальных отстойников

$$q_{set} = 3,6 K_{set} L_{set} B_{set} (u_0 - v_{tb}); \quad (3.25)$$

б) для отстойников радиальных, вертикальных и с вращающимся сборно-распределительным устройством

$$q_{set} = 2,8 K_{set} (D_{set} - d_{en})^2 (u_0 - v_{tb}); \quad (3.26)$$

в) для отстойников с нисходяще-восходящим потоком

$$q_{set} = 1,41 K_{set} D_{set}^2 u_0; \quad (3.27)$$

г) для отстойников с тонкослойными блоками при перекрестной схеме работы

$$q_{set} = \frac{7,2 K_{set} H_{bl} L_{bl} u_0}{K_{dis} h_{ti}}; \quad (3.28)$$

д) то же, при противоточной схеме

$$q_{set} = 3,6 K_{set} H_{bl} B_{bl} v_w, \quad (3.29)$$

где  $K_{set}$  — коэффициент использования объема, принимаемый по табл. 3;

$L_{set}$  — длина секции, отделения, м;

$L_{bl}$  — длина тонкослойного блока (модуля), м;  
 $B_{set}$  — ширина секции, отделения, м;  
 $B_{bl}$  — ширина тонкослойного блока, м;  
 $D_{set}$  — диаметр отстойника, м;  
 $d_{en}$  — диаметр впускного устройства, м;  
 $u_0$  — гидравлическая крупность задерживаемых частиц, мм/с, определяемая по формуле (3. );  
 $v_{tb}$  — турбулентная составляющая, мм/с, принимаемая по табл. 3.8 в зависимости от скорости потока в отстойнике  $v_w$ , мм/с;  
 $H_{bl}$  — высота тонкослойного блока, м;  
 $h_{ti}$  — высота яруса тонкослойного блока (модуля), м;  
 $K_{dis}$  — коэффициент сноса выделенных частиц, принимаемый при плоских пластинах равным 1,2, при рифленых пластинах — 1.

Основные конструктивные параметры следует принимать:

а) для горизонтальных и радиальных отстойников:

- впуск исходной воды и сбор осветленной — равномерными по ширине (периметру) впускного и сборного устройств отстойника;
- высоту нейтрального слоя для первичных отстойников — на 0,3 м выше днища (на выходе из отстойника), и глубину слоя ила 0,3 – 0,5 м;
- угол наклона стенок илового приямка — 50 – 55°;

б) для вертикальных отстойников:

- длину центральной трубы — равной глубине зоны отстаивания;
- скорость движения рабочего потока в центральной трубе — не более 30 мм/с;
- диаметр раструба — 1,35 диаметра трубы;
- диаметр отражательного щита — 1,3 диаметра раструба;
- угол конусности отражательного щита — 146°;
- скорость рабочего потока между раструбом и отражательным щитом — не более 20 мм/с для первичных отстойников;
- высоту нейтрального слоя между низом отражательного щита и уровнем осадка — 0,3 м;

- угол наклона конического днища —  $50 - 60^\circ$ ;
- в) для отстойников с нисходяще-восходящим потоком:
  - площадь зоны нисходящего потока — равной площади зоны восходящего;
  - высоту перегородки, разделяющей зоны, — равной  $2/3 H_{set}$ ;
  - уровень верхней кромки перегородки — выше уровня воды на  $0,3$  м, но не выше стенки отстойника;
  - распределительный лоток переменного сечения — внутри разделительной перегородки. Начальное сечение лотка следует рассчитывать на пропуск расчетного расхода со скоростью не менее  $0,5$  м/с, в конечном сечении скорость — не менее  $0,1$  м/с.

На практике для *первичного горизонтального отстойника* после расчета по формуле (3.24) поправки к гидравлической крупности, связанной с зависимостью вязкости от температуры, рассчитывают суммарную ширину всех отделений отстойника

$$\sum B = \frac{1000 \cdot q_{\max}}{v_w \cdot H_{set}}, \text{ м}, \quad (3.30)$$

где  $q_{\max}$  — максимальный секундный расход сточной воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Затем по табл. 3.7 принимают ширину одного отделения отстойника  $B_{set}$ , м (в пределах  $2H_{set} - 5H_{set}$ ). Рекомендуется выбирать ширину отделения, кратную  $3$  м. Параметры типовых отстойников приведены в табл. 3.10.

По суммарной ширине всех отделений и ширине одного отделения определяют число отделений отстойника  $n$ , которое должно быть не менее двух

$$n = \frac{\sum B}{B_{set}}. \quad (3.31)$$

Далее проверяют рабочую скорость потока, которая должна быть в пределах, указанных в табл. 3.8

$$v_w = \frac{1000q_{\max}}{H_{set} \cdot B_{set} \cdot n}, \frac{\text{мм}}{\text{с}}. \quad (3.32)$$

Таблица 3.10

**Основные параметры типовых первичных горизонтальных  
отстойников**

Номер типового проекта	Размеры отделения, м			Число отделений в типовой компоновке	Расчетный объем от- стойника	Пропускная способность, м <sup>3</sup> /час, при вре- мени отстаи- вания 1,5 ч
	ши- рина	длина	глубина зоны от- стаивания			
902-2-305	6	24	3,15	4	1740	1160
902-2-304	6	24	3,15	6	2610	1740
902-2-240	9	30	3,1	4	3200	2130
902-2-241	9	30	3,1	6	4800	3200
902-2-242	9	30	3,1	8	6400	4260

Скорость должна быть в пределах, указанных в табл. 3.8. Если это условие не выполняется, то изменяют величину  $H_{set}$  и пересчитывают скорость рабочего потока.

Следующим шагом определяют длину отстойника  $L_{set}$ :

$$L_{set} = \frac{v_w H_{set}}{K(u_0 - v_{tb})}, \text{ м.} \quad (3.33)$$

Далее рассчитывают полную строительную высоту отстойника на выходе  $H$

$$H = H_{set} + H_1 + H_2, \text{ м,} \quad (3.34)$$

где  $H_1$  — высота борта над слоем воды, равная 0,3 – 0,5 м,  $H_2$  — высота нейтрального слоя (от дна на выходе), равная 0,3 м.

Определяют количество осадка  $Q_{mud}$  ( $mud$  — шлам), выделяемого при отстаивании за сутки

$$Q_{mud} = \frac{Q(C_{en} - C_{ex})}{(100 - p_{mud}) \gamma_{mud} \cdot 104}, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (3.35)$$

где  $Q$  — суточный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/сут,  $p_{mud}$  — влажность осадка, равная 94 – 96 %,  $\gamma_{mud}$  — плотность осадка, равная 1 г/см<sup>3</sup>.

Рассчитывают вместимость приемка одного отстойника для сбора осадка  $W_{mud}$

$$W_{mud} = \frac{1}{6} (B_{set}^2 + 0,5B_{set} + 0,25) g\alpha, \text{ м}^3. \quad (3.36)$$

Определяют период между выгрузками осадка из отстойника  $T$

$$T = 24n \cdot W_{mud} / Q_{mud}, \text{ ч} \quad (3.37)$$

Рассчитанное значение  $T$  должно быть: при удалении осадка под гидростатическим давлением — не более 48 ч, при удалении осадка механическим способом — не более 8 ч.

Для **первичных вертикальных** отстойников после расчета значения гидравлической крупности принимают количество отделений не менее двух и рассчитывают диаметр центральной трубы  $d_{en}$ :

$$d_{en} = \sqrt{\frac{4q_{max}}{\pi n v_{en}}}, \text{ м}, \quad (3.38)$$

где  $q_{max}$  — максимальный секундный расход сточных вод,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $v_{en}$  — скорость движения рабочего потока в центральной трубе, не менее 0,03 м/с.

Диаметр  $d_{en}$  округляют до сортаментного значения.

Определяют диаметр отстойника  $D_{set}$ :

$$D_{set} = \sqrt{\frac{4000q_{max}}{\pi n K_{set} (u_0 - u_{tb})} + d_{en}^2}, \text{ м} \quad (3.39)$$

По рассчитанному диаметру принимается типовой отстойник или проектируется индивидуально. В табл. 3.11 приведены параметры типовых вертикальных первичных отстойников.

Далее рассчитывают диаметр раструба и отражательного щита (см. выше рекомендации СНиП):

$$\begin{aligned} d_p &= 1,35d_{en}, \text{ м} \\ d_{щ} &= 1,3d_p, \text{ м} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Рассчитывают высоту щели между низом центральной трубы и поверхностью отражательного щита  $H_1$ :

$$H_1 = \frac{q_{max}}{\pi n d_p v_{щ}}, \text{ м} \quad (3.41)$$

где  $v_{щ}$  — скорость движения в щели, равная 0,02 м/с.

Определяют общую высоту цилиндрической части отстойника  $H_{ц}$

$$H_{ц} = H_{set} + H_1 + H_2 + H_3, \text{ м}, \quad (3.42)$$

где  $H_2$  — высота нейтрального слоя между низом отражательного щита и слоем осадка, равная 0,3 м,  $H_3$  — высота борта отстойника, равная 0,5 м.

Рассчитывают высоту конусной части отстойника  $H_{к}$ :

$$H_{к} = 0,5D_{set} \cdot \text{tg}\alpha, \text{ м}, \quad (3.43)$$

где  $\alpha$  — угол конического днища, равный 50 – 60 °.

Рассчитывают общую высоту отстойника  $H$ :

$$H = H_{ц} + H_{к}, \text{ м}. \quad (3.44)$$

По формуле (3.35) определяют суточное количество осадка, задерживаемое в отстойниках  $Q_{mud}$ .

Таблица 3.11

Основные параметры типовых вертикальных первичных отстойников с впуском воды через центральную трубу

Номер типового проекта	Материал	Диаметр, м	Строительная высота, м		Пропускная способность, м <sup>3</sup> /ч, при времени отстаивания 1,5 ч
			цилиндрической части	конической части	
902-2-19	Монолитный	4	4,1	1,8	31
902-2-20	Железобетонный	6	4,1	2,8	69,5
902-2-165	Сборный	6	4,2	3,3	69,5
902-2-166	Железобетонный	9	4,2	5,1	156,5

### **3.3. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В МАСЛОЛОВУШКАХ**

Отстаивание в гравитационном поле можно использовать для очистки сточных вод от плавающих и грубодисперсных масел. В одних случаях этот метод является предварительным этапом обработки маслосодержащих вод, в других — способом окончательной очистки.

Основными исходными данными для выбора сооружения и технологического расчета при очистке маслосодержащих вод являются: а) расход сточных вод, б) концентрация в них маслянистых частиц, в) дисперсность, г) агрегативная и кинетическая устойчивость. В реальных сточных водах наряду с маслянистыми частицами присутствуют минеральные примеси различной плотности. При взаимодействии таких частиц с маслами затрудняется разделение системы. В сточной воде также могут быть вещества, способствующие или препятствующие агрегативной устойчивости системы (коалесценции масляных частиц).

Движение частиц масла в гравитационном поле в ламинарном режиме описывается уравнением (3.7) с той разницей, что плотность частиц масла меньше плотности воды, поэтому они будут не оседать, а всплывать. В турбулентном и промежуточном режиме также справедливы зависимости скорости от диаметра частиц масла, которые сведены в табл. 3.1.

#### **3.3.1. Движение частиц в высококонцентрированных системах**

Указанные выражения справедливы только для тех случаев, когда концентрация частиц невелика и между ними не происходит столкновений. В высококонцентрированных системах между частицами происходят столкновения, существенно влияющие на скорость их перемещения в гравитационном поле.

Так, если сточная вода содержит только нестабилизированные или малостабилизированные частицы (капельки) масла в высокой концентрации и не содержит минеральных оседающих примесей, то на скорость процесса очистки воды влияют разнонаправленные процессы: 1) при встрече частиц происходит их коалесценция с образо-

ванием более крупных капель, которые всплывают в гравитационном поле быстрее за счет их большего размера при той же плотности; 2) столкновение частиц в высококонцентрированной системе тормозит из направленное движение, в результате скорость всплывания уменьшается.

Частицы (капли) масла всплывают на поверхность воды и в некоторый «критический» момент времени  $\tau_{кр}$  сливаются в сплошную массу (фазу масла) (см. рис. 3.23, а). Критическое время  $\tau_{кр}$ , при котором исчезает эмульсия и остается только всплывший слой масла, зависит от концентрации и дисперсности эмульсии, а также от высоты ее слоя  $h_0$ . Показано, что для очень разбавленных систем критическое время  $\tau_{кр}$  наступает значительно быстрее, чем для концентрированных при той же начальной высоте уровня  $h_0$ .

Если наряду с частицами масла (с плотностью меньше единицы) в системе имеются взвешенные частицы с плотностью больше единицы, то при их встречном движении в гравитационном поле происходит их столкновение с образованием агрегатов, имеющих плотность, близкую к плотности воды. Это приводит к образованию слоя, состоящего из масел и минеральных взвесей, плавающего под слоем всплывшего масла. Кроме того, мелкие минеральные частицы могут сорбироваться на крупных частицах с низкой плотностью и флотироваться ими в верхний слой и, наоборот, часть минеральных фракций может оказаться в выпавшем на дно осадке.

Чем больше в воде минеральных взвешенных веществ, тем большее время необходимо для ее осветления. Показано, что при соотношении концентрации масла и механических примесей в воде, равному 1 : 1, скорость всплывания уменьшается на 20 % (рис. 3.23, б).

Наличие в реальных сточных водах частиц различной плотности и дисперсности обуславливает отсутствие резкой границы между всплывающим маслом, осветленной водой и осадком по глубине отстойного сооружения. Характерное распределение масел и механиче-

ских примесей на различных глубинах отстойника приведено в табл. 3.12.

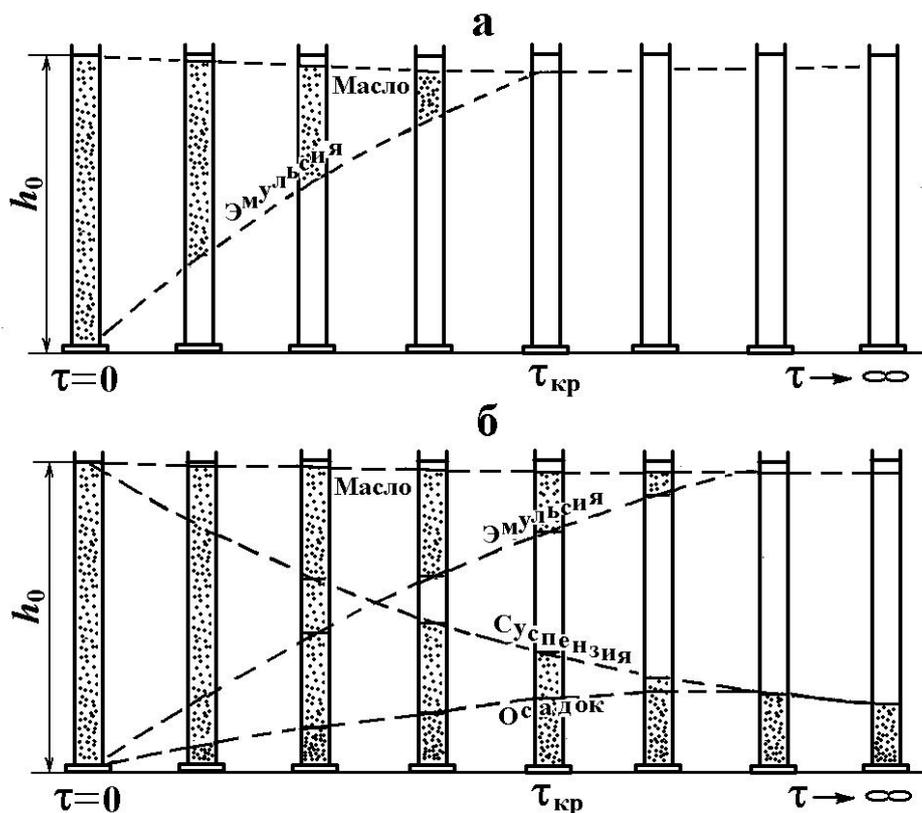


Рис. 3.23. Ход процесса расслоения многокомпонентной системы:  
а — масло — вода, б — масло — взвесь — вода

Таблица 3.12

**Распределение масел и механических примесей на различных глубинах в процессе отстаивания**

Глубина отбора воды, м	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Содержание масел, мг/л	42,1	39,5	31,4	32,4	7,5
Содержание механических примесей, мг/л	34,6	42,0	43,8	59,8	59,6

Таким образом, в концентрированных водах, содержащих эмульгированный и оседающие минеральные примеси, качество очищенной воды в значительной мере зависит от уровня, с которого она отводится из отстойного сооружения.

### 3.3.2. Устройство и характеристики маслоловушек

Для очистки сточных вод от всплывающих примесей (масла, нефть, легкие смолы и т.п.) используют масло(нефте)ловушки. Эти сооружения бывают, как и отстойники, горизонтальными, вертикальными, радиальными, многоярусными (тонкослойными), комбинированными

Маслоловушки строят по типовым проектам, рассчитанным на очистку воды с содержанием масла до 5000 мг/л и механических примесей до 500 мг/л. В них должны задерживаться масляные частицы размером более 80 – 100 мкм.

В качестве вертикальных маслоловушек используют вертикальные отстойники, оборудованные специальными маслоуловителями. Применяют в основном вертикальные отстойники круглой формы диаметром 4 – 9 м и пропускной способностью 44 л/с. Преимуществом вертикальных отстойников является простота удаления из них выпавшего осадка, которое производится под гидростатическим давлением. Всплывающие масла удаляют с помощью воронки или желоба со специальным маслогоном.

Продолжительность отстаивания в вертикальных маслоловушках составляет 2 – 4 часа. Расчетную скорость потока принимают исходя из наименьшей скорости тех частиц, на задержание которых рассчитывается отстойник, она не должна превышать 0,5 – 0,75 скорости осаждения частиц (обычно она составляет порядка 0,5 мм/с). Скорость движения воды в центральной трубе принимают 30 – 100 мм/с. Скорость в щели между нижней кромкой центральной трубы и поверхностью отражательного щита рекомендуется принимать 20 – 40 мм/с.

Горизонтальные маслоловушки представляют собой прямоугольный железобетонный отстойник, разделенный на две, три или четыре параллельные секции. Для равномерного распределения воды в каждой секции горизонтальной маслоловушки устанавливают щелевую перегородку, через которую вода поступает в отстойную камеру.

Освобожденная от масла (нефти) вода в конце секции проходит под затопленной стенкой и через водослив переливается в отводящий трубопровод. Всплывшее масло (нефть) сгоняется скребковым механизмом к щелевым поворотным трубам и выводится по ним из секции.

Осадок, выпавший на дно, тем же скребковым механизмом сгребается к приемку, откуда его гидроэлеватором периодически удаляют по илопроводу.

Расчетная продолжительность отстаивания должна быть не менее 2 ч (2 – 4 ч), скорость движения воды принимается 3 – 10 мм/с.

Характерный вид горизонтальной масло(нефте)ловушки представлен на рис. 3.24.

Принцип тонкослойного отстаивания нашел применение при конструировании многоярусных полочных маслоловушек, представляющих собой горизонтальные отстойники, рабочий объем которых разделен по высоте наклонными пластинами на ряд отстойных зон. Введение параллельных пластин в живое сечение маслоловушки позволяет равномерно распределить рабочий поток в начале сооружения и сохранять это распределение по всей длине. Многоярусная (тонкослойная) маслоловушка имеет меньшие габариты, чем горизонтальная ловушка, она более экономична (о преимуществах тонкослойных сооружений см. пункт 3.3.1).

На рис. 3.25 показаны принципиальные схемы многоярусных маслоловушек, а на рис. 3.26 — поперечный разрез многоярусной нефтеловушки.

В многоярусной нефтеловушке, представленной на рис. 3.26, сточная вода из отдельно расположенной распределительной камеры поступает по трубопроводам в секции ловушки. Через поперечную горизонтальную распределительную трубу с вертикальными патрубками диффузорами вода распределяется по ширине и глубине зоны грубой очистки. Там в течение нескольких минут выделяется основное количество грубодиспергированной нефти и осадка.

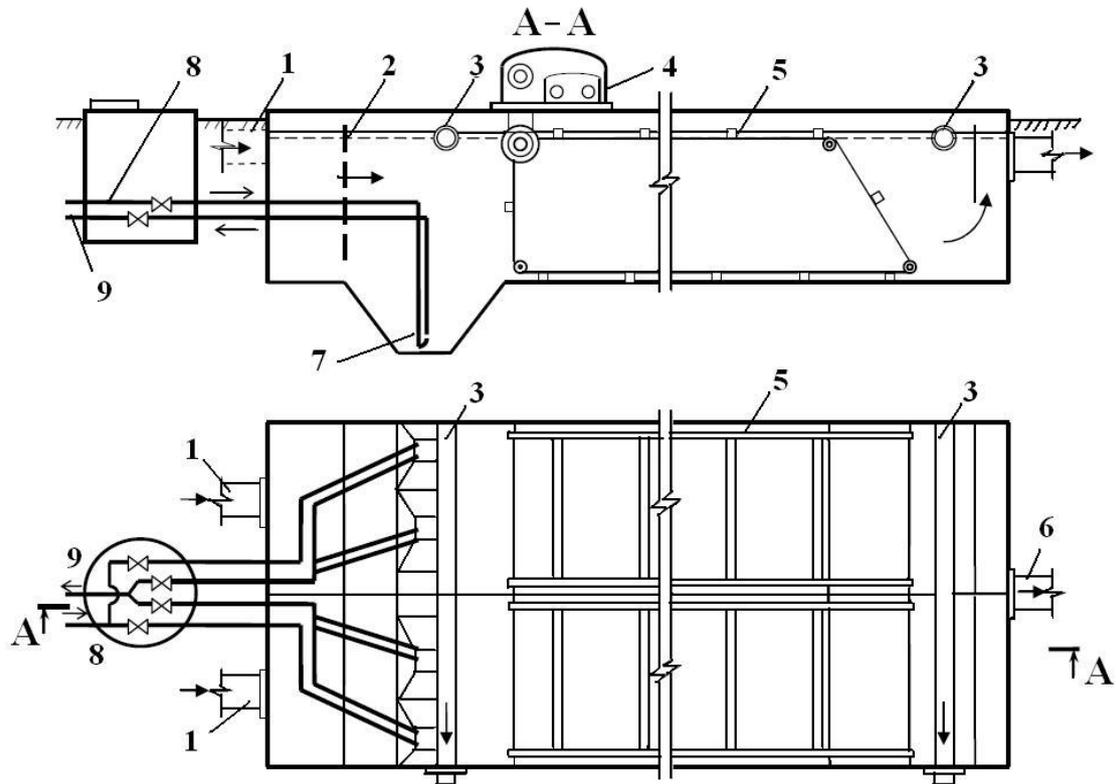


Рис. 3.24. Горизонтальная нефтеловушка: 1 — подводящая труба, 2 — щелевая распределительная перегородка, 3 — нефтесборная труба, 4 — механизм передвижения скребков, 5 — скребковый транспортер, 6 — трубопровод отвода осветленной воды, 7 — гидроэлеватор, 8 — подача воды к гидроэлеватору, 9 — отвод осадка

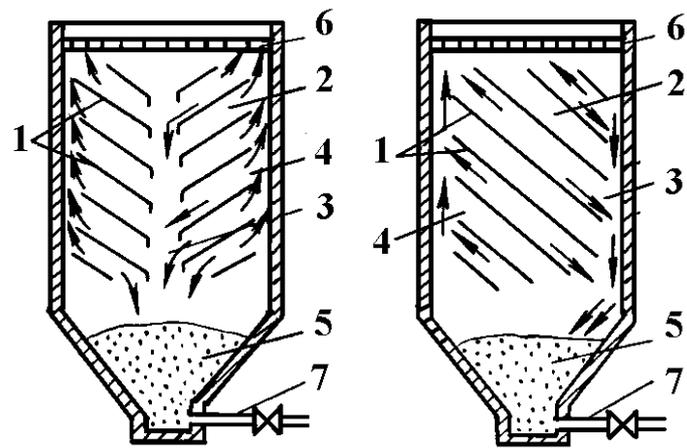


Рис. 3.25. Схемы многоярусных маслотовушек (поперечные разрезы): 1 — пластины между ярусами, 2 — зона расслоения суспензии, 3 — зона сползания осадка, 4 — зона всплывания масел, 5 — осадок, 6 — всплывшие масла, 7 — отвод осадка

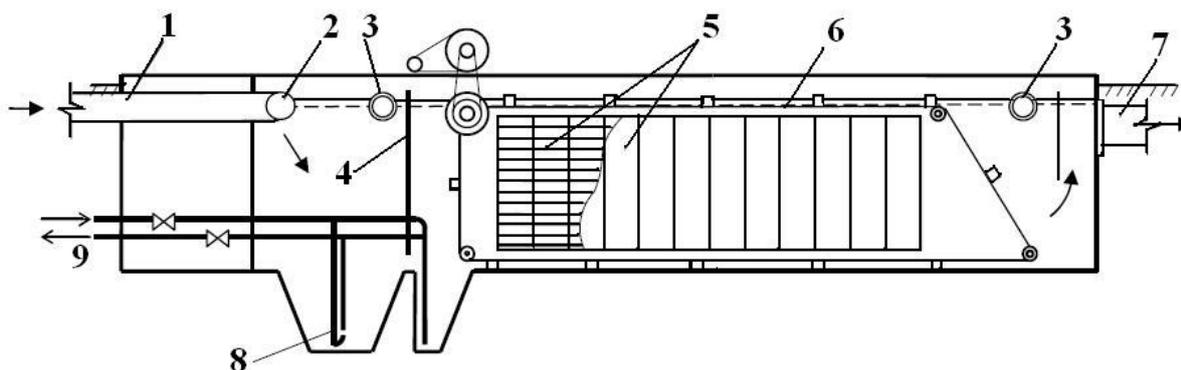


Рис.3.26. Многоярусная нефтеловушка: 1 — подводящая труба, 2 — водораспределительная труба, 3 — нефтесборная труба, 4 — пропорциональное водораспределительное устройство, 5 — тонкослойный модуль, 6 — скребковый механизм, 7 — трубопровод отводы осветленной воды, 8 — гидроэлеватор, 9 — отвод осадка

Затем поток проходит через пропорциональное водораспределительное устройство и поступает в полочный блок, который работает по перекрестной схеме. Поток осветленной воды проходит под полупогружной перегородкой и выводится через водослив и сборный лоток.

Нефтепродукты, всплывшие в зоне грубой очистки, отводятся через щелевую поворотную трубу. Над тонкослойными блоками нефтепродукты сгоняются скребками в направлении потока к концу отстойной зоны. Через вторую поворотную трубу они выводятся из сооружения. Осадок удаляют с помощью гидроэлеватора.

### ***Расчет масло(нефте)ловушек***

1. Расчет масло(нефте)ловушек начинают с определения гидравлической крупности частиц (капель) масла  $u_0$ , мм/с

$$u_0 = \frac{10^3(\rho - \rho_0)gd^2}{18\eta}, \quad (3.45)$$

где  $\rho$  — плотность частиц (капель), кг/м<sup>3</sup>, (принимают равной  $(0,76 - 0,85) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>),  $\rho_0$  — плотность среды (воды), кг/м<sup>3</sup>,  $g$  — ускорение

свободного падения,  $m/s^2$ ,  $d$  — диаметр частиц (капель), м,  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости сточной воды, Па·с.

Формула (3.45) отличается от формулы (3.7) только коэффициентом, переводящим размерность м/с в мм/с.

2. Для горизонтальных маслоловушек назначают ширину секции  $B$ , м, и глубину воды в зоне отстаивания  $H_{set}$ , м, в зависимости от пропускной способности маслоловушки  $q$ ,  $m^3/ч$ , (см. табл. 3.13)

Таблица 3.13

**Размеры секции маслоловушки, назначаемые в зависимости от пропускной способности маслоловушки**

$q$ , $m^3/ч$	$<162$	$\geq 162$
$B$ , м	2 – 3	6
$H_{set}$ , м	1,2 – 1,5	2

3. Принимают скорость движения воды  $v = 3 – 10$  мм/с. Определяют продолжительность всплывания капель  $t$ , ч

$$t = \frac{H_{set}}{3,6 \cdot v}, \quad (3.46)$$

4. В зависимости от соотношения  $v/u_0$  по табл. 3.14 определяют коэффициент, учитывающий турбулентность потока воды  $a$ :

Таблица 3.14

**Определение коэффициента турбулентности**

$v/u_0$	0,1	10	15	20
$a$	1,2	1,5	1,65	1,75

5. Рассчитывают длину отстойной части нефтеловушки  $L$ , м

$$L = a \frac{v}{u_0} H_{set}. \quad (3.47)$$

6. По рассчитанной длине определяют продолжительность отстаивания  $t'$ , ч

$$t' = \frac{L}{3,6 \cdot v}, \quad (3.48)$$

Рассчитанная продолжительность отстаивания  $t'$  должна быть не менее  $t$ . В противном случае изменяют глубину слоя воды  $H_{set}$  или скорость движения воды  $v$ .

7. Определяют количество осадка  $Q_{mud}$ , м<sup>3</sup>/сут, выделяемого при отстаивании за сутки

$$Q_{mud} = \frac{Q \cdot C \cdot \varepsilon}{(100 - p_{mud}) \cdot \rho_{mud} \cdot 10^6}, \quad (3.49)$$

где  $Q$  — суточный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/сут,  $C$  — концентрация механических примесей в сточной воде, примерно равная 500 мг/л,  $\varepsilon$  — эффект задержания осаждающихся примесей, равный для горизонтальных маслоловушек 60 – 70 %, для многоярусных и радиальных — до 75 %,  $p_{mud}$  — влажность осадка, равная для свежес выпавшего осадка 95 %, для слежавшегося — 70 %,  $\rho_{mud}$  — плотность осадка, равная 2,65 т/м<sup>3</sup>.

8. Определяют количество нефтепродуктов  $Q_{oil}$ , м<sup>3</sup>/сут, задержанных за сутки

$$Q_{oil} = \frac{Q \cdot (A_{en} - A_{ex})}{\rho_{oil} \cdot 30 \cdot 10^4}, \quad (3.50)$$

где  $A_{en}$  и  $A_{ex}$  — концентрация нефтепродуктов соответственно в исходной и осветленной воде, мг/л,  $\rho_{oil}$  — плотность обводненных нефтепродуктов, равная 0,95 т/м<sup>3</sup>.

В табл. 3.15 приведены параметры типовых масло(нефте)ловушек, которые можно выбрать при известном расходе сточных вод.

Таблица 3.15

### Основные параметры горизонтальных нефтеловушек

Глубина проточной части, м	Строительные размеры секций, м			Число секций	Пропускная способность, м <sup>3</sup> /ч
	ширина	длина	высота		
1,2	2	12	2,4 и 3,6	1	18
1,2	2	12		2	36

Таблица 3.15 (окончание)

Глубина проточной части, м	Строительные размеры секций, м			Число секций	Пропускная способность, м <sup>3</sup> /ч
	ширина	длина	высота		
1,25	3	18	2,4 и 3,6	2	72
1,5	3	24		2	108
2	3	30		2	162
2	6	36	2,4	2	396
				3	594
				4	792

### **Задание 3**

1. Выведите зависимости скорости оседания частиц в гравитационном поле для турбулентного (по Ньютону) и промежуточного (по Аллену) режимов.

2. Рассчитайте параметры горизонтальной песколовки при размере зерен песка равном 0,1 мм и расходе сточных вод равном 20000 м<sup>3</sup>/сут.

3. Рассчитайте параметры горизонтального отстойника для очистки бытовых сточных вод при концентрации взвешенных примесей, равной 350 мг/л и расходе, равном 30000 м<sup>3</sup>/сут.

4. Рассчитайте параметры вертикального отстойника с центральной трубой для очистки бытовых сточных вод при концентрации взвешенных примесей 400 мг/л и расходе 15000 м<sup>3</sup>/сут.

5. Рассчитайте параметры горизонтальной нефтеловушки при расходе производственных сточных вод 7500 м<sup>3</sup>/сут и содержании нефти в поступающей воде 120 мг/л. Содержание нефтепродуктов в осветленной воде должно быть 60 мг/л. Коэффициент динамической вязкости сточной воды 5 мПа·с, плотность нефтепродуктов 0,81·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>.

## 4. ОСАЖДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ

### 4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОСАЖДЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ

В центробежном поле осаждение частиц происходит под действием центробежной силы  $f_{цб}$

$$f_{цб} = m'w^2x, \quad (4.1)$$

где  $x$  — расстояние до оси вращения,  $w$ , рад/с, — угол поворота  $\Delta\varphi$  в

единицу времени  $\Delta t$ :  $w = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T_{об}} \cdot \frac{x}{x} = \frac{2\pi x}{T_{об}} \cdot \frac{1}{x} = \frac{v_{\tau}}{x} = 2\pi \cdot n$ ,  $T_{об}$  —

время одного полного оборота,  $v_{\tau}$  — линейная тангенциальная скорость движения частицы,  $n$  — число оборотов в единицу времени.

При движении частицы в жидкой (и газообразной) среде возникает встречная сила вязкого сопротивления среды  $f_{сопр}$ . При установлении равномерного движения центробежная сила равна силе сопротивления среды:

$$f_{цб} = f_{сопр}. \quad (4.2)$$

Для условий ламинарного режима движения шарообразной частицы запишем следующие равенства, соответствующие трем вариантам выражения центробежной силы (через угловую, тангенциальную скорости и число оборотов в единицу времени):

$$w^2x \frac{\pi d^3}{6} (\rho - \rho_0) = 3\pi\eta v_{цб}, \quad (4.3)$$

$$\frac{v_{\tau}^2 \pi d^3}{x \cdot 6} (\rho - \rho_0) = 3\pi\eta v_{цб}, \quad (4.4)$$

$$\frac{2\pi^3 n^2 \cdot x \cdot d^3}{3} (\rho - \rho_0) = 3\pi\eta v_{цб}. \quad (4.5)$$

Решение уравнений (4.3) – (4.5) приводит к выражениям:

$$v_{цб} = \frac{w^2 \cdot x \cdot (\rho - \rho_0)}{18\eta} \cdot d^2, \quad (4.6)$$

$$v_{цб} = \frac{v_{\tau}^2 \cdot (\rho - \rho_0)}{18\eta \cdot x} \cdot d^2, \quad (4.7)$$

$$v_{цб} = \frac{2\pi^2 n^2 \cdot x \cdot (\rho - \rho_0)}{9\eta} \cdot d^2, \quad (4.8)$$

из которых видно, что для ламинарного режима скорость оседания (всплывания) частиц в центробежном поле пропорциональна квадрату диаметра частиц.

Если плотность частиц  $\rho$  больше плотности среды  $\rho_0$  («оседающие» частицы), то они будут двигаться от оси вращения. Если плотность частиц меньше плотности среды («всплывающие» частицы), то перемена знака у члена  $(\rho - \rho_0)$  показывает, что они будут двигаться к оси вращения.

Сравнение формул (4.6) – (4.8) с формулой (3.7) для скорости оседания частиц в гравитационном поле, показывает, что центробежное поле дает выигрыш во столько раз, во сколько значение  $w^2 x$  или  $\frac{v_{\tau}^2}{x}$ , или  $4\pi^2 n^2 x$  превышают значение ускорения свободного падения  $g$ :

$$\frac{v_{цб}}{v_{грав}} = w^2 x : g, \quad \frac{v_{цб}}{v_{грав}} = \frac{v_{\tau}^2}{x} : g, \quad \frac{v_{цб}}{v_{грав}} = 4\pi^2 n^2 x : g. \quad (4.9)$$

Для нахождения времени, необходимого для перемещения частицы в центробежном поле вдоль оси вращения от расстояния  $x_1$  до расстояния  $x_2$ , необходимо решить одно из уравнений (4.3) – (4.5), выразив скорость перемещения  $v_{цб}$  через  $\frac{dx}{dt}$ .

Выполним, к примеру, вычисления для выражения (4.3). После разделения переменных и интегрирования получим

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x} = \int_0^t \frac{d^2 w^2 \cdot (\rho - \rho_0)}{18\eta} dt, \text{ откуда}$$

$$t = \frac{18\eta}{d^2(\rho - \rho_0)w^2} \ln \frac{x_2}{x_1}. \quad (4.10)$$

Рассмотрим осаждение частиц в центробежном поле для турбулентного (по Ньютону) и промежуточного (по Аллену) режимов по аналогии с процессом осаждения частиц в гравитационном поле (см. подразд. 3.1).

Выполним преобразования для случая выражения центробежной силы через число оборотов в единицу времени.

Так, для промежуточного режима имеем следующие выражения для коэффициента сопротивления и силы сопротивления:

$$\zeta_{\text{сопр}} = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}, \quad f_{\text{сопр}} = 2,3\pi v_{\text{цб}}^{1,4} \cdot \eta^{0,6} \cdot d^{1,4} \cdot \rho_0^{0,4}, \text{ откуда}$$

$$\frac{2\pi^3 d^3 n^2 x \cdot (\rho - \rho_0)}{3} = 2,3\pi v_{\text{цб}}^{1,4} \cdot \eta^{0,6} \cdot d^{1,4} \cdot \rho_0^{0,4} \text{ и}$$

$$v_{\text{цб}} = \left( \frac{2\pi^2 n^2 x \cdot (\rho - \rho_0)}{6,9 \cdot \eta^{0,6} \cdot \rho_0^{0,4}} \right)^{\frac{5}{7}} \cdot d^{1,143}. \quad (4.11)$$

Для турбулентного режима  $\zeta_{\text{сопр}} \cong 0,44$ ,

$$f_{\text{сопр}} = \frac{0,44 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot 2 \cdot v_{\text{цб}}^2 \cdot \rho_0}{2 \cdot 4}, \text{ откуда}$$

$$\frac{2\pi^3 d^3 n^2 x \cdot (\rho - \rho_0)}{3} = \frac{0,44 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot v_{\text{цб}}^2 \cdot \rho_0}{2 \cdot 4} \text{ и}$$

$$v_{\text{цб}} = 2n\pi \sqrt{\frac{x(\rho - \rho_0)}{0,33\rho_0}} \cdot \sqrt{d}. \quad (4.12)$$

Таким образом, вид функциональных зависимостей скорости оседания (всплывания) частиц в центробежном поле от диаметра частиц остался

таким же, как и для процесса осаждения в гравитационном поле, изменились только коэффициенты, не зависящие от размера частиц.

Центробежное поле используют для разделения пыли, суспензий и эмульсий.

Для создания поля центробежных сил применяют два приема:

- обеспечивают круговое движение потока жидкости (газа) в неподвижном аппарате;

- поток направляют во вращающийся аппарат, где продукты вращаются вместе с аппаратом.

В первом случае осуществляется циклонный процесс, во втором — осадительное центрифугирование.

## **4.2. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В ГИДРОЦИКЛОНАХ**

К основным достоинствам гидроциклонов можно отнести:

- высокую удельную производительность по обрабатываемой суспензии;

- сравнительно низкие затраты на строительство и эксплуатацию установок;

- отсутствие вращающихся механизмов, предназначенных для создания центробежного поля;

- возможность создания компактных автоматизированных установок.

Гидроциклоны по сравнению с отстойниками требуют меньше капитальных затрат. Они занимают значительно меньше места и могут быть расположены непосредственно в цехе.

В практике очистки сточных вод применяют напорные, безнапорные, многоярусные, комбинированные гидроциклоны.

### ***Напорные гидроциклоны***

Напорные циклоны применяют для выделения из производственных сточных вод грубодисперсных примесей в основном минерального происхождения, плотность которых отличается от плотности жидкой среды. К ним относятся частицы песка, угла, окарины,

компонентов керамики, стекла, строительных материалов, диспергированных отходов литейного, горно-рудничного, асбестоцементного, химического и металлургического производств. Напорные циклоны применяют для очистки сточных вод, сгущения осадков, обогащения известкового молока, удаления абразивных примесей из сырых осадков станций аэрации. Реже напорные циклоны применяют при очистке сточных вод от масел, т. е. от всплывающих примесей.

Напорный гидроциклон (рис. 4.1) представляет собой аппарат, состоящий из цилиндрической (короткой) и конической (длинной) частей с разгрузочным шламовым отверстием в вершине конуса и со сливным патрубком в верхнем основании цилиндра.

Схема движения жидкости в напорном аппарате представлена на рис. 4.2. Жидкость под напором поступает через входное отверстие, расположенное тангенциально к цилиндрической части. Внутри корпуса аппарата создается вихревой поток жидкости (внешний поток), который, вращаясь, движется к вершине конуса и одновременно в радиальном направлении. Затем он резко меняет направление, образуя восходящий (внутренний) поток, и удаляется через сливной патрубок. Направления вращения внешнего и внутреннего потоков совпадают. Небольшая часть жидкости выходит из гидроциклона через шламовое отверстие. Изменение направления осевого потока с нисходящего на восходящее происходит возле воображаемой конической поверхности — «конуса поворота».

Восходящий поток жидкости с внутренней стороны ограничивается воздушным столбом. Его диаметр зависит от скорости вращения потока и от диаметров сливного и шламового отверстий. Если закрыть шламовое отверстие, то воздушный столб за счет пузырьков воздуха, выделяющихся из воды, сохранится в виде очень тонкого шнура вдоль оси гидроциклона. Уменьшение или исчезновение воздушного столба наблюдается при значительных сопротивлениях на сливном патрубке, например, при работе с противодавлением или при

уменьшении сечения сливного патрубка, а также при малых давлениях на входе в гидроциклон.

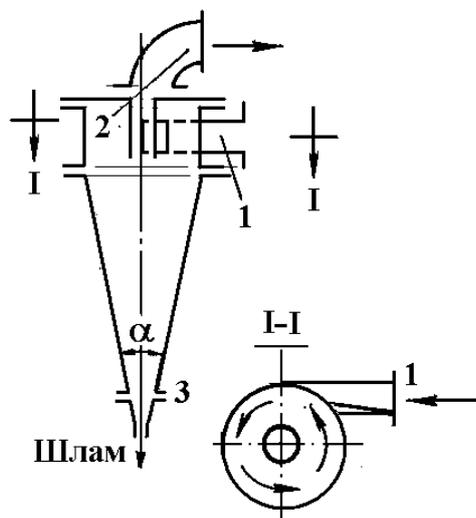


Рис. 4.1 Схема напорного гидроциклона:

- 1 — входной патрубок,
- 2 — сливной патрубок,
- 3 — шламовая насадка

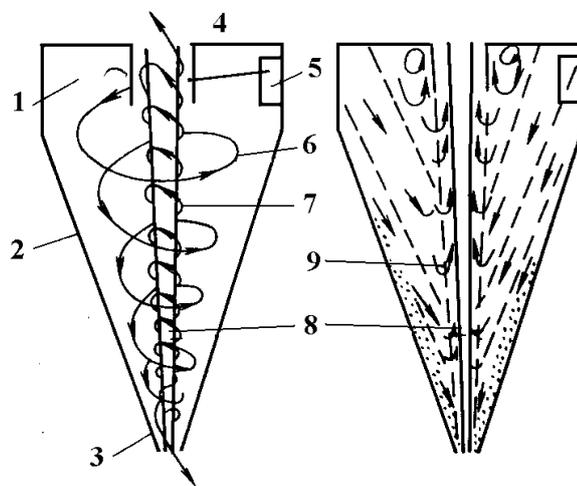


Рис. 4.2. Схема движения потоков жидкости в напорном гидроциклоне:

- 1 — цилиндрическая часть,
- 2 — коническая часть, 3 — шламовое отверстие, 4 — сливное отверстие,
- 5 — входное отверстие, 6 — нисходящий наружный поток, 7 — восходящий внутренний поток, 8 — воздушный столб,
- 9 — конус поворота

Напорные гидроциклоны могут быть единичными и батарейными (см. рис. 4.3). В батарейных гидроциклонах и мультициклонах реализованы основные преимущества гидроциклонов малого диаметра: высокая эффективность осветления сточных вод, высокая производительность, компактность.

В гидроциклонах создается достаточно устойчивый эффект осветления. Для этого следует выдерживать заданный технологический режим по напору и оптимальные параметры, которые подбирают регулировкой. Улучшить эффект осветления можно путем повышения напора перед гидроциклоном, регулированием диаметров сливного и шламового отверстия.

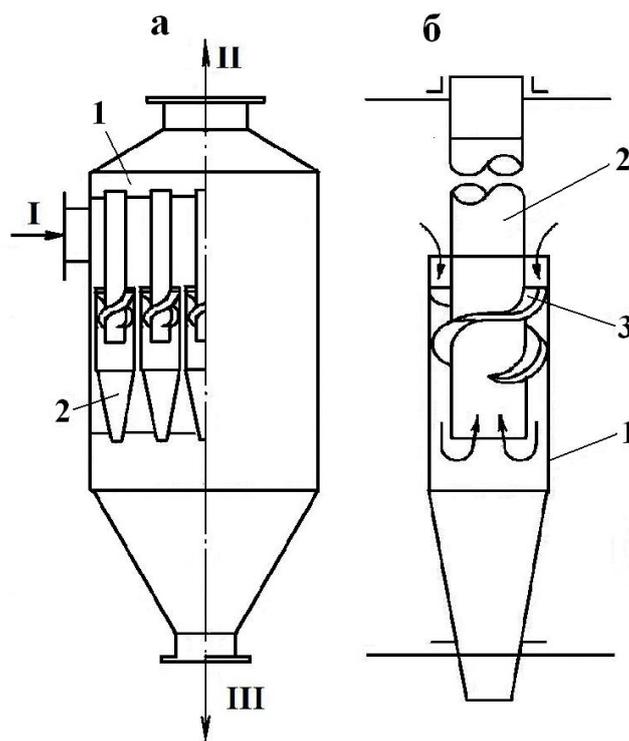


Рис. 4.3. Батарейный циклон (а): 1 — перегородка, 2 — элементы, I — подача сточных вод, II — очищенные воды, III — шлам; элемент батарейного циклона (б): 1 — корпус; 2 — выходная труба, 3 — винтовые лопасти

Эффект работы гидроциклонов с противодавлением близок к эффекту осветления гидроциклонов без противодавления, поэтому гидроциклоны можно применять в системах с подачей осветленной воды под остаточным напором непосредственно к потребителю или на дальнейшую обработку.

В зависимости от требуемой эффективности очистки сточных вод обработку в напорных гидроциклонах можно осуществлять в одну-три ступени путем последовательного соединения аппаратов, с разрывом и без разрыва струи.

Для снижения потерь воды со шламом целесообразно к шламовой насадке гидроциклона первой ступени герметично присоединять бункер (шламовый резервуар). На первой ступени следует использовать гидроциклоны больших размеров для задержки основной массы взвешенных веществ и более крупных частиц, которые могут засо-

ритель гидроциклоны малых размеров, используемые на последующих ступенях установки. Шламы, выделенные в гидроциклонах, содержат значительно меньше масел, чем во вторичных отстойниках.

Разработаны две модификации конструкции напорных гидроциклонов: 1) с монолитными элементами рабочей камеры и диаметром цилиндрической части от 25 до 80 мм, 2) со съемными элементами рабочей камеры (рис. 4.4) и с диаметрами, равными 100 – 500 мм.

Аппараты первой модификации изготавливают из нержавеющей стали, полиэтилена и полиуретана, а корпус аппарата второй модификации из нержавеющей стали или с покрытием внутренней поверхности износостойкой эмалью.

При необходимости выделения из воды тяжелых взвешенных веществ и масел применяют двухступенчатую очистку. На первой ступени производят очистку от масел. При этом основную часть воды отводят из аппарата через нижнюю шламовую насадку; незначительный центральный поток, в котором концентрируются масла, выпускают через сливной патрубок. Воду из шламовой насадки подают на вторую ступень — в гидроциклон, где отделяются тяжелые взвешенные вещества.

Одновременное выделение из сточной воды оседающих и всплывающих примесей можно проводить в трехпродуктовом гидроциклоне (рис. 4.5), имеющем два сливных патрубка, вставленных один в другой. Легкие масляные фракции концентрируются у оси гидроциклона и удаляются через центральный сливной патрубок. Тяжелые фракции взвешенных веществ выбрасываются через шламовое отверстие; промежуточный поток воды, свободный от взвешенных веществ и масла, уходит через кольцевое пространство между патрубками.

Недостатком трехпродуктовых гидроциклонов является то, что через центральный сливной патрубок вместе с маслом удаляется воздух и часть воды, расход которых зависит от режима работы гидроциклона. Таким образом, уловленные масла оказываются сильно об-

водненными. Улучшить регулировку отводимой водо-масло-воздушной смеси можно при выпуске воздуха из камеры улавливаемых масел. В таких аппаратах при исходном содержании масел 60 – 215 мг/л после очистки воды остается 40 – 95 мг/л.

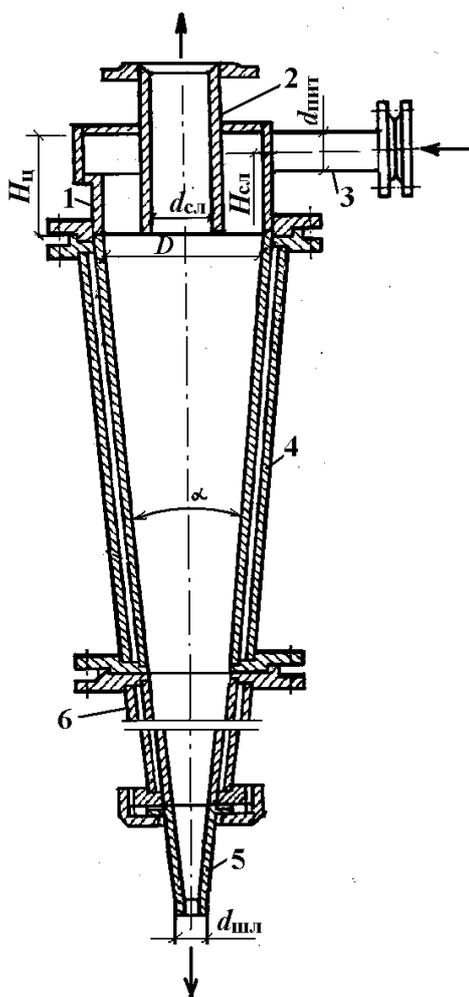


Рис. 4.4. Напорный гидроциклон со съемными элементами рабочей камеры: 1 — цилиндрическая часть, 2 — сливной патрубок, 3 — питающий патрубок, 4 — корпус, 5 — шламовый патрубок, 6 — съемная вставка

При очистке сточных вод трубопрокатного завода с исходной концентрацией окалины 130 – 160 мг/л и масел 10 – 15 мг/л трехпро-

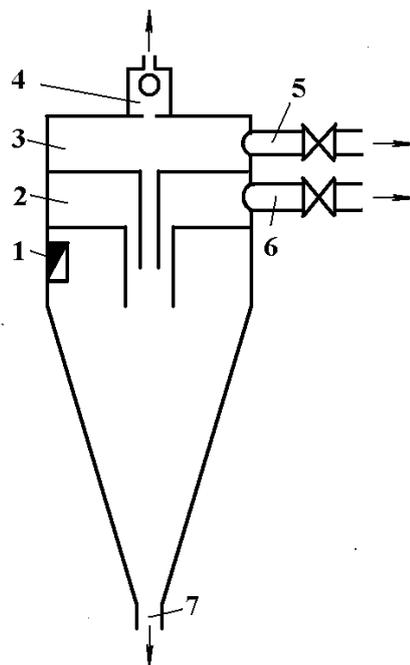


Рис. 4.5. Схема напорного трехпродуктового гидроциклона: 1 — входное отверстие, 2 — камера осветленной воды, 3 — камера для уловленных масел, 4 — устройство для выпуска масел, 5 — отвод масел, 6 — отвод осветленной воды, 7 — отвод шлама

дуктовые циклоны задержали 60 – 70 % окалины и 10 – 15 % масел. Производительность одного циклона составляла 5 – 5,5 м<sup>3</sup>/ч.; потери воды с выделенными маслами — 6 – 20 %. Гидравлическая крупность задержанных частиц масла равнялась 0,2 – 0,5 мм/с.

При концентрации масел в исходной воде 50 – 150 мг/л в циклонах задерживалось 15 – 20 %.

При выборе конструкций напорных гидроциклонов необходимо учитывать следующие данные:

- требуемую эффективность разделения сточных вод;
- абразивные свойства твердой фазы;
- химическую агрессивность жидкой фазы;
- предельное давление перед аппаратом и требуемое давление в сливном трубопроводе;
- гранулометрический состав и плотность частиц твердой фазы;
- механическую прочность частиц твердой фазы;
- производительность установки.

При выборе размеров конструктивных элементов гидроциклонов необходимо руководствоваться следующими общими рекомендациями. Размеры питающего, сливного и шламового патрубков принимаются с учетом соотношений:

$$d_{\text{пит}} / d_{\text{сл}} = 0,5...1,0; \quad (4.13)$$

$$d_{\text{пит}} / D = 0,12...0,4; \quad (4.14)$$

$$d_{\text{пит}} \leq (D - d_{\text{сл}}) / 2 - \Delta; \quad (4.15)$$

$$d_{\text{шл}} / d_{\text{сл}} = 0,2...1,0, \quad (4.16)$$

где  $\Delta$  — толщина стенки сливного патрубка.

Для предупреждения забивки шламового отверстия гидроциклона крупными частицами твердой фазы его минимальный диаметр должен превышать максимальный размер частиц твердой фазы в 6 – 8 раз.

Высота цилиндрической части для гидроциклонов-осветлителей должна приниматься  $H_{ц} = (2...4)D$ , а для гидроциклонов-сгустителей  $H_{ц} = (1...2)D$ .

Угол конусности конической части  $\alpha$  принимается равным  $5 - 15^\circ$  для гидроциклонов-осветлителей и  $20 - 45^\circ$  для гидроциклонов-сгустителей.

Давление питания напорных гидроциклонов следует принимать равным  $0,15 - 0,4$  МПа при одноступенчатых схемах осветления сточных вод и сгущения осадков, а также при использовании многоступенчатых установок, работающих с разрывом струи; равным  $0,35 - 0,6$  МПа при двух- и трехступенчатых схемах установок, работающих без разрыва струи.

### ***Открытые гидроциклоны***

Открытые гидроциклоны применяют для выделения всплывающих и оседающих грубодисперсных примесей гидравлической крупностью более  $0,2$  мм/с.

Открытые безнапорные гидроциклоны имеют цилиндрическую форму с конусообразным днищем (см. рис. 4.6). Вращательное движение в аппарате создается с помощью тангенциально расположенного входного патрубка. В возникающем центробежном поле оседающие (тяжелые) примесные частицы перемещаются к стенке циклона и затем выпадают в конусную часть. Осветленная вода отводится тонким слоем через водослив в верхней периферийной части аппарата, отделенной от всплывающих масел полупогруженной перегородкой. Всплывающие (масляные) частицы движутся в сторону оси гидроциклона и, поднимаясь вверх вместе с восходящим потоком воды, задерживаются на большой площади у ее поверхности. Уловленные масла с поверхности воды удаляют с помощью переливных воронок, лотков и скребков в емкости для хранения масел. Осадок, выпавший в конусную часть, удаляют по мере накопления (например, гидроэлеватором или выпускают через вершину конуса).

Открытые гидроциклоны обладают рядом преимуществ перед напорными. Так, они имеют сравнительно небольшие скорости входа, поэтому гораздо меньшее гидравлическое сопротивление — потери давления в них не превышают 0,05 МПа. Открытые гидроциклоны высокопроизводительны, что важно при больших расходах сточных вод.

Применяют следующие типы открытых гидроциклонов:

- без внутренних устройств (рис. 4.6, а) для выделения из сточных вод крупных и мелкодисперсных веществ (рекомендуется для частиц с гидравлической крупностью  $U_0$ , начиная с 5 мм/с);

- с конической диафрагмой (рис. 4.6, б) и с внутренним цилиндром для выделения оседающих и всплывающих мелкодисперсных взвешенных веществ, а также с форкамерой (рис. 4.6, в) (рекомендуется для частиц с  $U_0 > 0,2 - 0,3$  мм/с и расходов сточных вод  $q_w$  не более 200 м<sup>3</sup>/ч);

- многоярусный с наклонными выпусками осветленной воды из каждого яруса (рис. 4.7, а) для выделения крупных и мелкодисперсных взвешенных веществ;

- многоярусный с периферийным отбором осветленной воды (рис. 4.7, б) для выделения оседающих крупно- и мелкодисперсных веществ.

Открытый гидроциклон простейшей конструкции (рис. 4.6, а) имеет существенный недостаток — часть оседающих веществ, концентрирующихся у стенок цилиндрической части, захватывается потоком, который движется в пристенной зоне, и выносится из аппарата.

Вынос частиц можно уменьшить установкой диафрагмы в верхней части гидроциклона (рис. 4.6, б). Однако под диафрагмой могут накапливаться взвешенные вещества и также периодически выноситься из аппарата. Этот недостаток устраняется установкой внутреннего цилиндра. Исходную воду подают тангенциально в пространство, ограниченное внутренним цилиндром. Восходящий поток, дойдя до верха цилиндра, разделяется на два. Основной поток движется по

спирали к центральному отверстию в диафрагме. Второй поток, в котором концентрируются выделившиеся в восходящем потоке тяжелые взвешенные вещества, направляется под диафрагму в пространство между стенками цилиндра и гидроциклона. Этот поток не дает скапливаться взвешенным веществам под диафрагмой, он смывает их в коническую часть.

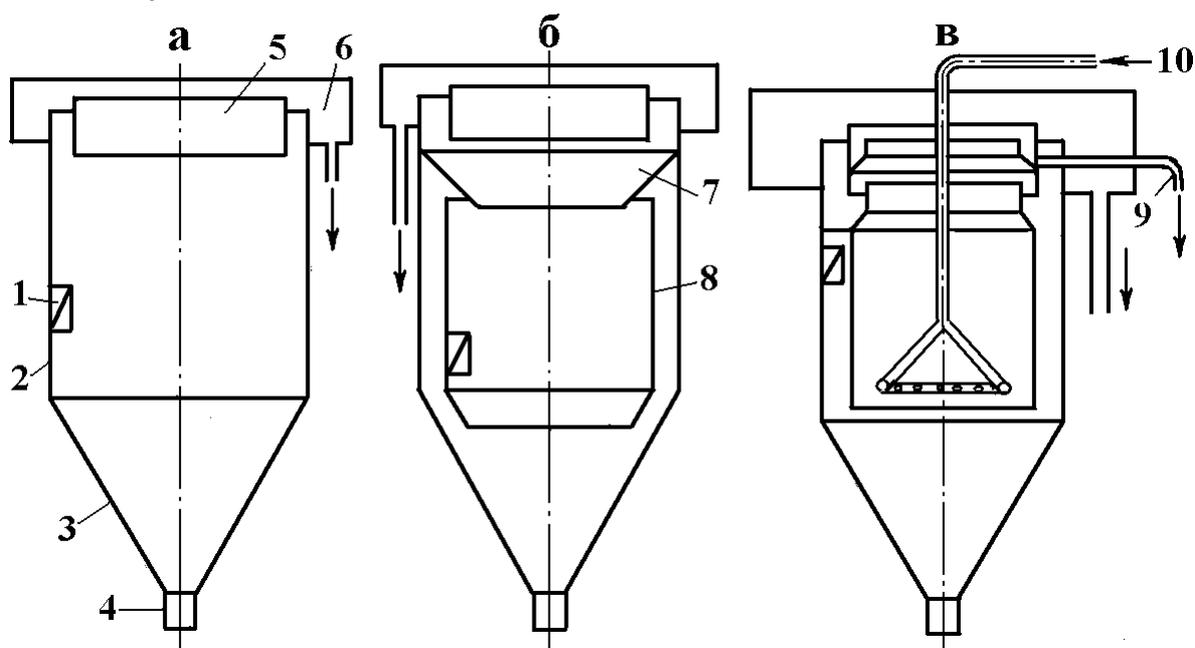


Рис. 4.6. Схемы конструкций открытых безнапорных гидроциклонов: а — простейшей конструкции; б — с диафрагмой и внутренним цилиндром; в — с форкамерой; 1 — входное отверстие. 2 — цилиндрическая часть, 3 — коническая часть, 4 — патрубок для отвода шлама, 5 — маслоудерживающее полупогруженное кольцо, 6 — лоток для осветленной воды, 7 — коническая диафрагма, 8 — внутренняя стенка (цилиндр), 9 — отвод уловленных масел, 10 — трубопровод для подачи воздуха или водовоздушной смеси

Полезный объем в данном гидроциклоне больше, чем у аппарата простейшей конструкции, но тем не менее, составляет только 25 %. При этом наибольшая эффективность обеспечивается в гидроциклоне при соотношении между диаметром отверстия в диафрагме и диаметром циклона, равном 0,5.

В открытом гидроциклоне с двойной стенкой (рис. 4.6, в) внутри цилиндрической части формируется кольцевая форкамера, предназначенная для равномерного распределения воды в аппарате. Исходную воду тангенциально подают в верхнюю часть пространства между стенками циклона. Поток воды направляется вниз к конусной части. После выхода воды из-под кромки внутренней стенки отброшенные к наружной стенке взвешенные вещества продолжают двигаться вниз, в вершину конического днища. Освобожденный от тяжелых взвесей поток воды поступает в центральную часть и движется вверх, к периферийному водосливу. Масляные частицы движутся к оси аппарата и одновременно вверх, где задерживаются полупогруженным кольцом.

Такой аппарат может устойчиво работать при гидравлической нагрузке до  $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . При оптимальной нагрузке, равной  $30 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , при исходной концентрации взвешенных веществ 250 – 350 мг/л в очищенной воде остается 50 – 80 мг/л (задерживаются частицы с гидравлической крупностью 2,5 мм/с). При этом эффект осветления составляет 50 – 70 %.

Данная конструкция может быть преобразована в гидроциклон-флотатор (см. рис. 4.6, в). Количество флотационной воды должно составлять 25 – 30 % от расхода очищаемой воды, оптимальное отношение расхода воздуха к расходу воды — 3 – 6 %, давление в напорном баке — 0,3 МПа. При этом можно добиться эффекта осветления по взвешенным (оседающим) веществам равного 45 – 60 %, а по маслам 60 – 90 % при средней остаточной концентрации в очищенной воде взвешенных веществ 25 – 35 мг/л, а масел 40 – 60 мг/л.

Несмотря на достоинства, описанные типы открытых гидроциклонов имеют не очень большой полезный объем — велико влияние турбулентности. В значительной степени этот недостаток может быть устранен в многоярусных низконапорных гидроциклонах. В их конструкции совмещены принципы работы открытого гидроциклона и тонкослойного отстойника, что позволяет достигать более полного

использования объема (70 – 80 %) и высокой эффективности очистки при удельных гидравлических нагрузках не менее чем в 8 – 10 раз превышающих нагрузки на отстойники/

Многоярусный низконапорный гидроциклон с центральными выпусками (рис. 4.7, а также 4.8, а) состоит из цилиндрического корпуса с конической частью внизу. В корпус свободно вставляются конические диафрагмы, каждая из которых опирается на свои распорки. Верхняя диафрагма имеет фланец, опирающийся на специальный выступ в верхней части циклона, устроенный на уровне dna отводящего кольцевого лотка. Исходная вода подается в три аванкамеры, благодаря чему водный поток равномерно делится между ярусами. Впуск воды из аванкамеры осуществляется через три общих для всех ярусов трубы, расположенных по окружности циклона через 120 °. Рассредоточенный впуск позволяет почти полностью использовать объем ярусов циклона. Поступающая вода движется по нисходящей спирали к центру. Тяжелые частицы в центробежном поле движутся от оси циклона и попадают на нижние диафрагмы ярусов, затем сползают к центру и через шламособорную трубу, общую для всех ярусов, попадают в коническую часть. Диспергированное масло движется внутри каждого яруса к оси циклона, попадает на верхние диафрагмы ярусов и по образующей поднимается вверх. Через зазоры между диафрагмами и стенкой корпуса масло просачивается под верхнюю диафрагму и по маслоотводящим трубам выводится на поверхность.

Осветленная вода выходит из ярусов в центральную часть через три тангенциально расположенных выпускных отверстия. В центральной части водный поток поднимается вверх и через кольцевой водослив переливается в кольцевой желоб, по которому очищенная вода отводится за пределы сооружения. Для задержания масел, всплывших на поверхность, перед водосливом имеется кольцевой полупогруженный щит. Накопившееся на поверхности масло удаляется из гидроциклона через воронку, водосливная кромка которой регули-

руется по высоте. Осадок из конической части откачивают насосами, гидроэлеваторами или удаляют под гидростатическим напором.

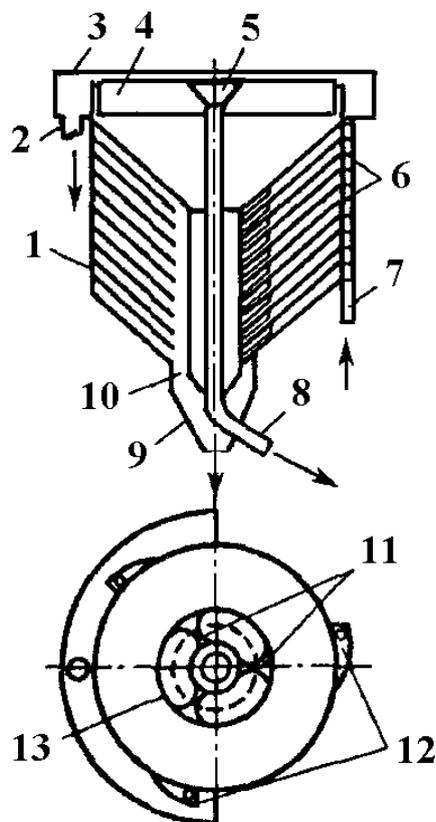


Рис. 4.7. Многоярусный гидроциклон с наклонными патрубками для отвода очищенной воды: 1 — конические диафрагмы, 2 — отвод воды, 3 — лоток, 4 — водослив, 5 — маслосборная воронка, 6 — распределительные лотки, 7 — подача сточной воды, 8 — отвод масла, 9 — удаление шлама, 10 — шламоотводящая щель, 11 — наклонные выпуски, 12 — аванкамеры, 13 — шламоотсекающая диафрагма

На рис. 4.8, б, приведена схема многоярусного гидроциклона с периферийным отбором. Он имеет конические диафрагмы специальной конструкции, которые направляют движение воды в четных ярусах прямоточно, в нечетных — противоточно движению осадка, т. е. от центра к периферии. Благодаря этому осадок, сползающий вниз, меньше размывается потоками воды.

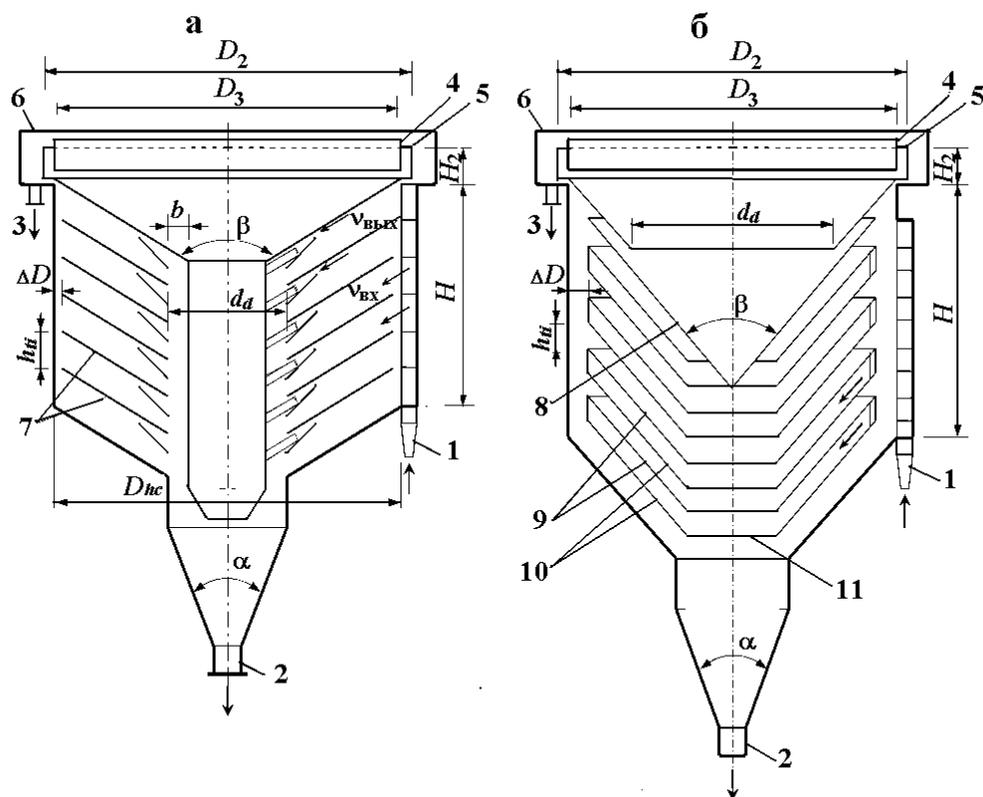


Рис. 4.8. Схемы многоярусных гидроциклонов: а — с центральными выпусками; б — с периферийным отбором, 1 — водоподающая труба, 2 — шламоотводящая труба, 3 — водоотводящая труба, 4 — полупогруженная кольцевая стенка, 5 — кольцевой водослив, 6 — водосборный кольцевой лоток, 7 — конические диафрагмы, 8 — направляющая диафрагма, 9 — промежуточные диафрагмы, 10 — нижние диафрагмы, 11 — шламоотводящая шахта

### 4.3. РАСЧЕТ ГИДРОЦИКЛОНОВ

#### *Расчет напорных гидроциклонов*

Рассчитывается производительность гидроциклонов и количество аппаратов. Производительность определяется в зависимости от конструктивных размеров аппаратов, давления питания и гидродинамических условий выхода жидкости и шлама. В большинстве случаев напорные циклоны работают без противодействия со стороны сливного и шламового патрубков, т. е. давление на выходе из сливного и

шламового патрубков соответствует атмосферному ( $P_{сл} = P_{ат}$ ,  $P_{шл} = P_{ат}$ ).

Последовательность расчетов включает:

1. Определение диаметра гидроциклона ( $D_{hc}$ )<sup>1</sup> по крупности задерживаемых частиц ( $\delta$ ) на основании данных табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Соответствие диаметра гидроциклона размеру задерживаемых частиц**

$D_{hc}$ , мм	25	40	60	80	100	125
$\delta$ , мкм	8 – 25	10 – 30	15 – 35	18 – 40	20 – 50	25 – 60

$D_{hc}$ , мм	160	200	250	320	400	500
$\delta$ , мкм	30 – 70	35 – 85	40 – 110	45 – 150	50 – 170	55 – 200

2. Подбор марки гидроциклона и определение необходимых технических параметров по табл. 4.2 – 4.3.

Таблица 4.2

**Размеры основных узлов и деталей напорных гидроциклонов с монолитными элементами рабочей камеры**

Показатели	Марка гидроциклона			
	ГН-25	ГН-40	ГН-60	ГН-80
Диаметр цилиндрической части $D$ , мм	25	40	60	80
Диаметр, мм: питающего патрубка $d_{пит}$	6	6	8	10
	8	8	12	12
эквивалентный $d_{пит}^{эkv}$	-	12	16	20
	-	-	-	25

<sup>1</sup> Здесь и далее в формулах использованы индексы в соответствии со СНиП 2.04.03-85

Таблица 4.2 (окончание)

Показатели	Марка гидроциклона			
	ГН-25	ГН-40	ГН-60	ГН-80
Диаметр сливного патрубка $d_{сл}$ , мм	6	8	12	16
	8	12	16	20
	12	16	20	32
Диаметр шламового патрубка $d_{шл}$ , мм	4	4	5	6
	5	5	6	8
		6	8	10
				12
Угол конусности конической части $\alpha$ , град	5	5	5	5
	10	10	10	10
Высота цилиндрической части $H_{ц}$ , мм	25	40	60	80
	50	80	120	160
	75	120	180	240
	100	160	240	320
Глубина погружения сливного патрубка $H_{сл}$ , мм	10	16	25	32
	16	25	32	40
	25	32	40	64

Таблица 4.3

**Размеры основных узлов и деталей напорных гидроциклонов  
со съёмными элементами рабочей камеры**

Показатели	Марка гидроциклона							
	ГНС-100	ГНС-125	ГНС-160	ГНС-200	ГСН-250	ГСН-320	ГСН-400	ГСН-500
Диаметр цилиндрической части $D$ , мм	100	125	160	200	250	320	400	500
Диаметр, мм: питающего патрубка $d_{пит}$	12	16	20	25	32	50	60	80
	16	25	25	32	40	60	80	100

Таблица 4.3 (окончание)

Показатели	Марка гидроциклона							
	ГНС-100	ГНС-125	ГНС-160	ГНС-200	ГСН-250	ГСН-320	ГСН-400	ГСН-500
эквивалентный $d_{\text{ПИТ}}^{\text{ЭКВ}}$	25	32	40	50	60	80	100	125
	32	40	50	60	80	100	125	160
Диаметр сливного патруб- ка $d_{\text{сл}}$ , мм	20	25	32	40	50	60	80	100
	32	32	40	50	60	80	100	125
	40	40	50	60	80	100	125	160
		50	60	80	100	125	160	200
Диаметр шламового патрубка $d_{\text{ШЛ}}$ , мм	8	10	12	16	16	16	20	25
	10	12	16	20	20	25	25	32
	12	16	20	25	25	32	40	50
	16	20	25	32	32	40	50	60
Угол конусности кони- ческой части $\alpha$ , град	10	10	10	10	10	15	15	15
	20	20	20	20	20	20	20	20
Высота цилиндриче- ской части $H_{\text{Ц}}$ , мм	100	125	160	200	250	320	400	50
	200	250	320	400	500	500	500	750
	300	375	480	600	750	750	800	100
	400							0
Глубина погружения сливного патрубка $H_{\text{сл}}$ , мм	40	50	64	80	100	120	160	200
	64	64	80	100	120	160	200	250
	80	480	100	120	160	200	250	320
		100	120	160	200	250	320	400

3. Определение производительности гидроциклона  $Q_{hc}$ :

$$Q_{hc} = 9,58 \cdot 10^{-3} d_{en} \cdot d_{ex} \sqrt{g\Delta P}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4.17)$$

где  $\Delta P$  — потери давления в гидроциклоне, МПа;  $d_{en}$  — диаметр питающего патрубка  $d_{ex}$  — диаметр сливного патрубка, мм.

Потери давления можно определить по табл. 4.4.

4. Определение количества рабочих аппаратов  $n$ :

$$n = q_w / Q_{hc}, \text{ шт} \quad (4.18)$$

Таблица 4.4

**Зависимость потерь давления от диаметра цилиндрической части  
напорного гидроциклона**

$D_{hc}$ , мм	50	75	250	350	500
$\Delta P$ , МПа	0,1 – 0,15	0,15 – 0,2	0,15 – 0,25	0,2 – 0,3	0,25 – 0,35

При очистке сточных вод, твердая фаза которых не обладает абразивными свойствами, число резервных аппаратов принимается равным одному при числе рабочих аппаратов до 10, двум при числе до 15, по одному на каждые 10 при числе рабочих аппаратов свыше 15.

При очистке сточных вод с абразивной твердой фазой число резервных аппаратов принимается равным 25 % от числа рабочих аппаратов.

***Расчет открытых гидроциклонов***

Расчет открытых гидроциклонов проводят в следующей последовательности:

1. Выбирают тип открытого гидроциклона. Варианты рассчитываемых аппаратов и их параметры приведены в табл. 4.5.

2. Определяют коэффициент пропорциональности, зависящий от типа гидроциклона  $K_{hc}$ :

- для циклона без внутренних устройств  $K_{hc} = 0,61$ ;

- для циклона с конической диафрагмой и внутренним цилиндром  $K_{hc} = 1,98$ ;

- для многоярусного гидроциклона с центральным выпуском

$K_{hc} = \frac{0,75n_{ti}(D_{hc}^2 - d_d^2)}{D_{hc}^2},$	(4.19)
---	--------

где  $n_{ti}$  — число ярусов (табл. 4.5);  $D_{hc}$  — диаметр гидроциклона, м (табл. 4.5),  $d_d$  — диаметр центрального отверстия диафрагмы, м (табл. 4.5);

Таблица 4.5

Основные конструктивные размеры открытых гидроциклонов

Показатели	Тип гидроциклона				
	без внутренних устройств	с конической диафрагмой	с конической диафрагмой и внутренним цилиндром	многоярусные	
				с наклонными выпусками	с периферийным отбором
Диаметр аппарата $D_{hc}$ , м	2 – 10	2 – 6	2 – 6	2 – 6	2 – 6
Высота цилиндрической части $H$ , м	$D_{hc}$	$D_{hc}$	$D_{hc} + 0,5$ м	$nh$	$(n + 2) \cdot h$
Высота ярусов $h$ , м	-	-	-	0,1–0,25	0,1 – 0,2
Число ярусов $n$	-	-	-	4 – 20	4 – 20
Размер впускного патрубка $d_{en}$ , м	$0,07D_{hc}$	$0,05D_{hc}$	$0,05D_{hc}$		
Число впусков $n_1$	2	2	2	3	3
Угол конической части $\alpha$ , град	60	60	60	60	60
Угол конусности диафрагмы $\beta$ , град	-	90	90	90 – 60	90 – 60
Диаметр центрального отверстия в диафрагме $d_d$ , м	-	$0,5D_{hc}$	$0,5D_{hc}$	0,6 – 1,4	$\frac{0,9 - 1,6}{0,6 - 1,0}^*$
Диаметр внутреннего цилиндра, $D_1$ , м	-	-	$0,88D_{hc}$	-	-
Высота внутреннего цилиндра, $H_1$ , м	-	-	$D_{hc}$	-	-

Таблица 4.5 (окончание)

Показатели	Тип гидроциклона				
	без внутренних устройств	с конической диафрагмой	с конической диафрагмой и внутренним цилиндром	многоярусные	
				с наклонными выпусками	с периферийным отбором
Высота водосливной стенки над диафрагмой $H_2$ , м	-	0,5	0,5	0,5	0,5
Диаметр водосливной стенки $D_2$ , м	$D_{hc}$	$D_{hc} + 0,2$	$D_{hc} + 0,2$	$D_{hc} + 0,2$	$D_{hc} + 0,2$
Диаметр полупогружной кольцевой перегородки $D_3$ , м	0,2	$D_{hc}$	$D_{hc}$	$D_{hc}$	$D_{hc}$
Зазор между корпусом и диафрагмой $\Delta D$ , м	-	0	0	0,05 – 0,07	0,1 – 0,15
Ширина шламоотводящей щели, $b$ , м	-	-	-	0,1 – 0,15	-
Скорость потока на входе в аппарат $v_{en}$ , м/с	-	-	-	0,3 – 0,4	0,3 – 0,4
То же, в раструб выпуска $v_{вых}$ , м/с	-	-	-	$\leq 1$	-
Число выпусков из яруса $n_3$	-	-	-	3	-

Примечания: \* над чертой приведен размер нижней диафрагмы пары ярусов, под чертой — верхней пары; обозначения в таблице соответствуют рис. 4.8.

- для многоярусного гидроциклона с периферийным отбором

$K_{hc} = \frac{1,5n_{ti}(D_{hc}^2 - d_d^2)}{D_{hc}^2},$	(4.20)
--	--------

где  $n_{ti}$  — число пар ярусов (табл. 4.5).

3. Рассчитывают удельную гидравлическую нагрузку на гидроциклон  $q_{hc}$

$q_{hc} = 3,6K_{hc}u_0, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$	(4.21)
---	--------

где  $u_0$  — гидравлическая крупность частиц, которые необходимо выделить из воды для обеспечения требуемого эффекта очистки, мм/с.

4. Находят производительность одного аппарата  $Q_{hc}$

$Q_{hc} = 0,785q_{hc}D_{hc}^2, \text{ м}^3/\text{ч}.$	(4.22)
---	--------

5. Определяют количество рабочих аппаратов  $n$

$n = q_w/Q_{hc}, \text{ шт},$	(4.23)
-------------------------------	--------

где  $q_w$  — максимальный часовой расход сточной воды, м<sup>3</sup>/ч.

#### 4.4. ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ

Центрифугирование применяют:

- для локальной очистки производственных сточных вод, когда осадок представляет собой ценный продукт, предназначенный для дальнейшего использования;
- для выделения из сточных вод мелкодисперсных загрязнений, когда для их извлечения не могут быть применены реагенты;
- для обезвоживания осадков сточных вод.

Как отмечалось в подразд. 4.1, при центрифугировании центробежное поле создают за счет вращения аппарата (ротора), вместе с которым вращается поток жидкости.

Различают два метода центрифугирования: центробежное осаждение и фильтрование. Центрифугирование проводят в центробежных машинах — центрифугах и жидкостных центробежных сепараторах. Основной рабочий орган этих машин — осесимметричная оболочка, или ротор (барабан), вращающийся с большой частотой, благодаря

чему в промышленных машинах создается поле центробежных сил до  $2 \cdot 10^4 g$ .

В зависимости от метода центрифугирование осуществляется в сплошных (осадительных) (рис. 4.9, а) или перфорированных (покрытых фильтрующим материалом) роторах (рис. 4.9, б).

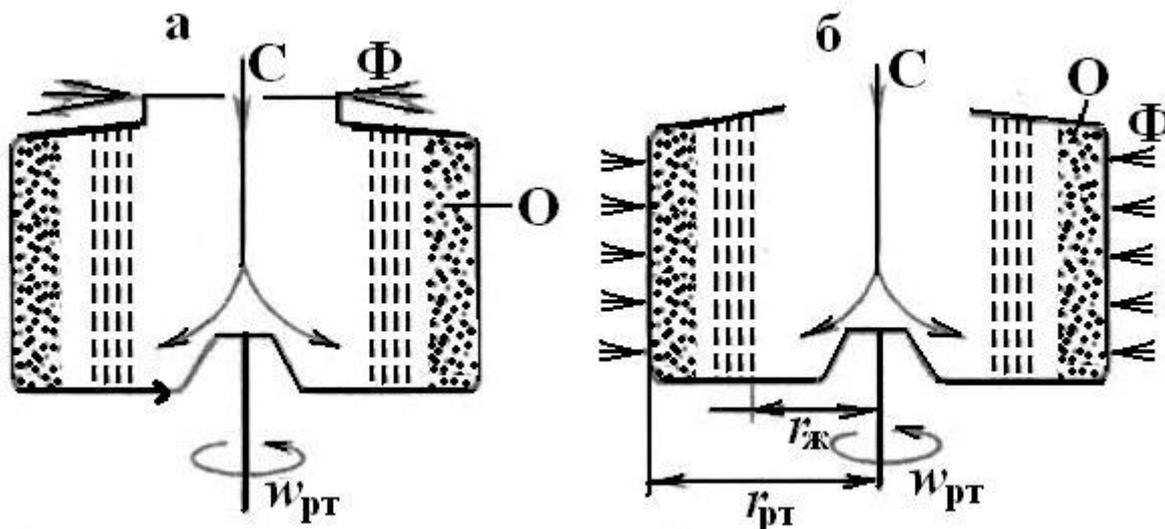


Рис. 4.9. Роторы машин для центробежного осаждения (а) и фильтрации (б)

Условные обозначения: С — суспензия, Ф — фугат (фильтрат), О — осадок;  $r_{рт}$  — радиус ротора,  $r_{ж}$  — радиус свободной поверхности жидкости,  $\omega_{рт}$  — угловая скорость вращения ротора

Центрифугирование характеризуется рядом технологических параметров, определяющих качество процесса и его кинетику. К ним

относятся: фактор разделения (критерий Фруда)  $F_r = \frac{v_{цб}}{v_{грав}} = \omega^2 x : g$

(выражение (4.9) в подразд. 4.1), (здесь  $x = r_{рт}$  — максимальный внутренний радиус ротора), отражающий интенсивность центробежного поля; скорость центрифугирования — производительность центробежной машины по исходной жидкой системе или составляющим ее компонентам; унос — содержание твердой фазы в фугате (фильтрате); насыщенность осадка жидкой фазой (в том числе влажность осадка) после центрифугирования; крупность разделения — минимальный размер частиц, улавливаемых при центробежном осаждении. В про-

мышленных центрифугах фактор разделения изменяется в пределах 200 – 15000.

Кинетика центрифугирования зависит от многих факторов, классифицируемых на две группы. Факторы первой группы определяются физико-химическими свойствами разделяемой системы (разность плотностей фаз, гранулометрический состав твердой фазы, вязкость жидкой фазы, удельное сопротивление осадка при фильтровании). Факторы второй группы обусловлены конструкцией и частотой вращения ротора центробежной машины (структура внутрироторного потока, его гидродинамика и поле скоростей). Они оказывают решающее влияние на центробежное осаждение и отчасти на центробежное фильтрование.

Центробежное осаждение включает осветление, сгущение, а также осадительное центрифугирование. Осветление — это удаление твердой фазы из суспензий с содержанием частиц не более 5 % по объему. Его используют, например, для очистки нефтяных масел. Сгущение — это процесс, при котором частицы дисперсной фазы группируются в относительно малом объеме дисперсионной среды, что позволяет осуществлять концентрирование суспензий. Осадительное центрифугирование — разделение суспензий с содержанием твердой фазы более 5 – 10 % по объему; его применяют преимущественно для обезвоживания твердых компонентов (например, частиц гипса).

Движение твердых частиц при центробежном осаждении описано формулами (4.6) – (4.8), (4.11) и (4.12) (см. подразд. 4.1) для ламинарного, промежуточного и турбулентного режимов.

Центробежное фильтрование происходит с образованием и/или без образования осадка на фильтровальной перегородке. Центробежное фильтрование наиболее эффективно для получения осадков с минимальной влажностью. Процесс обычно делят на три периода: 1) образование осадка, 2) удаление из него избыточной жидкости, 3) удаление жидкости, удерживаемой межмолекулярными силами

(механическая сушка осадка). Первый период включает центробежное осаждение и фильтрование через слой образовавшегося осадка. Кинетика его процесса зависит от перепада давления  $\Delta P$  (движущая сила), который определяется центробежным полем (закон Дарси – Вейсбаха):

$$\Delta P = 0,5\rho_{\text{сп}} \cdot w_{\text{рт}}^2 (r_{\text{рт}}^2 - r_{\text{ж}}^2), \quad (4.24)$$

где  $\rho_{\text{сп}}$  — плотность суспензии,  $r_{\text{ж}}$  — радиус свободной поверхности жидкости (см. рис. 4.9, б).

На перепад давления оказывает влияние проскальзывание жидкости над слоем осадка. Период может протекать при различных режимах; наиболее характерны режимы при постоянных  $\Delta P$  и производительности по суспензии. Второй и третий периоды зависят от большого числа факторов, связанных с уплотнением осадка, формой его поровых каналов и др.

По сравнению с другими методами разделения (отстаивание, фильтрование) центрифугирование позволяет получать осадки с меньшей влажностью. При центробежном осаждении в отличие от фильтрования удается разделять суспензии (например, в производствах лакокрасочных материалов) с тонкодисперсной твердой фазой, минимальный размер частиц которой составляет 5 – 10 мкм. Важное достоинство центрифугирования — возможность его проведения в аппаратуре относительно малых объемов; недостаток — высокая энергоемкость.

Промышленные центрифуги классифицируют по разным принципам:

- по принципу разделения — осадительные, фильтрующие и комбинированные;
- по конструктивному исполнению — преимущественно по расположению ротора и системе выгрузки осадка (шнек; толкатель, или поршень; с использованием сил инерции);
- по организации процесса — периодического или непрерывного действия.

Центрифуги непрерывного действия применяют для очистки сточных вод с расходом до  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ , когда требуется выделить частицы гидравлической крупностью  $0,2 \text{ мм/с}$  (противоточные) и  $0,05 \text{ мм/с}$  (прямоточные). Центрифуги периодического действия применяют для очистки сточных вод, расход которых не превышает  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а также при необходимости выделения частиц гидравлической крупностью  $0,05 - 0,1 \text{ мм/с}$ .

На рис. 4.10 приведен схема непрерывно действующей осадительной горизонтальной центрифуги со шнековой выгрузкой осадка марки ОГШ. Сточную воду подают через трубу внутрь вращающегося ротора, при этом наиболее тяжелые частицы осадка отжимаются к внутренней поверхности ротора. Шнек и ротор вращаются с различной частотой, вследствие чего осажденная твердая фаза выгружается из ротора. Фугат вытекает через сливную трубу. Если твердая фаза сточных вод обладает абразивными свойствами, то рабочую часть шнека защищают от истирания специальным покрытием, например, металлокерамикой.

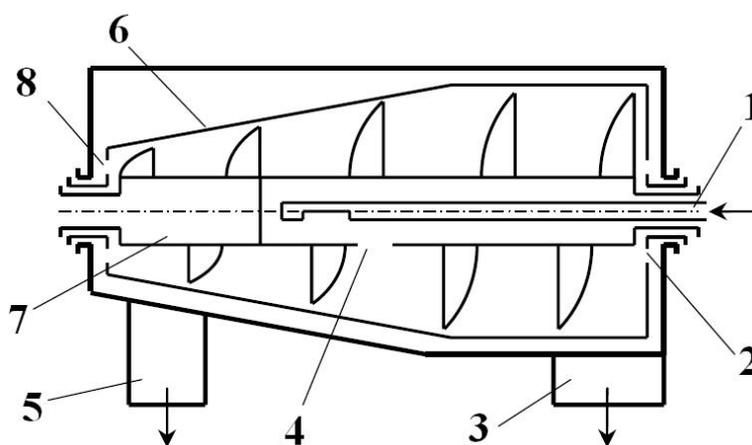


Рис. 4.10. Горизонтальная центрифуга непрерывного действия со шнековой выгрузкой осадка типа ОГШ:

1 — труба подачи, 2 — сливные отверстия, 3 — сливная труба, 4 — отверстие для осадка, 5 — труба осадка, 6 — ротор, 7 — полый шнек, 8 — окна

Как сказано выше, центрифугирование можно проводить в жидкостных центробежных сепараторах. Их роторы снабжены пакетом

конических тарелок, установленных по отношению друг к другу с небольшим зазором (0,4 – 1,5 мм). Высокая степень разделения достигается благодаря протеканию суспензии в тонком слое межтарелочного зазора при ламинарном режиме. Тонкодисперсные суспензии (присадки к маслам, гормональные препараты, антибиотики и др.), содержащие 0,5 – 4,0 % по объему механических примесей, осветляются в сепараторах-очистителях (рис. 4.11, а). Твердая фаза, собираясь в шламовом пространстве ротора, периодически удаляется из него при открытии днища (поршня). Центробежное сгущение (например, кормовые и пекарские дрожжи) производится в сепараторах-сгустителях (рис. 4.11, б). Сгущенная фракция непрерывно выводится через сопла по периферии ротора, а осветленная — через верхнюю зону.

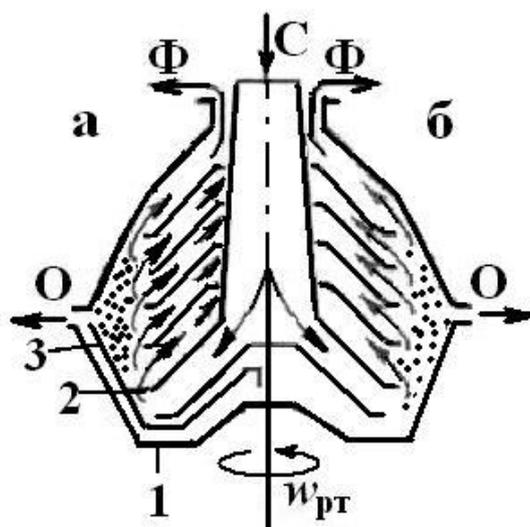


Рис. 4.11. Совмещенные схемы сепараторов для разделения суспензии: сепаратор-очиститель (а) и сепаратор-сгуститель (б)

1 — ротор, 2 — пакет тарелок, 3 — подвижное днище; С — суспензия, Ф — фугат, О — осадок

Для разделения эмульсий (напр., нефтяные шламы, эпоксидные смолы) применяют сепараторы-разделители, в роторах которых предусмотрен пакет тарелок с отверстиями, расположенными на границе раздела тяжелой и легкой жидкостей; компоненты (фугаты  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ ) выводятся раздельно (рис. 4.12). При наличии в эмульсии твердой фа-

зы используют универсальные роторы с выгрузкой осадка в соответствии с рис. 4.11, а или ручную.

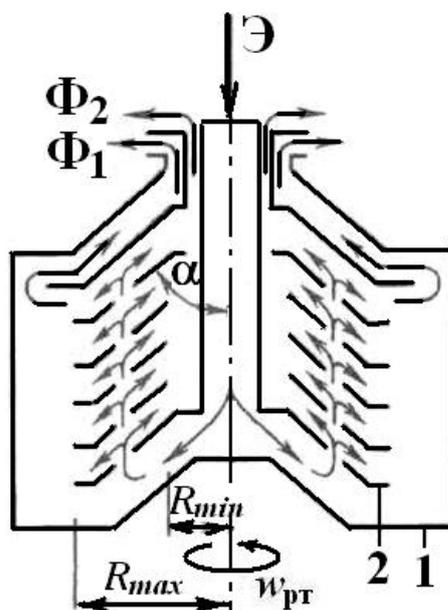


Рис. 4.12. Сепаратор для разделения эмульсий

1 — ротор, 2 — пакет тарелок,  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — фугаты, Э — эмульсия

### **Расчет центрифуг**

1. Выбирают вид центрифуги (непрерывного или периодического действия);

2. По результатам лабораторных исследований определяют фактор разделения  $F_r$  и продолжительность центрифугирования  $t_{cf}$ , с, при которых обеспечивается необходимая степень очистки воды;

3. Проводят подбор необходимого типоразмера центрифуги (см. табл.4.6 и 4.7);

4. Определяют объемную производительность центрифуги

$$Q_{cf} = 3600W_{cf}K_{cf}/t_{cf}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4.25)$$

где  $W_{cf}$  — объем ванны ротора центрифуги,  $\text{м}^3$ ;  $K_{cf}$  — коэффициент использования объема центрифуги, принимаемый равным 0,4 – 0,6.

5. Определяют количество рабочих центрифуг  $n$

$$n = q_w/Q_{cf}, \text{ шт}, \quad (4.26)$$

где  $q_w$  — максимальный часовой расход сточной воды,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

Таблица 4.6

**Основные характеристики непрерывно действующих осадительных горизонтальных шнековых центрифуг**

Марка	Примерная производительность по суспензии, м <sup>3</sup> /ч	Наибольший внутренний диаметр, мм	Наибольшее число оборотов в минуту	Наибольший фактор разделения по наибольшему диаметру, $F_r$	Отношение длины ротора к диаметру	Мощность электропривода, кВт	Габариты, м (длина, ширина, высота)	Масса установки общая, кг
ОГШ-352К-6	3 – 5	350	4000	3140	1,8	20	2,38; 1,59; 1,03	1830
ОГШ-352К-1	1 – 3	350	4000	3140	1,8	7,5	1,63; 1,09; 0,72	950
ОГШ-501К-6	7 – 10	500	2650	2000	1,8	30	2,59; 2,2; 1,08	3430
ОГШ-631К-2	35	630	2000	1415	3,76	100	4,53; 2,78; 1,43	10118
ОГШ-802К-7	15 – 20	800	1850	1500	2,2	100	4,98; 2,94; 2,36	14500
НОГШ-1203К-1	70	1200	8000	430	1,48	90	5,02; 4,04; 1,73	14200
НОГШ-132	120	1320	600; 750	530; 830	2,1	160	4,19; 4,33; 1,69	12000

Таблица 4.7

**Основные характеристики осадительных центрифуг периодического действия**

Марка	Внутренний диаметр ротора, мм	Рабочая высота ротора, мм	Рабочая емкость ротора, л	Предельная нагрузка, кг	Наибольшее число оборотов в мин	Фактор разделения $F_r$	Мощность электропривода, кВт	Габариты, м (длина, ширина, высота)
ОТР-10	105	-	6	10	15000	13000	1,7	0,8; 0,64; 1,68
ОТР-15	150	-	11,8	20	13500	15000	7	1,13; 0,59; 1,96
ОМД-802К, Г-4	800	400	80	180	1250	700	4	1,75; 1,25; 1,11
ОМБ-803К, П-03	1200	500	250	375	950	605	7	2,12; 1,8; 1,18
ОМД-1202К, Г-2								
20ГН-2201У-1	2200	-	270	3500	600	445	127,2	6,4; 5; 5,23

**Задание 4**

1. Рассчитайте напорный гидроциклон при крупности задерживаемых частиц 10 мкм и расходе сточных 2500 м<sup>3</sup>/сут.

2. Рассчитайте открытые гидроциклоны: а) без внутренних устройств; б) с конической диафрагмой, в) с конической диафрагмой и внутренним цилиндром, г) многоярусный с наклонными выпусками, д) многоярусный с периферийным отбором осветленной воды при расходе сточных вод 15000 м<sup>3</sup>/сут.

3. Рассчитайте центрифуги для очистки сточной воды от минеральных примесей с гидравлической крупностью свыше 0,1 мм/с при максимальном расходе 2300 м<sup>3</sup>/сут, факторе разделения  $Fr = 1200$  и продолжительности центрифугирования 30 с.

## 5. ФИЛЬТРОВАНИЕ

Одним из синонимов слова «фильтрация» является слово «процеживание». Однако в области водоочистки этим терминам отвечают процессы удаления из воды примесей существенно различных размеров, что подразумевает и разные механизмы удаления примесей. Вместе с тем разные виды фильтрации (фильтрации) также отвечают различным механизмам извлечения примесей из воды

### 5.1. ПРОЦЕЖИВАНИЕ

Процесс освобождения вод от крупноразмерных примесей носит название процеживание. Как правило, процеживание является первой ступенью водоподготовки или водоочистки.

В сточных водах, например, бытовых, могут содержаться крупноразмерные отбросы ( $> 1$  см) — остатки пищи, упаковочные материалы, бумага, тряпье, санитарно-гигиенические, полимерные и волокнистые материалы. На них адсорбируются жиры, органические соединения, на которые налипают песок, шлаки и другие минеральные частицы. Таким образом формируются многокомпонентные крупноразмерные органо-минеральные составляющие со средней плотностью, близкой к плотности воды. Если такие примеси не задерживаются на решетках, то с ними песок проносится через песколовки. В результате песок попадает в первичный отстойник, следовательно, затрудняется выгрузка осадка. Кроме того, песок приводит к быстрому износу насосов. Если крупноразмерные примеси не попадают в осадок отстойника (из-за плотности, близкой к плотности воды), то они затрудняют работу последующих очистных сооружений или выносят-

ся с очищенными водами в водоемы и водотоки, если предусмотрена только механическая очистка.

Таким образом, требуется качественная предварительная очистка вод от крупноразмерных примесей. Оценить количественно содержание этих примесей в сточной воде сложно, поскольку невозможно отобрать пробу с их средневзвешенной концентрацией. О содержании таких загрязнений судят по количеству отбросов, задержанных на решетках с различной шириной прозоров (см. рис. 5.1).

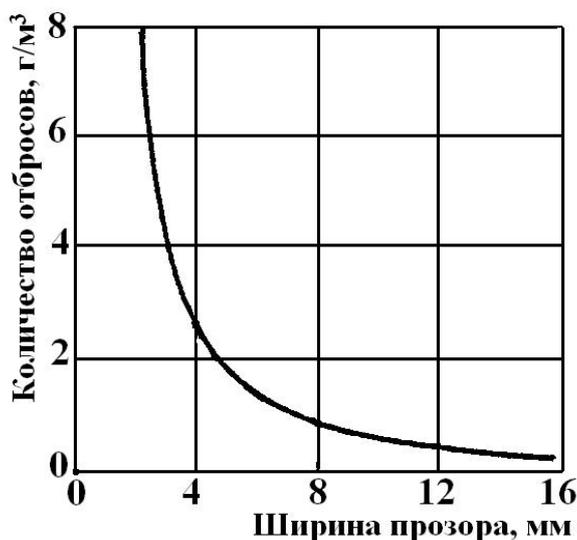


Рис. 5.1. Зависимость массы задержанных отбросов от ширины прозоров решетки

Анализ данных, представленных на рис. 5.1, показывает 15 – 20-кратное возрастание массы снятых загрязнений с решеток с минимальной шириной прозоров 1,5 – 2,0 мм по сравнению с широко распространенными решетками с прозорами 16 мм. Решетки с прозорами 1,5 – 2,0 мм задерживают практически все крупноразмерные загрязнения; массу снятых с них отбросов можно принять за их полное содержание в сточной воде.

Оценочная норма выносимых загрязнений составляет порядка 20 г/(чел·сут).

Как отмечалось выше, решетки являются первым элементом всех технологических схем очистки сточных вод. Их устанавливают в уширенных каналах перед песколовками.

Классификация решеток в зависимости от их конструкции, а также основные параметры решеток и сит, используемых для задержания крупноразмерных примесей, приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Характеристика решеток и сит**

Параметр	Тип решетки (сита)*						
	МГ	PMH	RS-16	RS-33	РДГ	РСФ-01	СЗС
Ширина решетки, мм	2100	2100	1200	1900	1200	1455	3000
Ширина фильтрующей части, мм	810	728; 810	850	1500	950	950	2560
Высота от дна, мм	4500	4500	3300	3500	2500	3252	3000
Длина, мм	2600	2660	1800	1800	1800	1480	6680
Высота выгрузки от пола, мм	900	900	450	450	1500	2070	800
Максимальная глубина канала, мм	3000	3000	1000	3000	1000	1000	4200
Ширина прозоров, мм	16; 12	10; 6	5	3	10	4	1,4
Толщина фильтрующих пластин, мм	10	10	3	3	10	3	
Масса, кг	4500	3750	900	4300	2100	2400	
Максимальный уровень жидкости перед решеткой, мм	2000	2000	600	2000	600	600	3000
Мощность электродвигателя, кВт	1,5	0,75	1,1	4,0	0,85	1,5	1,5

Примечания: \*МГ — механические грабли, PMH — решетки механизированные наклонные, RS — решетка ступенчатая механическая фирмы «MEVA», РДГ — решетка дуговая гидравлическая, РСФ-01 — решетка ступенчатая механическая, СЗС — плоское щелевое сито

В большинстве конструкций решетки выполняют из расположенных параллельно друг другу стальных стержней различного про-

филя, закрепленных в раме для обеспечения их жесткости. Для устройства решеток применяют стержни прямоугольной формы, прямоугольной с закругленной частью, круглой и др. (см. рис. 5.2)

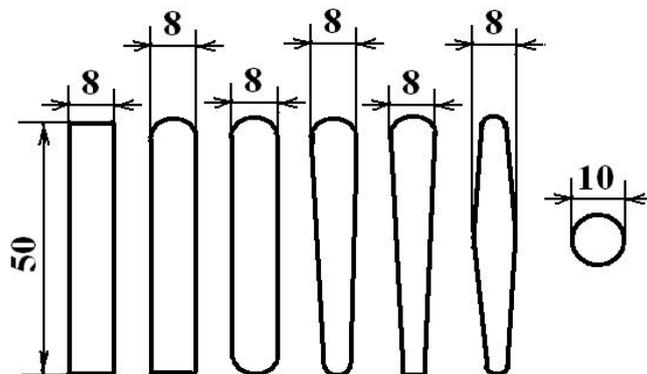


Рис. 5.2. Профили стержней

Стержни прямоугольной формы применяют чаще других. Толщина стержней обычно равна 6 – 10 мм, ширина прозоров традиционно принималась равной 16 мм. Решетки с прозорами шириной более 16 мм использовались в насосных станциях и на очистных сооружениях дождевых стоков.

Для решеток новых конструкций отечественного и зарубежного производства толщина стержней составляет 3 – 10 мм, ширина прозоров 3 – 16 мм.

Загрязнения, задерживаемые на стержнях при процеживании сточной воды, снимают механическими граблями, которые могут быть расположены перед стержнями или сзади их. На рис. 5.3 приведена схема решетки с тонкими стержнями из высококачественной нержавеющей стали с клиновидным сечением (размеры 4 x 10 мм). Стержни жестко закреплены в придонной части канала и свободны сверху. Установленные на бесконечном гибком приводе грабли снимают загрязнения со стержней и сбрасывают их на транспортер, расположенный за решетками.

На рис.5.4 приведены схема другой (отечественной) модели решетки с прозорами 6 мм, имеющей другой механизм снятия задерживаемых загрязнений с помощью механических граблей.

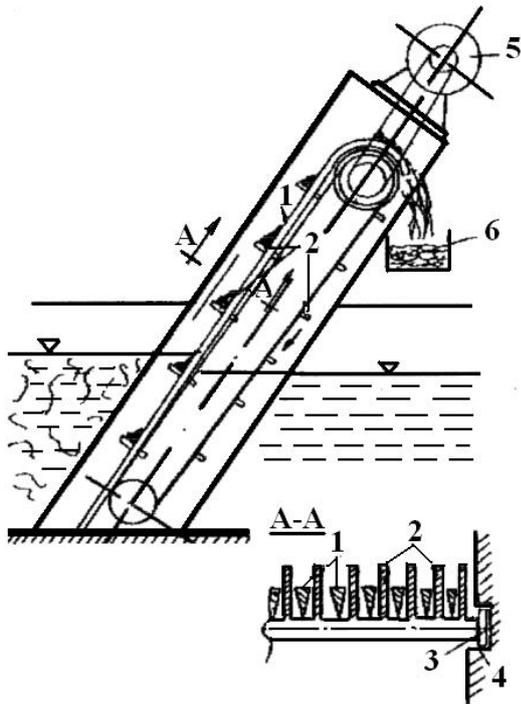


Рис. 5.3 Схема решетки фирмы «Джоунс энд Атвуд» (Великобритания): 1 — профиль стержней, 2 — грабли, 3 — опора грабель, 4 — направляющая опоры грабель, 5 — двигатель, 6 — транспортер

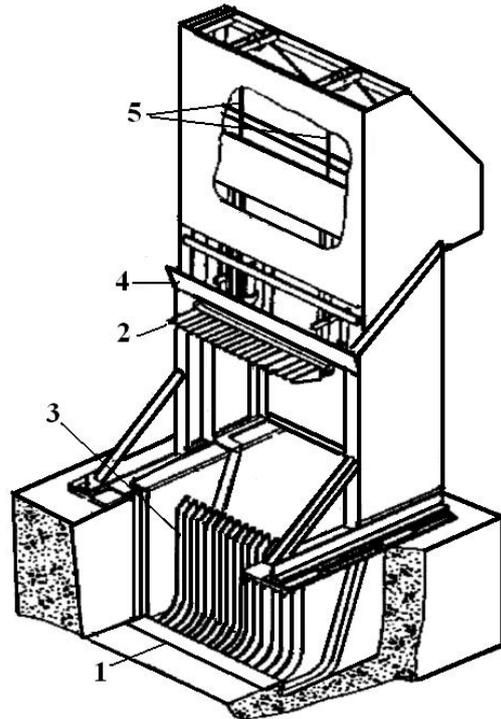


Рис. 5.4. Решетки с прозорами 6 мм (продольный разрез): 1 — подводящий канал, 2 — грабли, 3 — стержни решетки, 4 — сбрасыватель, 5 — канат

Размер решеток определяют из условия обеспечения в прозорах скорости движения воды  $0,8 - 1,0$  м/с при максимальном притоке на очистные сооружения. При скорости свыше  $1$  м/с уловленные загрязнения продавливаются через решетки. При скорости меньше  $0,8$  м/с перед решеткой начинают выпадать в осадок крупные фракции песка, поэтому возникает необходимость его удаления.

Для решеток с прозорами шириной « $b$ », м, справедливо соотношение

$$q = \omega \cdot V = b \cdot h \cdot n \cdot V, \quad (5.1)$$

где  $q$  — максимальный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с  $\omega$  — площадь живого сечения прозоров всей решетки, м<sup>2</sup>,  $h$  — глубина воды перед решеткой, м,  $n$  — число прозоров,  $V$  — скорость движения сточной воды, м/с.

Количество прозоров в решетке, необходимых для пропуска поступающих сточных вод, составляет

$$n = \frac{q \cdot K_{\text{ст}}}{b \cdot h \cdot V}, \quad (5.2)$$

где  $K_{\text{ст}} = 1,05 - 1,1$  — коэффициент, учитывающий стеснение потока механическими граблями.

Общая ширина решеток равна

$$B = S(n - 1) + b \cdot n, \quad (5.3)$$

где  $S$  — толщина стержней.

Исходя из общей ширины решеток, используя данные табл. 5.1, подбирают необходимое количество решеток. Дополнительно устанавливают 1 – 2 резервные решетки и предусматривают устройство обводной линии для пропуска воды в случае аварийного засора решеток.

Решетки размещают в отдельном отапливаемом помещении ( $T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Между решетками предусматривают проходы шириной не менее 1,2 м. Пол здания располагают не менее чем на 0,5 м выше расчетного уровня воды в канале.

В зарубежной практике широко применяются самоочищающиеся решетки ступенчатого типа «Ротоскрин» (рис.5.5). Процеживающая часть этих решеток состоит из двух чередующихся пакетов из параллельных пластин — стационарного и подвижного. Движение, совершаемое подвижными пластинами, приводит к тому, что они поднимают собранные продукты фильтрации на одну ступень вверх. В результате последовательных движений уловленные примеси поднимаются до точки выгрузки и попадают на транспортер.

Особенностью решеток данного типа является использование не только прозоров (обычно 3 – 6 мм), но и слоя уловленных загрязнений, которые сами становятся дополнительными фильтрами, что позволяет задерживать примеси размером меньше ширины прозоров.

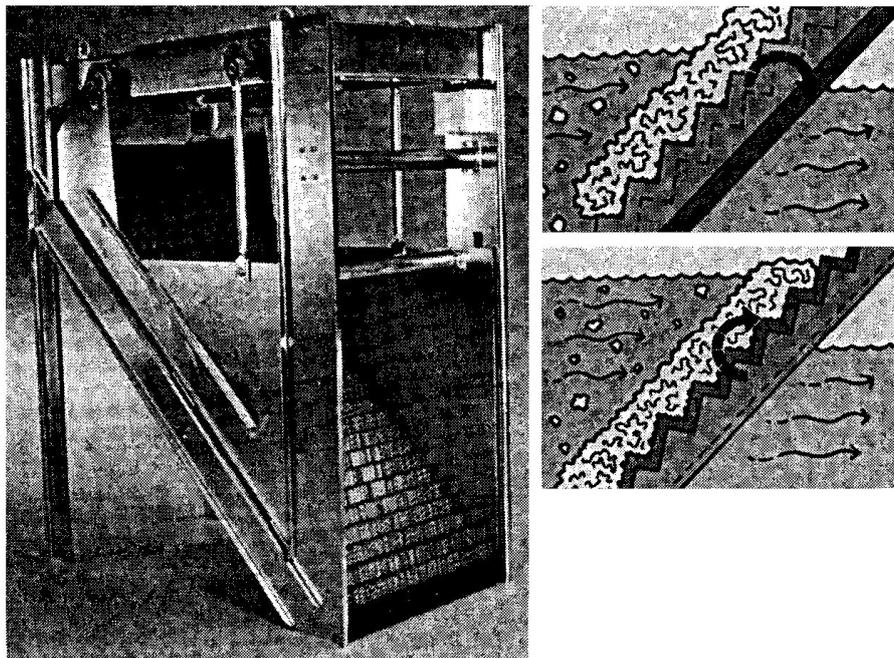


Рис. 5.5. Самоочищающаяся ступенчатая решетка «Ротоскрин»

## 5.2. ФИЛЬТРОВАНИЕ

Фильтрация — это разделение суспензий и эмульсий с использованием пористых перегородок или зернистых слоев, которые задерживают диспергированную фазу и пропускают жидкость. Фильтрация используется для очистки природных и сточных вод и рекомендуется для: а) улавливания частиц больших размеров; б) освобождения вод от тонкодисперсных примесей.

В практике водоподготовки и очистки сточных вод используют следующие процессы фильтрации:

- фильтрация через фильтрующие перегородки;
- фильтрация через зернистые слои;
- микрофильтрацию;
- фильтрация эмульгированных веществ.
- выделение из воды ферромагнитных частиц с помощью магнитных фильтров.

Для улавливания частиц больших размеров используют сетчатые фильтры (решетки и сита), а также перфорированные (металлические) листы. Для освобождения вод от тонкодисперсных примесей

применяют фильтрующие перегородки, в т. ч., тканевые, зернистые, намывные, сетчатые фильтры.

В зернистых (фильтрах с зернистой загрузкой) в качестве загрузки используют кварцевый песок, дробленый антрацит, керамзит, пенополистирол, магномассу, гранулированный доменный шлак, гравий, гранит, щебенку и др.

Фильтровальные перегородки изготавливают из тканей (хлопчатобумажных, шерстяных, лняных, лавсановых, капроновых и др.), стеклянных, керамических, углеродных и металлических материалов. По структуре фильтровальные перегородки подразделяют на гибкие и негибкие.

В намывных фильтрах фильтрующий слой (древесная мука, диатомит и др.) намывается в виде слоя на каркас из пористой керамики, на сетки или синтетические ткани.

Сетчатые фильтры используют, в основном, для задержки низкодисперсных (грубодисперсных) взвешенных и плавающих частиц, размером в десятки и сотни микрон;

Зернистые фильтры используют в основном для очистки хозяйственно-питьевых и технических вод; тканевые — для очистки хозяйственно-питьевых вод в полевом водоснабжении; намывные — для очистки маломутных вод на станциях небольшой производительности (детские оздоровительные лагеря, бассейны).

Рассмотрим фильтрование суспензий через фильтрующие перегородки. Различают процесс фильтрования:

- с образованием осадка, при котором суспензия разделяется на чистый фильтрат и влажный осадок,

- фильтрование с закупориванием пор, при котором твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки и задерживаются там, не образуя осадка,

- промежуточный вариант, в котором твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки и образуют в ней слой осадка.

Осадки подразделяют на несжимаемые и сжимаемые.

Несжимаемыми называют осадки, у которых пористость (отношение объема пор к объему осадка) не уменьшается при увеличении разности давлений. К таким осадкам относят вещества неорганического происхождения с размером частиц более 100 мкм (песок, карбонат кальция, бикарбонат натрия и др.). К сжимаемым осадкам относят такие, пористость которых уменьшается, а их гидравлическое сопротивление потоку жидкости возрастает с увеличением разности давлений. К ним относятся осадки гидроксидов металлов, а также осадки, состоящие из первичных мелких кристаллов.

Производительность фильтра определяется скоростью фильтрования ( $W$ ), которая в дифференциальной форме записывается как

$$W = \frac{dV}{Sd\tau}, \quad (5.4)$$

где  $W$  — скорость фильтрования, м/с;  $S$  — поверхность фильтрования, м<sup>2</sup>;  $\tau$  — продолжительность фильтрования, с;  $V$  — объем фильтрата, м<sup>3</sup>.

Основное дифференциальное уравнение фильтрования имеет вид:

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta P}{\eta \cdot (R_{oc} + R_{фп})}, \quad (5.5)$$

где  $\Delta P$  — разность (перепад) давлений, Па;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости фильтрата, Па·с;  $R_{oc}$  и  $R_{фп}$  — соответственно, сопротивления слоя осадка и фильтровальной перегородки, м<sup>-1</sup>.

Процесс фильтрования обычно проводят при постоянной разности давлений или при постоянной скорости процесса.

В технологиях водоподготовки и очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод наибольшее применение находят фильтры с зернистой загрузкой. Рассмотрим их классификацию.

Зернистые фильтры классифицируют по следующим признакам:

1. По скорости фильтрования:

- медленные — скорость фильтрации 0,1 – 0,2 м/ч;

- скорые — скорость 5 – 15 м/ч;

- сверхскорые — скорость свыше 25 м/ч.

2. По крупности зерен:

- мелкозернистые — размер зерен 0,3 – 0,5 мм

- среднезернистые — размер 0,5 – 0,8 мм

- крупнозернистые — размер 1 – 2 мм.

3. По конструкции фильтра:

- однослойные (загрузка фильтрующего слоя однородна по плотности и отличается только крупностью зерен);

- двухслойные;

- многослойные (в двухслойных и многослойных загрузка фильтрующего слоя неоднородна по плотности и размеру зерен, например, кварцевый песок / антрацит).

- каркасно-засыпные.

4. По месту расположения:

- на открытом воздухе;

- в помещении.

5. По давлению, под которым работают фильтры:

- открытые или безнапорные (высотой  $h$  до 2 м)

- закрытые или напорные ( $h$  до 1 м).

6. По направлению формирования загрузки:

- горизонтальные;

- вертикальные.

7. Вертикальные фильтры подразделяются по направлению фильтрования:

- фильтры с восходящим направлением движения очищаемых вод;

- фильтры с нисходящим направлением движения очищаемых вод.

Зернистые загрузки характеризуются механической прочностью (измельчаемостью и истираемостью).

Методика определения механической прочности: 100 г загрузки с диаметром частиц 0,5 – 1 мм помещают в банку, наливают 150 мл воды и встряхивают 24 часа. Затем просеивают через набор сит (верхнее с диаметром отверстий 0,5 мм, нижнее — 0,25 мм)

Процент измельчаемости определяют по массе частиц, прошедших через сито с диаметром отверстий 0,5 мм и не проходит через сито с отверстиями диаметром 0,25 мм.

Процент истираемости определяют по массе материала, прошедшего через сито с диаметром отверстий 0,25 мм.

Механизмы очистки сточных вод путем фильтрации через зернистую загрузку:

- взвешенные вещества отлагаются на поверхности фильтрующего слоя (пленочное фильтрование);
- взвешенные вещества отлагаются в порах фильтрующего слоя;
- взвешенные вещества отлагаются и на поверхности, и в порах фильтрующего слоя.

Отложение происходит за счет адгезии (прилипания). Адгезия сменяется отрывом ранее прилипшего и перемещением вещества далее по фильтру.

Грязеемкость зернистых фильтров равна:

- по задержанию нефти — 1 – 2 кг/м<sup>3</sup>;
- по механическим примесям — 1,5 – 3 кг/м<sup>3</sup>.

Параметры ряда фильтров с зернистой загрузкой приведены в табл. 5.2.

### ***Однослойные фильтры***

Однослойные фильтры с нисходящим потоком воды используют после механической очистки для доочистки производственных сточных вод от мелкодисперсных примесей, а также после биологической очистки городских сточных вод. Схема фильтра с нисходящим потоком представлена на рис. 5.6, а. В качестве загрузки обычно используют кварцевый песок с размером зерен до 3 мм и толщиной слоя 1,2 – 1,3 м.

Таблица 5.2

### Параметры фильтров с зернистой загрузкой

Фильтр	Параметры фильтрующей загрузки			Высота слоя, м	Скорость фильтрования, м/ч, при режиме		Интенсивность промывки, л/(с·м <sup>2</sup> )	Продолжительность этапа промывки, мин	Продолжительность фильтроцикла, ч	Эффект очистки, %		
	Фильтрующий материал	Гранулометрическая характеристика загрузки <i>d</i> , мм			нормальном	форсированном				по БПК <sub>полн</sub>	по взвешенным веществам	
		минимальная	максимальная									эквивалентная
Одно-слойный мелко-зернистый с подачей воды сверху вниз	Кварцевый песок Поддерживающие слои — гравий	1,2	2	1,5 – 1,7	1,2 – 1,3	6 – 7	7 – 8	Воздух (18 – 20)	2	12		
		2	5	-	0,15 – 0,2			Воздух (18 – 20) и вода (3 – 5)	10 – 12			
		5	10	-	0,1 – 0,15			Вода (7)	6 – 8			
		10	20	-	0,1 – 0,15							
		20	40	-	0,2 – 0,25							
Одно-слойный мелко-зернистый с подачей воды снизу вверх	Кварцевый песок Поддерживающие слои — гравий	1,2	2	1,5 – 1,7	1,5 – 2	11 – 12	13 – 14	Воздух (18 – 20)	2	12 или 24	50 – 60	70 – 75
		2	40	-	0,75 – 0,95			Воздух (18 – 20) и вода (3 – 4)	8 – 10			
Одно-слойный крупно-зернистый с подачей воды сверху вниз	Поддерживающие слои — гравий	3	10	5,5	1,2	16	18	Воздух (16)	3	12	35 – 40	45 – 50
								Воздух (16) и вода (10)	4			
								Вода (15)	3			

Таблица 5.2 (окончание)

Фильтр	Параметры фильтрующей загрузки				Высота слоя, м	Скорость фильтрации, м/ч, при режиме		Интенсивность промывки, л/(с·м <sup>2</sup> )	Продолжительность этапа промывки, мин	Продолжительность фильтрационного цикла, ч	Эффект очистки, %	
	Фильтрующий материал	Гранулометрическая характеристика загрузки <i>d</i> , мм				нормальном	форсированном				по БПК <sub>полн</sub>	по взвешенным веществам
		минимальная	максимальная	эквивалентная								
Двухслойный с подачей воды сверху вниз	Антрацит или керамзит	1,2	2	-	0,4 – 0,5			Вода (14 – 16)	10 – 12			
	Кварцевый песок	0,7	1,6	-	0,6 – 0,7							
	Поддерживающие слои — гравий	2	5	-	0,15 – 0,25	7 – 8	9 – 10			3	24	
		5	10	-	0,1 – 0,15							
		10	20	-	0,1 – 0,15							
		20	40	-	0,2 – 0,25							
Аэрируемый	Кварцевый песок, гранит.	1	1,8	-	1							
	Поддерживающие слои — гравий	3	6	-	1 – 1,5	6 – 7	7 – 8	Вода (16 – 18)	7 – 8	24	75 – 80	80 – 90
		2	32	-	0,45							
Каркасно-засыпной (КЗФ)	Кварцевый песок	0,8	1	-	0,9	10	15	Воздух (14 – 16) и вода (6 – 8)	5 – 7	20	70	70 – 80
	Каркас – гравий	1	40	-	1,8			Вода (14 – 16)	3			
		40	60	-	0,5							

Загрузка наслаивается на поддерживающий слой из гравия с крупностью зерен 2 – 40 мм и высотой слоя 0,5 – 0,7 м. При наличии местного материала, например, гранитного щебня, его можно применять в качестве загрузки, при этом крупность зерен составляет 3 – 10 мм, а толщина слоя 1,2 м.

Для регенерации фильтров можно применять водяную (рис.5.6, а) или водо-воздушную промывку. Последнюю проводят в 4 этапа: 1) взрыхляют верхний слоя загрузки механическим или гидравлическим способом, 2) продувают воздухом при выравнивании гидравлического сопротивления по всей площади фильтра, 3) проводят водо-воздушную совместную промывку, 4) дополнительно промывают водой для разрыхления загрузки и восстановления ее первоначальной пористости.

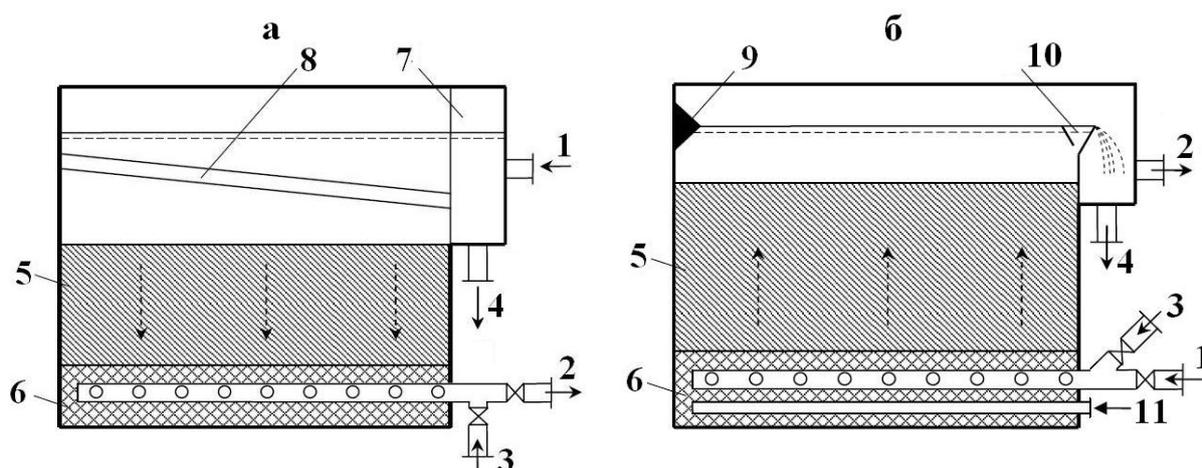


Рис. 5.6. Схема зернистых фильтров с нисходящим (а) и восходящим (б) потоком: 1 — подвод воды, 2 — отвод фильтрата, 3 — подача промывочной воды, 4 — отвод промывочной воды, 5 — песчаная загрузка, 6 — поддерживающий слой, 7 — распределительный карман, 8 — желоб для подачи исходной воды, 9 — струенаправляющий выступ, 10 — пескоулавливающий желоб, 11 — подача воздуха

В фильтрах с восходящим потоком реализуют принцип убывающей крупности зерен вдоль потока, что позволяет увеличивать грязеемкость фильтра, продолжительность фильтроцикла, а также исключает заиливание мелкозернистых слоев. Однако в них возможно

заиливание дренажа. Основные детали фильтра, а также значения параметров см. на рис. 5.6., б и в табл. 5.2.

### *Двухслойные фильтры*

В двухслойных фильтрах используют принцип фильтрования в направлении уменьшающейся крупности зерен загрузки сверху вниз. Верхний слой (см. рис. 5.7) состоит из антрацита с размером зерен 1,2 – 2 мм, нижний — из кварцевого песка крупностью 0,7 – 1,6 мм. Толщина верхнего слоя 0,4 – 0,5 м, нижнего — 0,6 – 0,7 м. Поддерживающий слой состоит из гравия крупностью 2 – 400 мм, он имеет толщину 0,5 – 0,8 м. Двухслойная загрузка обеспечивает более равномерное распределение загрязнений по высоте фильтра, увеличение продолжительности работы. Фильтроцикл равен 24 ч. Промывку фильтра ведут током воды снизу вверх.

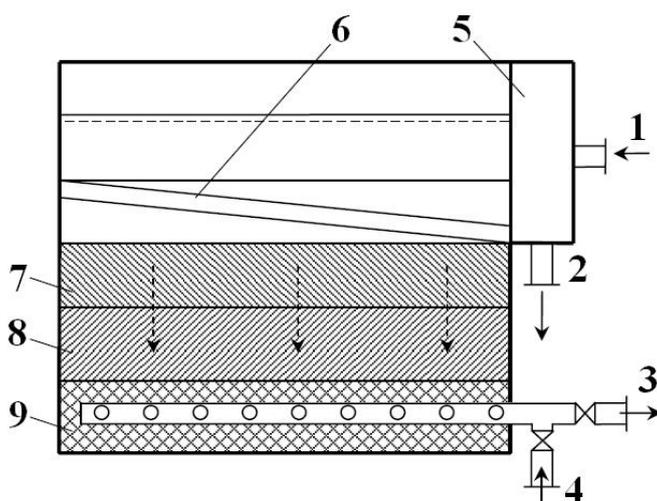


Рис. 5.7. Двухслойный фильтр. 1 — подача исходной воды, 2 — отвод промывочной воды, 3 — отвод фильтрата, 4 — подача промывочной воды, 5 — распределительный карман, 6 — желоб для подачи исходной воды, 7 — загрузка из антрацита, 8 — загрузка из песка, 9 — поддерживающий слой

### *Аэрируемые фильтры*

В аэрируемом фильтре в процессе фильтрования вводят и распределяют в толще зернистой загрузки воздух или кислород. Это спо-

способствует протеканию биохимического процесса очистки внутри фильтра.

Процесс очистки на аэрируемых фильтрах протекает в две ступени (см. рис. 5.8): на первой ступени удаляются взвешенные вещества, на второй — молекулярно и коллоидно растворенные органические вещества.

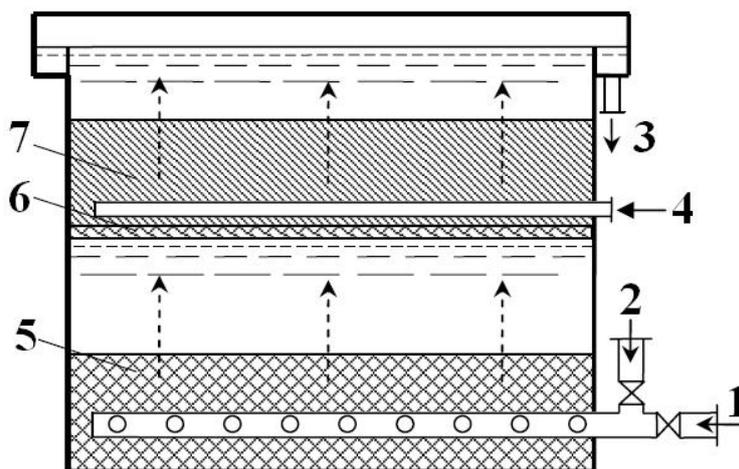


Рис. 5.8. Двухъярусный аэрируемый фильтр: 1 — подача исходной воды, 2 — подача промывной воды, 3 — отвод фильтрата и промывной воды, 4 — подача воздуха, 5 — загрузка первого яруса, 6 — дырчатая перегородка, 7 — загрузка второго яруса

### ***Каркасно-засыпные фильтры***

Загрузка каркасно-засыпного фильтра (см. рис. 5.9) состоит из каркаса — гравий или щебень с размерами фракций 40 – 60 мм, и засыпки — кварцевый песок крупностью 0,8 – 1 мм.

Каркасно-засыпной фильтр имеет ряд достоинств: стабильность очистки воды при значительных колебаниях качества и количества сточной воды; возможность использования контактной коагуляции, которая позволяет при той же скорости фильтрования достичь концентраций взвешенных веществ 3 мг/л, нефтепродуктов 1 – 1,5 мг/л.

Продолжительность фильтроцикла 20 часов.

Промывка может быть водо-воздушной или водяной.

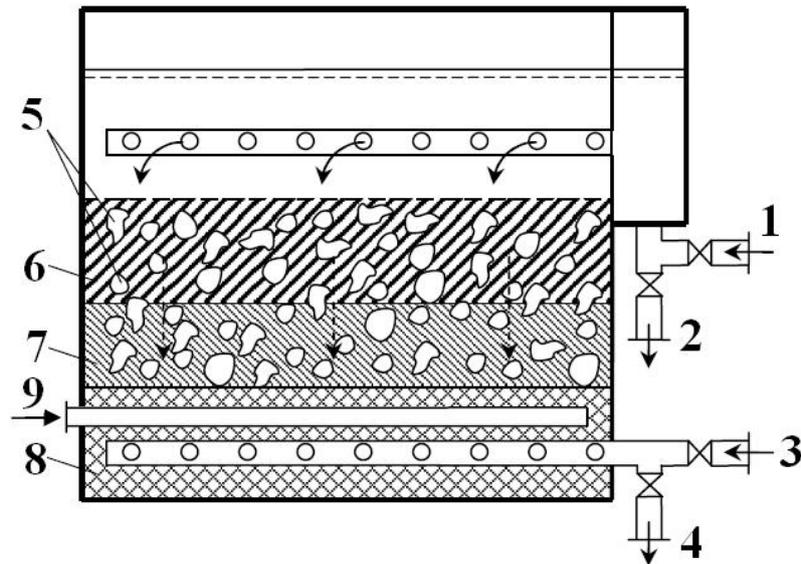


Рис. 5.9. Каркасно-засыпной фильтр: 1 — подвод воды, 2 — отвод промывной воды, 3 — подача промывной воды, 4 — отвод фильтрата, 5 — гравийный каркас, 6 и 7 — крупно- и мелкозернистая загрузка, 8 — поддерживающий слой, 9 — подача воздуха

В каркасно-засыпном фильтре конструкции Митина гравий или щебень образует каркас фильтрующего слоя, просветы которого заполняются песком или антрацитом. Промывка осуществляется взвешиванием песка в обратном токе воды или водовоздушной смеси в межзерновых каналах каркаса, чем предотвращается смещение слоев фильтрующего материала.

При доочистке стоков после механической очистки берется гравий крупностью 40 мм, высота загрузки 1300 мм и песок крупностью 0,6 мм, высота загрузки 700 мм. Скорость фильтрования 5 – 7 м/ч.

При доочистке стоков после биологической очистки берется гравий крупностью 40 – 60 мм, высота загрузки 1800 мм и песок крупностью 0,81 – 1 мм, высота загрузки 900 мм. Скорость фильтрования 5 – 10 м/ч.

### ***Фильтры с плавающей загрузкой***

В последние годы фильтры с плавающей загрузкой находят широкое применение. Загрузкой являются полимерные материалы с по-

ристостью до 95 %. Подобные фильтры обладают рядом преимуществ:

- очень высокая грязеемкость, составляющая 40 – 200 кг/м<sup>3</sup> загрузки;
- повышенная скорость фильтрования;
- увеличенная продолжительность фильтроцикла;
- простота конструкции, надежность работы.

Фильтры с полимерной загрузкой используют для очистки производственных сточных вод от масел и нефтепродуктов, не находящихся в виде стойких эмульсий; для доочистки механически очищенных производственных стоков (металлургической, химической и легкой промышленности), для доочистки биологически очищенных городских сточных вод. Возможно их использование для очистки дождевых вод. Допустимая концентрация масел и нефти в очищаемых стоках — 150 мг/л, взвешенных веществ — 100 мг/л. При очистке содержание примесей снижается до 10 мг/л.

Одним из вариантов загрузки является *пенополиуретан* с размерами гранул 0,5 – 12 мм и пор 0,8 – 1,2 мм, плотностью 46 – 50 кг/м<sup>3</sup>. Высота слоя загрузки составляет 1,0 – 1,2 м (до 2 м), скорость фильтрования до 25 м/ч, температура не менее 5 ° (применяется в зданиях). Схема фильтра с плавающей загрузкой из измельченного пенополиуретана ФПЗ-3 представлена на рис. 5.10. Загрузка фильтра состоит из гранул, крупность которых уменьшается по направлению движения воды, т. е. сверху-вниз.

Фильтры с плавающей загрузкой из *полистирола* обычно встраиваются в первичные или вторичные отстойники. Фильтрование в них производится снизу вверх. Часть взвешенных веществ оседает в отстойнике, остальные задерживаются плавающим фильтром. Промывку загрузки производят сверху вниз в течение 3 – 4 минут с интенсивностью 10 – 14 л/(м<sup>2</sup>·ч). Удаляются грубодисперсные вещества; тонкодисперсные слабоустойчивые, способные агломерироваться при

фильтрации, а также высокоустойчивые, предварительно коагулированные.

Схема фильтра, работающего в восходящем потоке, представлена на рис. 5.10. Исходную воду фильтруют снизу вверх через удерживаемую в затопленном состоянии верхней системой пенополистирольную загрузку. Очищенная вода собирается в надфильтровом пространстве и отводится в резервуар чистой воды. Промывку пенополистирольной загрузки осуществляют нисходящим потоком чистой воды, накопленной в надфильтровом пространстве. Загрузка при этом расширяется на 20 – 30 %, а накопленные в ней загрязнения уносятся в канализацию.

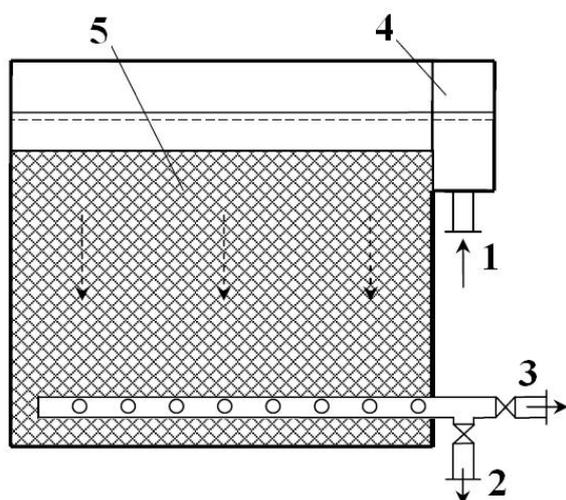


Рис. 5.10. Схема фильтра с плавающей загрузкой ФПЗ-3:  
1 — подвод воды, 2 — отвод промывной воды, 3 — отвод фильтрата, 4 — распределительный карман, 5 — плавающая загрузка из измельченного пенополиуретана

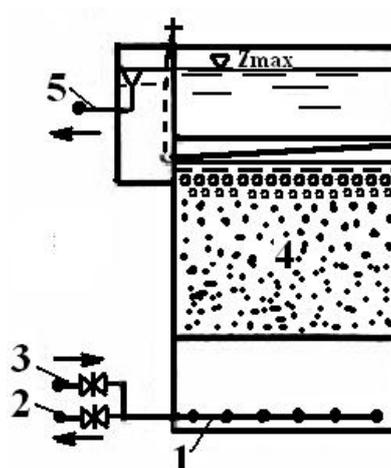


Рис. 5.11. Схема фильтра с пенополистирольной загрузкой, работающего в восходящем потоке:  
1 — нижняя сборно-распределительная система; 2 — отвод промывной воды; 3 — подача исходной воды; 4 — пенополистирольная загрузка; 5 — отвод фильтрата

### **Сетчатые барабанные фильтры**

Сетчатые барабанные фильтры применяют для механической очистки производственных сточных вод, для установки перед филь-

рами глубокой очистки сточных вод (барабанные сетки), а также в качестве самостоятельных сооружений глубокой очистки (микрофильтры). В сточной воде должны отсутствовать жиры, смолы, масла, нефтепродукты, иначе затрудняется промыв сетки. Эффективность очистки микрофильтров по взвешенным веществам составляет 50 – 60%, по БПК<sub>полн</sub> — 25 – 30 %, барабанных фильтров — 20 – 25 по взвешенным веществам и 5 – 10 % по БПК<sub>полн</sub>.

Схема барабанного фильтра представлена на рис. 5.12.

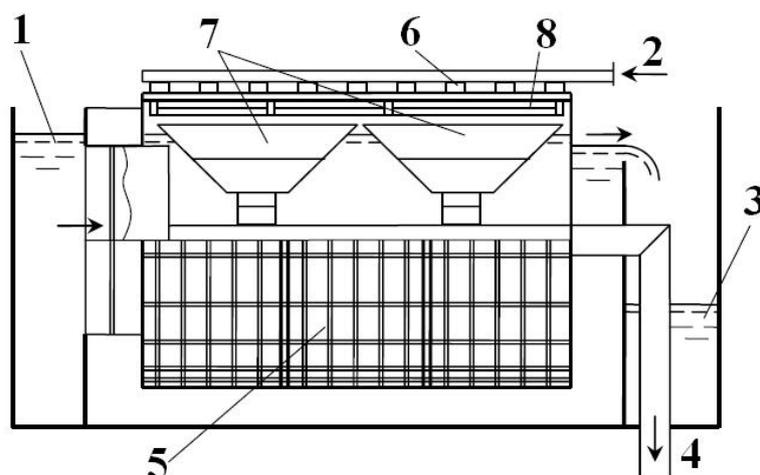


Рис. 5.12. Сетчатый барабанный фильтр: 1 — канал исходной воды, 2 — подача промывной воды, 3 — канал фильтрата, 4 — отвод промывной воды, 5 — барабан, 6 — промывные устройства, 7 — бункеры для сбора промывной воды, 8 — бактерицидные лампы

Принцип работы барабанных фильтров заключается в следующем. Сточная вода из подводящего канала по впускной трубе поступает внутрь барабана микрофильтра, фильтруется через сетчатые стенки и поступает в резервуар, в котором расположен барабан фильтра. Затем из резервуара через водослив изливается в отводящий канал фильтрата. Хлопья активного ила, водоросли и другие плавающие загрязнения задерживаются на сетке. При вращении барабана сетка с прилипшими к ней загрязнениями поступает в зону действия промывных труб, промывается и вновь погружается в воду.

Рабочая сетка барабанных фильтров делается из нержавеющей стали, латуни или капрона с размерами ячеек 0,3х0,3 – 0,5х0,5. Кроме

рабочей сетки предусмотрена поддерживающая сетка с размерами ячеек 2x2 – 8x8 мм.

Микрофильтры используют в тех случаях, когда допустима меньшая степень очистки по сравнению с достигаемой на фильтрах с зернистой загрузкой. В микрофильтрах применяют рабочие сетки галунного сплетения из нержавеющей стали с размером отверстий 35 мкм. Размеры ячеек поддерживающей сетки 2x2 мм. По конструкции микрофильтры аналогичны барабанным фильтрам, отличие состоит только в рабочей сетке. Промывку микрофильтров производят постоянно.

### ***Задание 5***

1. Ответьте на следующие вопросы:

а) от каких примесей освобождаются путем процеживания сточной воды через решетки?

б) назовите основные виды классификаций фильтров, применяемых для очистки природных и сточных вод;

в) что такое многослойный фильтр?

г) как определяется измельчаемость и истираемость зернистой загрузки?

д) чем промывают фильтры с зернистой загрузкой?

е) объясните принципы работы сетчатого барабанного фильтра

## **6. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД**

### **6.1. ОБРАБОТКА ВОДЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

К настоящему времени пока не создано единой теории, объясняющей все многообразие воздействия магнитного поля на структуру воды и на поведение примесных компонентов. Тем не менее, можно перечислить основные виды воздействия и следствия, которые используются в водоочистке.

Магнитное поле действует:

- на ионы солей в воде — происходит их поляризация и деформация; следствием является уменьшения гидратации ионов, повышение вероятности их сближения и, в результате, образование центров кристаллизации;

- на структуру воды — происходит нарушение ориентации ядерных спинов водорода в молекуле воды;

- на ионообменный процесс проницаемости биологических мембран;

- на капиллярные и поверхностные явления.

Следствиями перечисленных видов воздействия являются:

- устранение накипеобразования при высокой температуре, поскольку происходит кристаллизация в объеме, а не на поверхности (борьба с солями жёсткости и накипеобразованием — это основное применение магнитного поля в настоящее время);

- снижение (отсутствие) инкрустации в аппаратах и трубопроводах;

- повышение интенсивности процессов коагуляции (магнитное поле влияет на электрокинетический потенциал и агрегативную устойчивость взвешенных частиц);

- активация процессов адсорбции;

- повышение бактерицидного действия дезинфектантов;

- резкое увеличение растворимости газов (более чем в 30 раз);

- ускорение реакций, в том числе, скорости растворения. Например, скорость растворения неорганических солей увеличивается в десятки раз (для  $MgSO_4$  — в 120 раз), в воде после магнитной обработки увеличивается концентрация растворенного кислорода.

## **6.2. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ВОДЫ И НА ПРИМЕСНЫЕ КОМПОНЕНТЫ**

Электромагнитное излучение (ЭМИ) характеризуется частотой  $\nu$  (или длиной волны  $\lambda = c/\nu$ , где  $c$  — скорость распространения электромагнитной волны), которая определяет энергию электромаг-

нитного кванта  $E = \hbar\nu$  ( $\hbar$  — постоянная Планка). Происхождение разных по энергии квантов (природа взаимодействия их с веществом) принципиально неодинаковое. В табл. 6.1 приведены основные области электромагнитного излучения, причина происхождения, характеризующая их длина волны, частота и значение энергии.

Таблица 6.1

### Области электромагнитного излучения

Область	$\lambda$	$\nu$ , Гц	$E = \hbar\nu$ , кДж/моль	Причина происхождения
$\gamma$ -излучения	$(10^{-3} - 1)$ пм	$3 \cdot 10^{20} - 3 \cdot 10^{23}$	$1,8 \cdot 10^7 - 1,8 \cdot 10^{10}$	Излучается возбужденными ядрами атомов и элементарными частицами
Рентгеновская	1 пм – 1 нм	$3 \cdot 10^{17} - 3 \cdot 10^{20}$	$1,8 \cdot 10^4 - 1,8 \cdot 10^7$	Электронные переходы во внутренних электронных слоях атомов
Ультрафиолетовая	$(1 - 400)$ нм	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	$4,5 \cdot 10^1 - 1,8 \cdot 10^4$	Переходы внешних валентных электронов, излучаются атомами и молекулами
Видимая	$(400 - 780)$ нм	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	$(2,3 - 4,5) \cdot 10^1$	
Инфракрасная	$(0,78 - 1000)$ мкм	$3 \cdot 10^{11} - 3,8 \cdot 10^{14}$	$1,8 \cdot 10^{-2} - 2,3 \cdot 10^1$	Переходы между колебательными и вращательными уровнями молекул (при колебаниях молекул или групп атомов)
Микроволновая	$(1 - 10)$ мм	$3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$	$1,8 \cdot 10^{-3} - 1,8 \cdot 10^{-2}$	
Радиочастотная	1 см – 10 км	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{-9} - 1,8 \cdot 10^{-3}$	Изменение ориентации спинов электронов или ядер атомов

Примечание: диапазоны перечисленных областей, приведенные в разных литературных источниках, несколько различаются

Анализ значений энергий квантов разных областей электромагнитного излучения (табл. 6.1) показывает, что для первых трех областей (включая ультрафиолетовую) характерны высокие энергии; в видимой области энергия соизмерима с энергией водородной связи ( $\sim 30$  кДж/моль), а в инфракрасной области — с энергией теплового движения ( $kT \cong 2,5$  кДж/моль при комнатной температуре).

Высокоэнергетичные кванты оказывают разрушающее действие не только на примесные компоненты сточных вод, но и на саму структуру воды. Существует большое количество различных теорий и моделей, объясняющих структуру и свойства воды. Общим у них является представление о водородных связях как основном факторе, определяющем образование структурированных ассоциатов. Согласно кластерно-фрактальной модели (см. рис. 6.1), вода представляет собой смесь свободных молекул и фрагментов с упорядоченной гексагональной структурой, в вершинах шестиугольников которой находятся радикалы  $\text{OH}^-$ . При действии «жестких» квантов происходит разрушение этой структуры, при этом в воде в большом количестве присутствуют радикалы  $\text{OH}^-$  и возникает пероксид водорода.

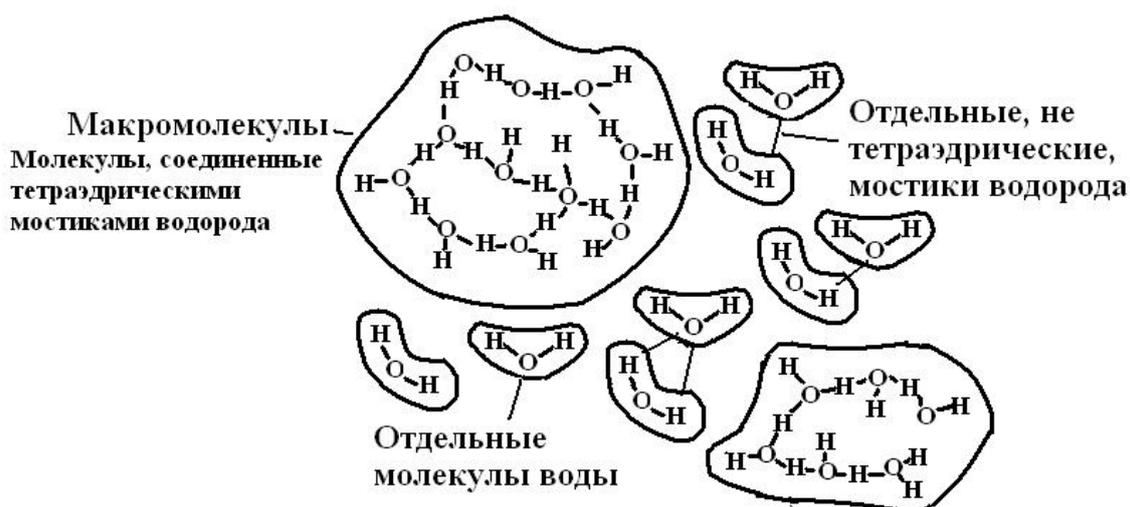


Рис. 6.1. Кластерно-фрактальная модель воды

Однако даже низкоэнергетичные кванты *микроволновой и радиочастотной области* разрушают гексагональную структуру воды. Энергия низкоэнергетичных квантов, переходя во внутреннюю энергию организованной водной структуры (в результате искажения последней) будет накапливаться этой структурой, пока не достигнет энергии водородной связи. При достижении этой величины происходит разрыв водородной связи, и структура кластеров воды разрушается. В результате этого разрыва могут образовываться ионы водорода, гидроксила, гидратированный электрон.

В последние годы в технологиях водоочистки и, особенно, водоподготовки все шире используют *ультрафиолетовое излучение* (УФ-излучение). Основная причина заключается в воздействии излучения этого диапазона на биологические структуры — нуклеиновые кислоты (ДНК, РНК) и белки.

Интенсивное поглощение всех нуклеиновых кислот в ближней УФ-области почти целиком обязано пуриновым и пиримидиновым основаниям. Сахарофосфатный остов РНК и ДНК дает незначительный вклад в спектр поглощения при длинах волн, превышающих 200 нм. На рис. 6.2 приведены спектры нуклеозидов.

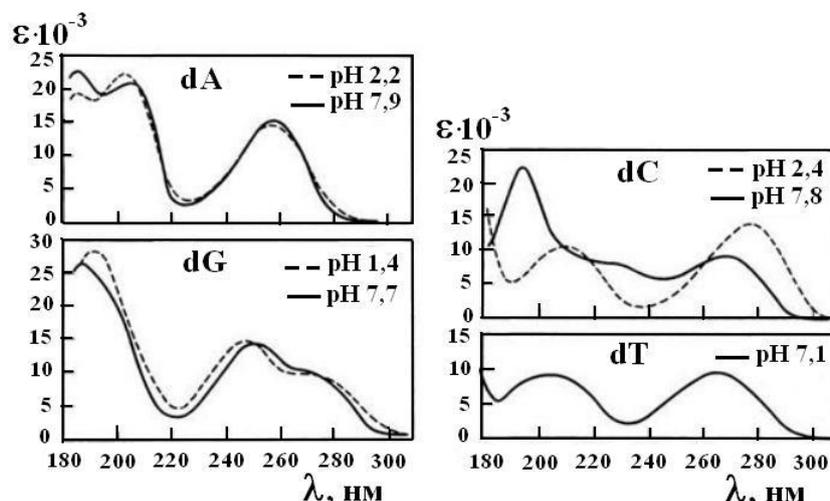


Рис. 6.2. Спектры поглощения четырех дезокси-нуклеотидов (дезоксиаденозина — dA, дезоксигуанозина — dG, дезоксицитидина — dC, тимидина — dT) при разных значениях pH ( $\epsilon$  — коэффициент молярного поглощения)

Спектры рибонуклеотидов весьма близки к ним, за исключением спектра уридина (U), у которого  $\lambda_{\max} = 260$ , а не 268 нм, как для тимина (T).

У всех азотистых оснований в области от 200 до 300 нм должно проявляться несколько разных  $n \rightarrow \pi^*$ - и  $\pi \rightarrow \pi^*$ -переходов. Кажущиеся простыми полосы поглощения аденина (A) и урацила (U) с  $\lambda_{\max} = 260$  нм, имеющие вид гауссовых кривых, в действительности порождаются более чем одним переходом. Гуанин (G) и цитозин (C)

имеют по две полосы. На самом деле они, вероятно, обладают большим числом неразрешенных полос.

Свободное основание, нуклеозид (основание, присоединенное к сахару), нуклеотид (основание, присоединенное к фосфату сахара) и денатурированный полинуклеотид все они имеют очень похожие спектры поглощения в этой области (см. табл. 6.2).

Таблица 6.2

### Полосы поглощения нуклеотидов

	$\lambda_{\max}$ , нм	$\epsilon_{\max} \cdot 10^{-3}$ , моль <sup>-1</sup> ·см <sup>-1</sup>
Рибонуклеиды		
Аденозин-5'-фосфат	259	15,4
Цитидин-5'-фосфат	271	9,1
Гуанозин-5'-фосфат	252	13,7
Уридин-5'-фосфат	262	
Дезоксирибонуклеотиды		
Дезоксиаденозин-5'-фосфат	258	15,3
Дезоксицитидин-5'-фосфат	271	9,3
Дезоксигуанозин-5'-фосфат	252	13,7
Тимидин-5'-фосфат	267	10,2

Помимо величины рН, на спектры поглощения нуклеиновых кислот и их составляющих некоторое влияние оказывает температура.

В поглощении ЭМИ белками играют роль три класса хромофоров. Это пептидные группы, боковые группы аминокислотных остатков, простетические группы.

Полоса  $n \rightarrow \pi^*$  поглощения в пептидах обычно наблюдается при 210 – 220 нм и является очень слабой ( $\epsilon_{\max} = 100$ ). Более сильная (главная в доступной для измерений области) полоса с максимумом вблизи 190 нм порождается  $\pi \rightarrow \pi^*$ -переходом ( $\epsilon_{\max} = 7000$ ). При еще более высоких частотах (энергиях) можно наблюдать третий переход с  $\lambda_{\max}$  около 175 нм. Предположительно, это  $n \rightarrow \sigma^*$ -переход.

Для боковых групп таких аминокислот, как Asp, Glu, Asn, Gln, Arg и His, наблюдаются электронные переходы, полосы которых маскируются рассмотренным выше интенсивным поглощением пептидной группы. В области, где вклад пептидных групп в поглощение ЭМИ пренебрежимо мал, активно поглощают электромагнитное излучение ароматические аминокислоты Phe, Tyr и Trp, а также гистидиновый фрагмент и дисульфидный мостик цистина. Спектры поглощения этих трех аминокислот при нейтральных pH представлены на рис. 6.3.

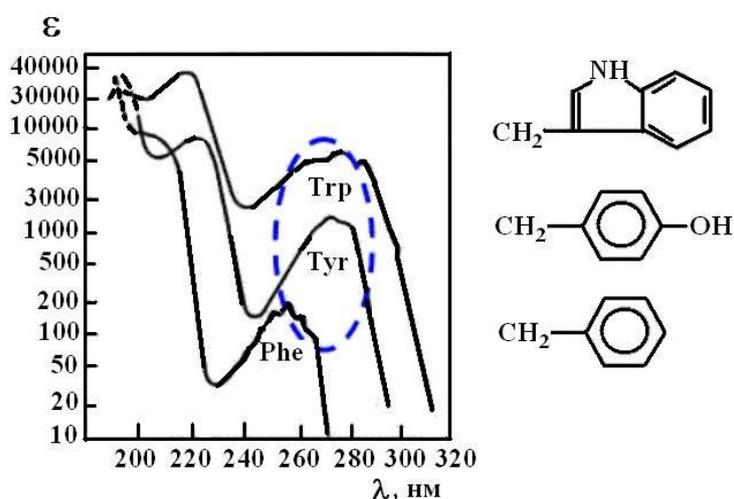


Рис. 6.3. Спектры поглощения ароматических аминокислот (триптофана, тирозина, фенилаланина)

Спектры поглощения аминокислот подвержены влиянию pH (в разной степени), кроме того, на спектр поглощения белков, в которые входят эти аминокислоты, оказывает влияние ряд факторов, в том числе, окружение аминокислот.

Многие белки содержат группы, отличающиеся от обычных аминокислот. Часто, но не всегда, эти группы связаны ковалентными связями с полипептидной цепью. Например, к ним относятся гликопротеины (сахара), гемпротеины (железосодержащие порфирины), флавопротеины (флавины), родопсин (ретиаль; витамин А). В последних трех случаях группа является хромоформом и вносит вклад в спектр поглощения в видимой или ближней УФ области. В качестве примера на рис. 6.4 приведен спектр зеленого хлорофилла.

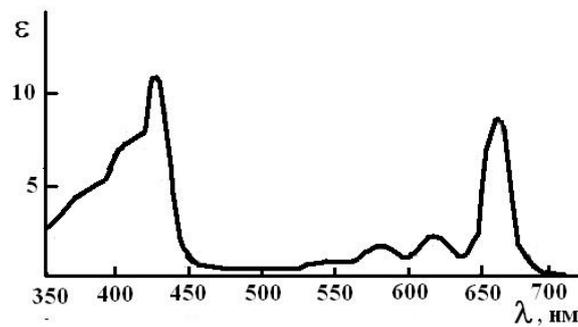


Рис. 6.4. Спектр поглощения зеленого хлорофилла в видимой области

ЭМИ может поглощаться содержащимися в молекулах некоторых белков простетическими группами. Так, например, геммы, флавины, пиридоксальфосфат и некоторые металлопротеиды обладают интенсивными полосами поглощения в ближней УФ- и видимой областях. Полосы поглощения обычно весьма чувствительным к ближайшему окружению простетических групп.

Таким образом, жизненно важные биологически активные молекулы (нуклеиновые кислоты и белки) поглощают ЭМИ преимущественно в ультрафиолетовой области (с высокими коэффициентами молекулярного поглощения). Основная полоса поглощения в ультрафиолетовом диапазоне, связанная с повреждающим действием электромагнитного излучения на нуклеиновые кислоты имеет усредненный максимум при 260 нм. Белковая структура может пострадать при УФ-излучении с длинами волн 190, 220, 280 нм.

Кроме специфического воздействия на нуклеиновые кислоты и белки УФ-излучение влияет на структуру воды, как описано выше с образованием свободных радикалов и пероксида водорода

### 6.3. УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ

Изложенные в подразд. 6.1 особенности влияния излучения УФ-диапазона положены в основу использования УФ излучения для обеззараживания природных и сточных вод. Ультрафиолетовое обеззараживание имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными химическими методами. К ним относятся:

- высокая эффективность обеззараживания в отношении широкого спектра микроорганизмов, в том числе устойчивых к хлорированию, таких как вирусы и цисты простейших;

- отсутствие влияния на физико-химические и органолептические свойства воды и воздуха, нет опасности передозировки;

- не образуются побочные продукты;

- простота эксплуатации УФ-установок, не требуются специальные меры безопасности;

- низкое энергопотребление и низкие эксплуатационные расходы, не требуются расходные материалы;

- компактность УФ-оборудования.

Недостатком метода является возможность обеззараживания только очищенной (прозрачной, неокрашенной, лишенной взвесей железа, солей жесткости) воды, а также ее нагрев в процессе обработки.

Установки УФ-обеззараживания как правило комплектуются ртутными лампами двух типов: высокого и низкого давления. Достоинство аргон-ртутных ламп низкого давления состоит в том, что их основное излучение совпадает с энергией максимального бактерицидного действия. В ртутном разряде низкого давления (3 – 4 мм. рт. ст.) около 70 % всей излучаемой мощности приходится на область ультрафиолетового излучения. Однако эти лампы могут применяться только в установках небольшой производительности (до 20 – 30 м<sup>3</sup>/ч) из-за небольшой потребляемой мощности (15 – 60 Вт).

По сравнению с лампами низкого давления ртутно-кварцевые лампы высокого давления (400 – 800 мм. рт. ст.) имеют высокую потребляемую мощность (1000 – 2500 Вт), следовательно, обладают более высокой мощностью УФ-излучения. Поэтому их можно применять для обеззараживания больших расходов воды. Максимально допустимый срок службы ламп равен 4500 – 5000 часов.

На рис. 6.5 приведена принципиальная схема установки для обеззараживания воды.

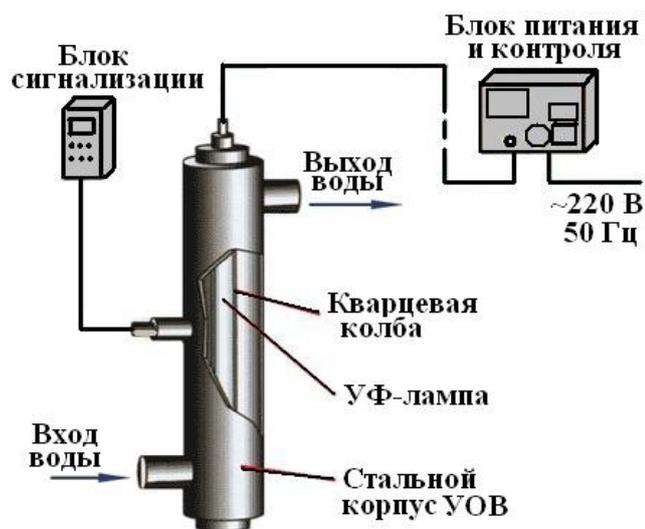


Рис. 6.5. Принципиальная схема установки для обеззараживания воды с помощью ультрафиолетового излучения

В состав системы бактерицидной установки входит корпус из нержавеющей стали с двумя патрубками для входа и выхода воды. Внутри корпуса расположена защитная кварцевая колба, куда помещена УФ лампа. Количество ламп их мощность и расположение определяют производительность УФ установки и условия ее эксплуатации.

Блок электропитания и управления (БЭУ) работает от сети переменного тока  $\sim 220$  В, 50 Гц. Питание ламп осуществляется от электронного пускорегулирующего аппарата. На лицевой панели БЭУ расположены сигнальные лампочки (светодиоды) информирующие о работе УФ ламп. В схеме контроля степени загрязненности имеется специальный фотодатчик, селективно настроенный на волну длиной 254 нм, и блок обработки сигнала фотодатчика информирующий о степени загрязненности кварцевых колб. Световая и звуковая сигнализация предупреждает о необходимости очистить кварцевую колбу от налета или заменить УФ лампу. Счетчик наработки ламп показывает время работы эксплуатации УФ ламп.

В настоящее время выпускаются установки для УФ-обеззараживания питьевых и сточных вод, воды в бассейнах и аква-

парках, в широком диапазоне производительности, например, от 0,6 до 500 м<sup>3</sup>/час, от 1000 до 5000 м<sup>3</sup>/час и др.

При расчете установок для обеззараживания воды интенсивность бактерицидного излучения необходимо определять на расстоянии 1 м от центра лампы. Расчетная величина бактерицидного потока ламп должна приниматься на 30 % ниже номинала, так как на эту величину происходит ослабление интенсивности излучения в конце срока службы ламп. Надо учитывать коэффициент поглощения водой бактерицидного излучения  $\alpha$ , который зависит от санитарно-химических показателей обрабатываемой воды. Наибольший вклад в поглощение излучения питьевой водой дает цветность воды, существенно меньшее — жесткость. Для сточной воде существенна концентрация взвешенных веществ, БПК, ХПК. Коэффициент поглощения надо определять экспериментально.

Согласно действующему ГОСТу, коэффициент поглощения облучаемой воды принимается для подземных глубоких вод — 0,1 см<sup>-1</sup>, для родниковой, грунтовой, инфильтрационной — 0,15 см<sup>-1</sup>, для обработанной воды поверхностных источников — 0,3 см<sup>-1</sup>.

Также следует учитывать коэффициент сопротивляемости облучаемых бактерий, который характеризует количество бактерицидной энергии и зависит от вида бактерий. Эффект обеззараживания оценивают по бактериям группы кишечной палочки (колиформным бактериям) как наиболее распространенным в окружающей среде и наиболее устойчивым среди патогенных и условно патогенных неспорообразующих бактерий. Коэффициент сопротивляемости облучаемых бактерий принимают равным 2500 мкВт·с/см<sup>2</sup>.

Расчет установок для обеззараживания воды производится следующим образом.

Рассчитывают бактерицидный поток  $F_{\bar{6}}$ , Вт:

$$F_{\bar{6}} = \frac{q \cdot a \cdot k \cdot \lg(P/P^0)}{1563,4 \cdot \eta_n \cdot \eta_0}, \quad (6.1)$$

где  $q$  — расчетный расход обеззараживаемой воды, м<sup>3</sup>/ч,  $\alpha$  — коэффициент поглощения облучаемой воды, см<sup>-1</sup>,  $k$  — коэффициент сопротивляемости облучению, принимаемый равным 2500 мкВт·с/см<sup>2</sup>,  $P^0$  — коли-индекс воды в ед/л до облучения (максимальное расчетное бактериальное загрязнение неочищенной сточной воды принимается равным коли-индексу  $P^0 = 1000$ ),  $P$  — коли-индекс воды после облучения (принимается не более  $P = 3$ ),  $\eta_n$  — коэффициент использования бактерицидного потока (для установки с погруженным источником излучения принимается равным 0,9, для установки с непогруженным источником излучения — 0,75),  $\eta_0$  — коэффициент использования бактерицидного излучения, зависящий от толщины слоя воды, ее санитарно-химических показателей и конструктивного типа установки (следует принимать 0,9 м)

Число ламп (камер) определяют по формуле:

$$n = \frac{F_6}{F_{\text{л}}}, \quad (6.2)$$

где  $F_{\text{л}}$  — расчетный бактерицидный поток лампы в Вт после 4500 – 5000 ч горения, принимается в соответствии с характеристикой выбираемой лампы.

Рассчитывают расход электроэнергии на обеззараживание воды  $S$ , Вт·ч/м<sup>3</sup>:

$$S = \frac{N_n}{q}, \quad (6.3)$$

где  $N_n$  — мощность, потребляемая одной лампой, Вт.

Потери напора для погружного источника излучения  $h$

$$h = 0,000022 \cdot m \cdot q_1, \quad (6.4)$$

где  $m$  — принятое число камер,  $q_1$  — расчетный расход воды через установку, м<sup>3</sup>/ч.

Длина рабочей части канала установки  $L$ , м (для безнапорной установки)

$$L = l \cdot N, \quad (6.5)$$

где  $l$  — расстояние между кассетами, м,  $N$  — общее число кассет.

#### 6.4. ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Ультразвук относится к акустическим колебаниям. Акустическими (упругими) волнами называются распространяющиеся в упругой среде механические возбуждения. Акустические волны бывают продольными, поперечными и поверхностными.

Частотный спектр акустических волн можно представить следующим образом:

- инфразвук (частота менее 20 Гц),
- слышимый звук (20 Гц – 20 кГц),
- низкий ультразвук (20 кГц – 100 кГц),
- средний ультразвук (100 кГц – 10 МГц),
- высокий ультразвук (10 МГц – 1 ГГц),
- гиперзвук (1 ГГц – 10 ТГц).

Ультразвук обладает обеззараживающим действием, которое, в основном, объясняется механическим разрушением клеточной оболочки бактерий за счет акустической кавитации. Кавитацией называется явление образования в жидкости полостей заполненных газом, паром или их смесью (кавитационные пузырьки или каверны). Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкости становится ниже критического значения (в реальной жидкости критическое давление приближенно равно давлению насыщенного пара этой жидкости при данной температуре).

Акустическая кавитация (в отличие от гидродинамической) возникает при прохождении звуковых волн высокой интенсивности и амплитуды звукового давления, превосходящей некоторую пороговую величину. Кавитационные пузырьки возникают во время полупериода разрежения на так называемых кавитационных зародышах, которыми чаще всего являются газовые включения, содержащиеся в жидкости и на колеблющейся поверхности акустического излучателя.

Пузырьки захлопываются во время полупериодов сжатия, создавая кратковременные (длительностью  $\sim 10^{-6}$  с) импульсы давления (до  $10^8$  Па и выше), способные разрушить даже весьма прочные материалы.

Для получения обеззараживающего эффекта необходимы оптимальные значения интенсивности ультразвука и частоты колебаний. С повышением частоты кавитационный пузырек не достигает конечной стадии захлопывания, что снижает микроударное действие кавитации. Чрезмерное понижение частоты приводит к увеличению уровня воздушного шума и требует увеличения габаритов излучателя. Поэтому оптимальным является диапазон 18 – 44 кГц. Повышение интенсивности ультразвука сверх определенного предела приводит к увеличению амплитудного значения давления, и кавитационный пузырек вырождается в пульсирующий. При малых значениях интенсивности слабо выражена кавитация и все вторичные эффекты, определяющие эффективность воздействия. Рабочий интервал интенсивности составляет 0,5 – 10 Вт/см<sup>2</sup>.

Бактерицидный эффект не зависит от мутности (до 50 мг/л) и цветности воды. Эффект обеззараживания распространяется не только на вегетативные, но и на споровые формы микроорганизмов.

Помимо обеззараживающего воздействия, ультразвуковые волны ускоряют протекание процессов диффузии и существенно влияют на растворимость веществ и в целом на ход химических реакций.

Ультразвук приводит к искажению геометрии гексогональной структуры воды, к аккумулярованию в ней энергии, приводящей к разрыву водородных связей между молекулами воды и к появлению в результате этого ионов водорода, гидроксила и гидратированного электрона.

Показано, что применение ультразвука в процессах биологической очистки сточных вод приводит к более глубокому окислению органических веществ и аммонийного азота, ускорению процессов

нитрификации, а также к улучшению седиментационных свойств активного ила.

## **6.5. СОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД**

Ниже приведены примеры использования физических методов для создания современных технологий очистки и обеззараживания сточных вод различного происхождения.

### **6.5.1. Электроплазменные технологии**

Электроплазменные технологии пригодны для очистки сточных вод любого происхождения, с любым уровнем микробиологического загрязнения, при любой минерализации и высокой концентрации поверхностно активных веществ:

- бытовых коммунальных стоков;
- любых сточных вод промышленных предприятий (содержащих нефтепродукты, жиры, красители, железо, шестивалентный хром, фтор, радионуклиды, соли тяжелых металлов, другие соединения органических и неорганических происхождений);
- вод, содержащих радионуклиды и трансураниевые элементы;
- льяльных вод танкеров и других плавсредств;
- вод после мойки машин и другой техники;
- фильтратов мусоросборников и полигонов хранения твердых бытовых отходов;
- стоков животноводческих комплексов;
- инфицированных сточных вод медицинских учреждений и фармакологических предприятий;
- шахтных и карьерных вод,
- соленых и жестких вод, в том числе, морских.

Также на основе электроплазменных технологий можно создавать стационарные и передвижные комплексы для нейтрализации и уничтожения высокотоксичных отходов, ядовитых веществ, ядохимикатов.

Электроплазменная установка состоит из трех функциональных блоков:

1. импульсного электромагнитного активатора (ИЭМА),
2. блока холодной плазмы (или электрогазоимпульсного реактора) (БХП),
3. электрогазоионного стабилизатора (ЭГГИС).

В ИЭМА создаются электрическое и магнитное поле с высокими значениями напряженности. В БХК происходит электрогазоимпульсный взрыв, обеспечивающий давление до 1000 МПа и образование озона. ЭГГИС может действовать как электрокоагулятор и как электрофлотатор в зависимости от выбранного режима работы.

В целом, в электроплазменных установках сочетается действие электрического и магнитного полей сверхвысокой напряженности; сверхвысокого мгновенного давления, сверхвысокой температуры, электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн, мощных химических окислителей.

Возникновение короткой жесткой ударной волны (1 – 50 мкс) приводит к резкому возрастанию растворимости озонсодержащего воздуха (более чем в 30 раз). Происходит выделение из водного потока частиц размером менее 0,2 мкм, которые становятся центрами кристаллизации. Процессы, протекающие при воздействии магнитного поля, ультрафиолетового излучения, акустических (в частности, ультразвуковых) волн описаны выше (см. подразд. 6.1 – 6.4). Окислительное действие озона, а также свободного активного хлора (который образуется на аноде из присутствующих в воде ионов хлора с последующим гидролизом молекул хлора), см. в подразд. 7.3; термическое окисление при высоких температурах — в разд. 10.

Для реализации электроплазменной технологии с расходом сточной воды в 20 м<sup>3</sup>/ч необходима малогабаритная установка, занимающая площадь 8 м<sup>2</sup>. На обработку 1 м<sup>3</sup> воды затрачивается 0,4 кВт·ч электроэнергии.

К основным достоинствам электроплазменных технологий можно отнести:

- универсальность,
- высокую, в сравнении с другими методами, степень очистки от микрофлоры и других биоорганических и органических загрязнителей;
- высокую степень обессоливания водного потока,
- возможность очистки водных потоков любого уровня загрязненности и солесодержания,
- отсутствие потребности в затратных материалах (реагентов, фильтров, адсорбентов и проч.),
- высокий уровень экологической безопасности (не создаются экологически опасные отходы технологии),
- высокий уровень надежности и контроля,
- низкие первоначальные затраты (не требуется строительство капитальных сооружений, цехов и т. п.),
- низкие общие эксплуатационные расходы (количество обслуживающего персонала в 3 – 4 раза меньше по сравнению с традиционными методами).

### **6.5.2. Радиационные технологии**

Создание источников ионизирующего излучения вызвало к жизни радиационные технологии, в которых главным орудием является само излучение. Радиационные технологии можно подразделять как по виду используемого излучения, так и по конечному продукту.

В водоочистке используется радиационно-химические технологии, в которых под воздействием излучения происходят химические реакции, влияющие на примесные вещества, а также высокая обеззараживающая активность радиационного излучения.

К достоинствам радиационных технологий можно отнести:

- энергосбережение, связанное с точным действием радиации (например, полная стерилизация сопровождается нагревом всего на несколько градусов),

- комплексность воздействия,
- возможность получения различных результатов одновременно (например, одновременная очистка и стерилизация воды),
- управляемость путем подбора поглощенной дозы или алгоритма ее набора (эффекты мощности дозы),
- уникальность, связанная с тем, что некоторые процессы невозможно выполнить другим путем.

В то же время радиационные технологии имеют ряд недостатков:

- радиационная опасность при облучении,
- возможность активации продуктов,
- многофакторность воздействия.

Негативные стороны радиационных технологий можно уменьшить правильным подбором источников излучения. В табл. 6.3 приведены основные источники излучения для радиационных технологий, их достоинства и недостатки.

Таблица 6.3

### Источники излучения для радиационных технологий

№	Источник излучения	Достоинства	Недостатки
1	Гамма-излучение изотопов (обычно $^{60}\text{Co}$ , $^{137}\text{Cs}$ )	Автономность, дешевизна излучения	Нельзя «выключить», необходимость утилизации
2	Реактор или отработанные сборки с топливом	Высокая интенсивность; дешевизна излучения	Высокая радиационная опасность; смешанный состав излучения, активация продуктов
3	Ускорители заряженных частиц постоянного тока	Хорошая управляемость	Небольшая глубина проникновения, высокая стоимость
4	Частотные наносекундные ускорители электронов	Хорошая управляемость, дешевизна	Небольшая глубина проникновения излучения

В табл. 6.4 представлены значения радиационных доз, которые требуются для снижения концентрации вещества в водном растворе на два порядка (т. е. для получения эффективности очистки 99 %).

Таблица 6.4

**Радиационная доза, требуемая для снижения концентрации вещества в водном растворе в 100 раз**

Вещество	Исходная концентрация, мг/л (число ПДК)	Доза, крад
Трихлорэтилен	9,76·10 <sup>-2</sup> (1,6)	57
	0,989 (16,5)	64
	6,42 (107)	106
Тетрахлорэтилен	0,116 (3,8)	351
	0,597 (20)	299
	2,89 (96)	442
Хлороформ	0,101 (1,68)	586
	1,37 (22,8)	592
	6,13 (102)	1001
Бензол	0,125 (0,25)	56
	1,6 (3,2)	72
	4,29 (8,6)	200
Толуол	3,49·10 <sup>-2</sup> (0,07)	50
	0,67 (1,3)	65
	4,87 (9,7)	169
Фенол	1,43 (1430)	42
	11,8 (10 <sup>4</sup> )	221
	58,9 (6·10 <sup>4</sup> )	1110

Ускорители электронов уже используются в качестве основных узлов систем водоочистки для обработки загрязненных сред в больших объемах. Успешно внедряет электронно-лучевые природоохранные технологии ZAPIT Technology, Inc. (Калифорния, США), в первую очередь, для очистки природных водоемов от техногенных загрязнений, а также подземных вод при разработке скважин. В нашей стране аналогичные установки работают в Москве, Воронеже, Омске,

Ангарске на очистке бытовых стоков и промышленных жидких отходов, главным образом химических производств.

В настоящее время созданы предпосылки для создания полностью автоматизированных производств на основе электронно-пучковых процессоров последнего поколения, отличающихся улучшенными техническими характеристиками, низким энергопотреблением и высоким КПД, минимизированными габаритами и местной биозащитой. Все это ведет к повышению производительности участков с применением ускорителей электронов, новым техническим возможностям при создании не только стационарных, но и мобильно-модульных водоочистных комплексов, удешевлению техники и технологий.

Основные преимущества процессов водоочистки с использованием радиационных методов:

- высокая и варьируемая производительность (10 – 100 м<sup>3</sup>/ч),
- низкое энергопотребление,
- высокая степень очистки, в первую очередь для органических загрязнителей, связанная с возможностью их окислительной деструкции (намного более эффективной, чем в случае озонаторов),
- одновременно протекающее обеззараживание материалов, уничтожение вирусно-бактериальной составляющей,
- возможность превращения отстойников в источники вторичных ресурсов.

Данный подход позволяет разработать технологические схемы высокоэффективных процессов глубокой очистки водоемов от промышленных стоков, а также для текущей и экстренной очистки накопителей, отстойников, хранилищ, полигонов и других сооружений, предназначенных для сбора и хранения особо вредных, химически активных смесей и сбросов.

Основные потребители технологий — промышленные предприятия и транспортные узлы.

Эффективно применение ускоренных электронов в радиационно-коагуляционной технологии водоочистки, включающей следующие основные модули:

1. Модуль предварительной подготовки жидкости,
2. Электронно-лучевой модуль,
3. Блок электрокоагуляции,
4. Модуль доочистки.

Ускоренные электроны через выпускное окно ускорителя выводятся в реакторную камеру. В результате высокоинтенсивного радиолитиза под воздействием ускоренных электронов компоненты смесей изменяют энергетическое, а в части своей и агрегатное состояние. Электронно-лучевая обработка позволяет окислить растворенные плохо коагулирующие органические вещества до образования карбоксильных групп, которые хорошо адсорбируются гидроксидами алюминия и железа. Кроме того происходит разрушение металлоорганических или аммиачных комплексов тяжелых металлов.

В блоке электрокоагуляции происходит растворение электродов с образованием гидроксида металла (алюминия или железа) (см. подразд.8.4). На образующихся хлопьях эффективно адсорбируется основная масса загрязнений, активированных в электронно-лучевом модуле.

Модуль доочистки включает сорбционные камеры (фильтры), извлекающие хлопья гидроксида металла с адсорбированными примесями.

Одним из направлений использования такого водоочистного комплекса является переработка нефтесодержащих водных сред, очистка стоков нефтяных терминалов, нефтебаз, пунктов перекачки и хранения нефтепродуктов.

### ***Задание 6***

1. Ответьте на следующие вопросы:
  - а) Какие области электромагнитного излучения используют в технологиях очистки и обеззараживания природных и сточных вод ?

б) Чем обусловлено обеззараживающее действие ультрафиолетового излучения?

в) Какими процессами можно объяснить действие на воду и примеси микроволнового диапазона ЭМИ?

г) От чего зависит эффективность действия ультразвука при обработке сточной воды?

д) Какие современные технологии основаны на использовании потока ускоренных электронов?

## **7. ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД**

В очистке сточных вод и в водоподготовке традиционно используют ряд химических методов, таких как нейтрализация, окисление-восстановление, химическое осаждение

### **7.1. НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ СТОЧНЫХ ВОД**

Нейтрализацией называется обработка воды с целью регулирования значения рН.

Нейтрализация необходима для предотвращения коррозионных процессов в трубопроводах, для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов на очистных сооружениях, перед сбросом некоторых видов очищенных сточных вод в водоемы и водотоки.

Нейтрализацию реализуют путем:

1. смешивания кислых и щелочных вод,
2. добавления реагентов,
3. фильтрации кислых вод через твердые нейтрализаторы (доломит, магнезит, известняк — куски 30 – 80 мм).
4. абсорбции отходящих кислых газов щелочными сточными водами.

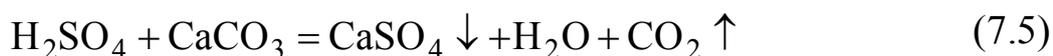
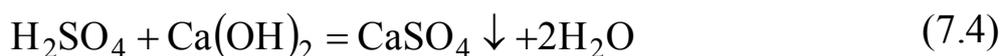
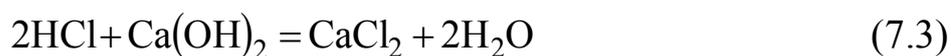
Рассмотрим названные способы нейтрализации.

1. Смешивание кислых и щелочных вод используют, если оба раствора достаточно чистые. Процесс осуществляют в специальных

емкостях с перемешивающими устройствами. При отсутствии систем перемешивания используют продувку воздухом при скорости 20 – 40 м/с.

2. Для обработки кислых стоков в качестве нейтрализующих агентов используют следующие реагенты: гидроксид натрия и калия, карбонат натрия или карбонаты других щелочных и щелочноземельных металлов, гидроксид кальция. Выбор химического реагента определяется на основании анализа продуктов реакции.

Ниже приведены примеры использования перечисленных реагентов:



Из приведенных реакций (7.1 – 7.3) видно, что в результате нейтрализации могут образоваться хорошо растворимые соли, что приведет к повышению солесодержания воды. При высоком исходном солесодержании этот вариант является неприемлемым.

Пример реакций (7.2) и (7.5) показывает, что может образоваться газ, что приведет к нежелательным процессам пенообразования и флотации взвешенных частиц.

При нейтрализации серной кислоты гидроксидом или карбонатом кальция (реакции (7.4) – (7.5)) образуется гипс. Отложение кристаллов гипса на стенках аппаратов и трубопроводов приводит к значительным осложнениям.

Из рассмотренных реагентов наиболее часто применяют  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  — гашеную известь.

Для нейтрализации щелочных стоков обычно используют сильные кислоты.

3. Фильтрацию кислых вод через слой доломита ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) магнезита ( $\text{MgCO}_3$ ), известняка ( $\text{CaCO}_3$ ) проводят в горизонтальных или вертикальных фильтрах-нейтрализаторах. Схема вертикального фильтра-нейтрализатора представлена на рис. 7.1.

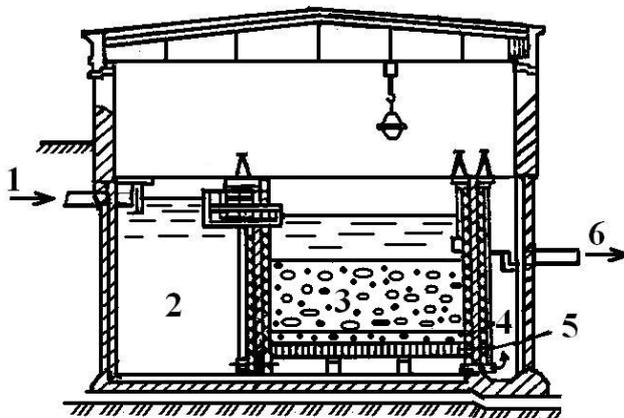


Рис. 7.1 Вертикальный доломитовый фильтр-нейтрализатор:  
1 — подача кислых сточных вод, 2 — приемные камеры, 3 — доломитовые фильтры, 4 — гравий, 5 — дренаж, 6 — выпуск нейтрализованной сточной воды

4. Для нейтрализации щелочных стоков используют отходящие кислые газы, одновременно происходит очистка газо-воздушных выбросов от оксидов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  и др. Схема реактора с мешалкой для нейтрализации щелочных сточных вод дымовыми газами представлена на рис. 7.2.

При выборе способа нейтрализации кислых сточных вод можно воспользоваться рекомендациями, приведенными в табл. 7.1.

При реагентной нейтрализации доза реагента для обработки сточных вод определяется из условия полной нейтрализации содержащихся в них кислот или щелочей и принимается на 10 % больше расчетной.

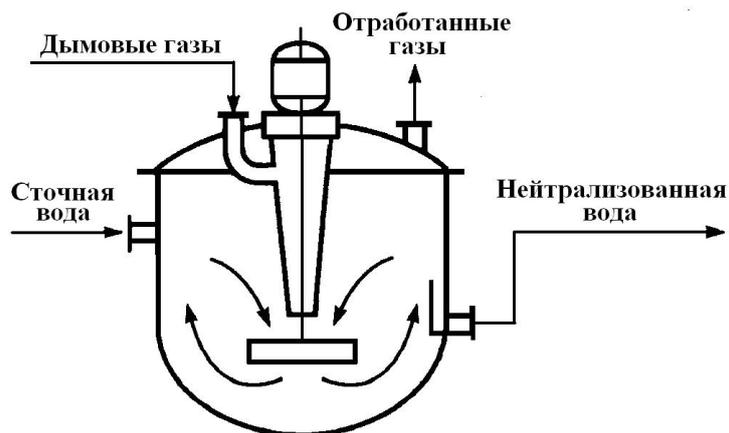


Рис. 7.2. Нейтрализатор щелочных сточных вод дымовыми газами

Таблица 7.1

**Условия применения способов нейтрализации  
кислых сточных вод**

Кислота, содержащаяся в сточных водах	Концен- трация кислоты, г/л	Режим притока	Способ нейтрализации					
			Смеше- нием со- щелоч- ными водами	Раство- ром из- вести	Раство- ром из- вестняка	Фильтрованием через		
						извест- няк	доло- мит	мел
Серная	<1,5	Равно- мерный	+	+	0	-	+	+
	>1,5		+	+	-	-	-	-
	<1,5	Нерав- номер- ный	+	0	0	-	+	+
	>1,5		+	0	-	-	-	-
Соляная и азотная	-	Равно- мерный	+	+	+	+	+	+
		Нерав- номер- ный	+	0	0	+	+	+
Углекислота и другие сла- бые кислоты	-	Равно- мерный	+	+	-	-	-	-
		Нерав- номер- ный	+	0	-	-	-	-

Примечания: «+» — применение способа рекомендуется; «0» — применение способа допускается; «-» — применение способа не рекомендуется

Количество (масса) реагентов  $G$ , кг, для нейтрализации сточных вод определяется по формуле:

$$G = k \frac{100}{B} QaA, \quad (7.6)$$

где  $k$  — коэффициент запаса расхода реагента по сравнению с теоретическим, равный для известкового молока 1,1; для известкового теста и сухой извести 1,5;  $B$  — количество активной части в товарном продукте, %;  $Q$  — количество сточных вод, подлежащих нейтрализации, м<sup>3</sup>;  $a$  — расход реагента для нейтрализации, кг/кг (см. табл. 7.3);  $A$  — концентрация кислоты или щелочи, кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 7.3

**Расход реагентов, кг / кг, для нейтрализации 100 %-ных кислот и щелочей**

Щелочь	Кислота			
	Серная H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Соляная HCl	Азотная HNO <sub>3</sub>	Уксусная CH <sub>3</sub> COOH
Известь:				
негашеная (CaO)	$\frac{0,56}{1,79}$	$\frac{0,77}{1,3}$	$\frac{0,46}{2,2}$	$\frac{0,47}{2,15}$
гашеная (Ca(OH) <sub>2</sub> )	$\frac{0,76}{1,32}$	$\frac{1,01}{0,99}$	$\frac{0,59}{1,7}$	$\frac{0,62}{1,62}$
Сода:				
кальцинированная (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	$\frac{1,08}{0,93}$	$\frac{1,45}{0,69}$	$\frac{0,84}{1,19}$	$\frac{0,88}{1,14}$
каустическая (NaOH)	$\frac{0,82}{1,22}$	$\frac{1,1}{0,91}$	$\frac{0,64}{1,67}$	$\frac{0,67}{1,5}$
Аммиак (NH <sub>4</sub> OH)	$\frac{0,35}{2,88}$	$\frac{0,47}{2,12}$	$\frac{0,27}{3,71}$	-

Примечание: над чертой указан расход щелочи, под чертой — расход кислоты

Поскольку в кислых и щелочных производственных сточных водах всегда присутствуют ионы металлов, то дозу реагента следует

определять с учетом выделения в осадок солей тяжелых металлов (см. подразд. 7.2).

При нейтрализации кислых сточных вод, содержащих соли тяжелых металлов, количество реагентов  $G$ , кг, будет:

$$G = k \frac{100}{B} Q(aA + b_1 C_1 + b_2 C_2 + \dots + b_n C_n), \quad (7.7)$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_n$  — концентрации металлов в сточных водах, кг/м<sup>3</sup>;  
 $b_1, b_2, \dots, b_n$  — расход реагентов, требуемых для перевода металлов из растворенного состояния в осадок, кг/кг (см. табл. 7.4).

Таблица 7.4

**Расход реагентов, кг / кг, требуемых для удаления металлов**

Металл	Реагент			
	CaO	Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	NaOH
Цинк	0,85	1,13	1,6	1,22
Никель	0,95	1,26	1,8	1,36
Медь	0,88	1,16	1,66	1,26
Железо	1	1,32	1,9	1,43
Свинец	0,27	0,36	0,51	0,38

Количество (масса) сухого вещества осадка,  $M$ , кг, которое образуется при нейтрализации 1 м<sup>3</sup> сточной воды, содержащей свободную серную кислоту и соли тяжелых металлов, определяется по формуле

$$M = \frac{100 - B}{B} (x_1 + x_2) + x_3 + (y_1 - y_2 - 2), \quad (7.8)$$

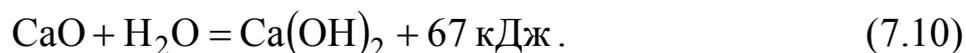
где  $B$  — содержание активной CaO в используемой извести, %;  $x_1, x_2$  — количество (масса) активной CaO, необходимой, соответственно, для осаждения металлов и для нейтрализации свободной серной кислоты, кг;  $x_3$  — количество (масса) образующихся гидроксидов металлов, кг;  $y_1, y_2$  — количество (масса) сульфата кальция, образующегося при осаждении, соответственно, металлов и при нейтрализации свободной серной кислоты, кг.

Объем осадка  $V_{ос}$ , %, образующегося при нейтрализации  $1 \text{ м}^3$  сточной воды, можно найти по уравнению:

$$V_{ос} = \frac{10M}{100 - W}, \quad (7.9)$$

где  $W$  — влажность осадка, %.

Для нейтрализации гашеная известь применяется в основном в виде известкового молока 5 % концентрации по активному оксиду кальция. Для превращения комовой извести-кипелки в форму, удобную для дозирования, ее следует погасить. При гашении извести происходит ее гидратация с выделением теплоты:



Для гашения комовой извести применяют безотходные известе-гасительные аппараты, откуда известковое молоко направляют в гидроциклон или гидравлический классификатор для отделения крупных частиц извести и возврата их на вторичное дробление.

Применяют также барабанные аппараты для безотходного гашения извести (см. рис. 7.3).

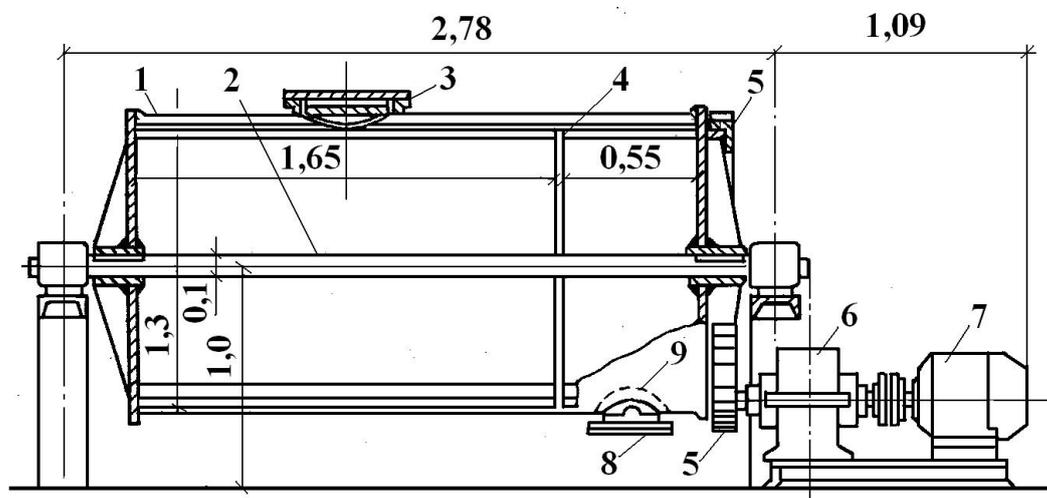


Рис. 7.2 Аппарат для безотходного гашения извести:

- 1 — барабан, 2 — горизонтальный вал, 3 — верхний люк, 4 — перегородка, 5 — шестерня, 6 — редуктор, 7 — электродвигатель, 8 — нижний люк, 9 — сетка

Этот аппарат представляем собой барабан диаметром 1300 мм, вращающийся на горизонтальном валу. В барабане на расстоянии

550 мм от его передней стенки установлена стальная перегородка толщиной 10 мм, в которой в шахматном порядке просверлены отверстия диаметром 10 мм. В барабан через верхний люк загружают 60 стальных или чугунных шаров диаметром 70 мм, а через нижний люк 30 шаров диаметром 50 мм.

Для приготовления известкового молока в барабан через верхний люк загружают 800 – 1000 кг комовой извести и наливают до горловины горячую воду. После этого включают электродвигатель, и барабан вращается в течение 30 – 40 мин с частотой 23 – 25 мин<sup>-1</sup>. Затем барабан останавливают и через задвижку патрубка, имеющегося на горловине нижнего люка, за 7 – 8 мин выпускают известковое молоко. Продолжительность гашения 1 т извести в известегасилке составляет 1,5 – 2 ч; производительность аппарата по безотходному гашению извести составляет 12 – 15 т/сут.

Рабочий раствор подают в нейтрализуемую сточную воду с помощью насосов или дозаторов. Реагенты можно дозировать в виде порошка (тонкомолотая известь, известь-пушонка), суспензии (известковое молоко), растворов (известь, а также кислоты, щелочи, сода и др.) и газа (хлор, аммиак, озон и др.).

Дозаторы сухих реагентов направляют их в открытый поток или в смеситель, где сухой реагент быстро растворяется. Суспензии, растворы и газы подаются дозаторами в открытый поток или в напорные трубопроводы.

По принципу действия дозаторы делятся на следующие типы:

- дозаторы постоянного расхода реагентов, обеспечивающие подачу в сточную воду постоянного количества реагентов независимо от расхода воды,

- дозаторы подачи реагентов пропорционально расходу сточных вод,

- дозаторы, рассчитанные на поддержание заданных параметров качества сточных вод (например, рН), обеспечивающие регулирование количества подаваемого реагента, независимо от расхода вод, на-

чальной величины активной реакции и концентрации подаваемого реагента.

Для подачи сухих порошкообразных реагентов используют тарельчатые, шнековые, вибрационные, ленточные объемные и весовые дозаторы.

Растворы и суспензии дозируются плунжерными, шестеренчатыми и диафрагмовыми насосами-дозаторами.

На рис. 7.4 приведена схема автоматического дозирования известкового молока.

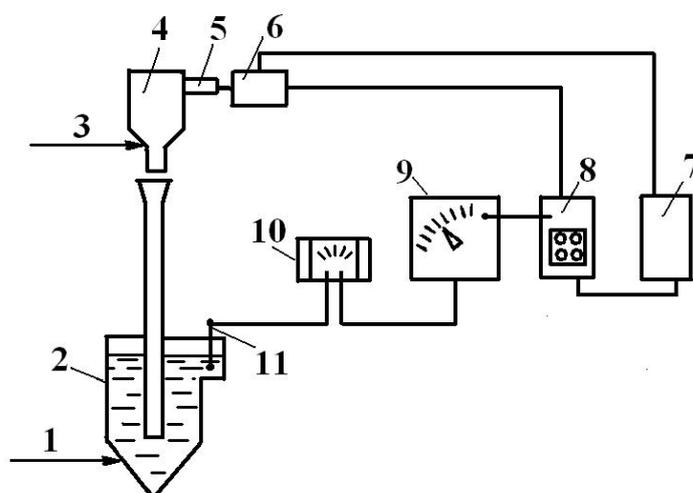


Рис. 7.4. Схема автоматического дозирования известкового молока:

- 1 — подача сточных вод, 2 — смеситель, 3 — подача извести,  
4 — дозатор, 5 — исполнительный механизм, 6 — реостатный датчик,  
7 — реверсивный магнитный пускатель, 8 — электронный регулятор,  
9 — реостатный датчик-потенциометр с вторичным датчиком,  
10 — рН-метр, 11 — датчик

Исходным параметром регулирования служит величина рН сточной воды, поступающей в смеситель. Отклонение этой величины от заданного значения фиксируется перемещением стрелки рН-метра, датчик которого установлен в смесителе. Колебания стрелки рН-метра вызывают перемещение движка реостатного потенциометра, с которого сигнал поступает на электронный регулятор. Через реверсивный магнитный пускатель регулятор управляет исполнительным механизмом дозатора. Обратная связь осуществляется реостатным

датчиком, движок которого жестко закреплен на валу исполнительного механизма. Вращение вала этого механизма приводит к изменению количества раствора реагента, поступающего в смеситель.

Для перемешивания реагента со сточной водой применяют гидравлические и механические смесители. В гидравлических смесителях смешение реагентов с водой достигается за счет энергии потока воды, расходуемой на повышение турбулентности (шайбовые, перегородчатые, дырчатые, вихревые). В механических смесителях турбулентность потока усиливается мешалками различных типов.

Из смесителей обрабатываемые сточные воды поступают в камеру реакции. При расходах нейтразуемой сточной воды до  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  допускается применение камер реакции периодического типа (не менее двух), а при бóльших расходах применяют камеры реакции непрерывного действия. Продолжительность пребывания кислых или щелочных сточных вод и реагента в камерах реакции принимается равной 5 мин, а при нейтрализации кислых сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, продолжительность контакта увеличивается до 30 мин.

Для отстаивания получающихся в результате нейтрализации осадков (для вод, содержащих ионы тяжелых металлов) применяют горизонтальные, вертикальные или радиальные отстойники, рассчитанные на пребывание в них сточной воды не менее 2 ч при доведении рН до 7,5 – 8,5. В отдельных случаях вместо отстойников применяют флотаторы.

Нейтрализацию соляно- и азотнокислых, а также сернокислых сточных вод при концентрации серной кислоты не более 1,5 г/л проводят на непрерывно действующих фильтрах. Крупность материала загрузки (доломита, магнезита, известняка, мела, мрамора и др.) составляет 3 – 8 см. Расчетная скорость фильтрования зависит от вида загрузочного материала, но при этом не должна превышать 5 м/ч; продолжительность контакта должна быть не менее 10 мин.

Применение таких фильтров возможно при условии отсутствия в сточных водах растворенных солей металлов, поскольку при  $pH > 7$  они будут выпадать в осадок в виде труднорастворимых соединений, забивающих поры фильтра. Ограничение концентрации серной кислоты (не выше 1,5 г/л) связано с образованием сульфата кальция в концентрациях, превышающих его растворимость (~2 г/л). Образующийся осадок покрывает поверхность нейтрализующей загрузки, затрудняя доступ к ней кислоты, в результате чего нейтрализация прекращается. Если в качестве загрузки применяется магнезит ( $MgCO_3$ ), то это ограничение снимается, поскольку растворимость сульфата магния достаточно высока (355 г/л по  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ).

При нейтрализации сточной воды на вертикальном фильтре (см. рис. 7.1) определяют высоту загрузочного материала  $H$ , см, по эмпирической формуле С.А. Вознесенского

$$H = Kd^n(3 + \lg b)\sqrt{v}, \quad (7.11)$$

где  $K$  и  $n$  — эмпирические константы,  $d$  — диаметр зерен загрузочного материала,  $b$  — концентрация кислоты, г-экв/л,  $v$  — скорость фильтрования, равная 4 – 8 м/ч.

Величина  $n$  относительно постоянна и в среднем равна 1,47. Величина  $K$  зависит от сорта доломита: для шелковского доломита  $K = 0,62$ , для уральского  $K = 1,31$ .

Уравнение (7.11) справедливо при нейтрализации серной кислоты, для других кислот требуется экспериментальное определение эмпирических констант.

После определения  $P$  рассчитывают площадь фильтрования  $f$ ,  $m^2$ , по формуле

$$f = q/v, \quad (7.12)$$

где  $q$  — расход нейтрализуемых сточных вод,  $m^3/c$ ,  $v$  — скорость фильтрования, м/с.

Далее определяют суточный расход реагента (загрузочного материала)  $M$ , т/сут

$$M = aAQ/1000, \quad (7.13)$$

где  $a$  — расход щелочного реагента на нейтрализацию (см. табл. 7.3),  $A$  — концентрация кислоты, кг/м<sup>3</sup>,  $Q$  — суточный расход нейтрализуемых сточных вод, м<sup>3</sup>/сут.

Поскольку полное использование активной части загрузочного материала практически невозможно, вводится коэффициент для определения фактического расхода материала  $M_{\phi}$  (например, для доломита  $M_{\phi} = 1,5 M$ ).

Продолжительность работы фильтра  $t$  без перегрузки определяют по формуле

$$t = P / M_{\phi}, \quad (7.14)$$

где  $P$  — масса загруженного в фильтр нейтрализующего материала, т, которую определяют как

$$P = H \cdot f \cdot \gamma, \quad (7.15)$$

где  $\gamma$  — плотность загрузочного нейтрализующего материала, т/м<sup>3</sup>; для доломита, известняка и мрамора  $\gamma = 2,8$  т/м<sup>3</sup>, для магнезита  $\gamma = 3,02,8$  т/м<sup>3</sup>, для мела  $\gamma = 2,7$  т/м<sup>3</sup>.

В зависимости от высоты слоя загрузочного материала, площади фильтрования и местных условий назначается число фильтров и определяются их конструктивные размеры в плане.

Для горизонтального фильтра-нейтрализатора рассчитывают длину  $l$ , м

$$l = v \cdot t', \quad (7.16)$$

где  $v$  — скорость фильтрования, равная 0,01 – 0,03 м/с,  $t'$  — продолжительность контакта сточной воды с загрузочным материалом, с, которая определяется по формуле

$$t' = \frac{6kd^{1,5}}{\sqrt{v}} (3 + \lg b), \quad (7.17)$$

где  $k$  — коэффициент, характеризующий активность доломита: для подмосковного доломита  $k = 1,87$ , для уральского  $k = 3,96$ ;  $d$  — средний диаметр зерен загрузочного материала, см;  $b$  — концентрация кислоты, г-экв/л.

Площадь поперечного сечения фильтра  $f$ ,  $\text{м}^2$ , определяют как

$$f = q/v, \quad (7.18)$$

где  $q$  — расход сточных вод,  $v$  — скорость фильтрования,  $\text{м/с}$ .

Соотношение между шириной  $B$  и высотой фильтра  $H$  принимают в зависимости от местных условий.

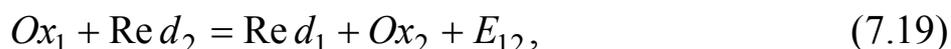
Суточный расход реагента, продолжительность работы фильтра без перегрузки и массы загружаемого фильтрующего материала проводят по формулам (7.13) – (7.15).

## 7.2. ОКИСЛЕНИЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ В ОЧИСТКЕ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИИ СТОЧНЫХ ВОД

Реакции окисления и восстановления применяют для перевода токсичных и вредных примесей в нетоксичные или менее токсичные соединения. К ним относятся, например, реакции детоксикации цианидов и роданидов путем их окисления или перевод шестизарядного хрома в трехзарядный путем восстановления.

Возможность взаимодействия между веществами, элементы которых способны изменять степень окисления, определяется окислительно-восстановительным потенциалом  $E$ .

Каждую окислительно-восстановительную реакцию (7.19) можно представить в виде алгебраической суммы двух полуреакций (7.20) и (7.21):



где  $Ox_1$  и  $Ox_2$  — окисленные формы соединений 1 и 2,  $Re d_1$  и  $Re d_2$  — их восстановленные формы,  $E_{12}$  — окислительно-восстановительный потенциал, который определяется через потенциалы полуреакций  $E_1$  и  $E_2$  уравнением (7.22):



Алгебраическое сложение реакций (7.20) и (7.21) (вычитание из реакции (7.20) реакции (7.21) дает исходное выражение (7.19).

В водных растворах реакции окисления и восстановления являются сопряженными (только в электрохимических процессах они пространственно разнесены — реакция восстановления происходит на катоде, окисления на аноде — см. подразд. 8.5), поэтому их нельзя отделять друг от друга. Однако в практике очистки сточных вод одни окислительно-восстановительные реакции называют реакциями окисления (например, реакции окисления цианидов), другие — реакциями восстановления (например, реакция восстановления шестизарядного хрома). Такие ограничения связаны с акцентированием процесса, происходящим с токсичным веществом, которое в результате водочистки переводится в менее токсичную или нетоксичную форму.

Ниже приведены примеры названных реакций.

#### ***Обезвреживание цианосодержащих сточных вод***

Для обезвреживания сильнотоксических цианидов (простых цианидов, синильной кислоты, комплексных цианидов цинка, меди, никеля, кадмия) применяют их окисление реагентами, содержащими активный хлор в щелочной среде (при  $\text{pH} > 9 \dots 10$ ):



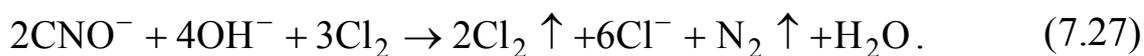
В реакции (7.23) азот окисляется, а хлор восстанавливается:



При  $\text{pH} \cong 7$  происходит гидролиз  $\text{CNO}^-$



В щелочных условиях можно окислить образующиеся в реакции (7.23) цианаты до элементарного азота и диоксида углерода:



Реакцию (7.27) также можно представить в виде двух полуреакций:



К реагентам, содержащим активный хлор, относятся хлорная известь, гипохлориты кальция и натрия, жидкий хлор (см. ниже).

Согласно СНиП 2.04.03-85, дозу активного хлора принимают из расчета 2,73 мг на 1 мг цианидов цинка, никеля, кадмия, синильной кислоты и простых цианидов и 3,18 мг/мг — для комплексных цианидов меди с избытком не менее 5 мг/л. Концентрация рабочих растворов реагентов должна быть 5 – 10 % по активному хлору.

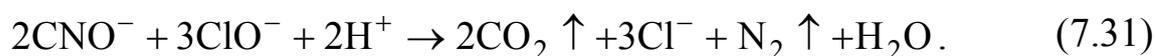
Для обработки цианосодержащих сточных вод, как правило, предусматривают установки периодического действия, состоящие не менее чем из двух камер реакции. При окислении простых цианидов время контакта сточных вод с реагентами — 5 мин, при окислении комплексных цианидов — 15 мин.

После обработки сточных вод активным хлором их необходимо нейтрализовать до pH 8 – 8,5.

Если реакцию взаимодействия цианидов с хлором проводить при более низких значениях, чем протекает реакция (7.23), то будет образовываться токсичный хлорциан



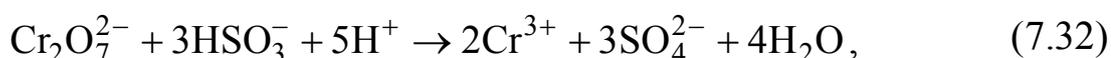
Реакция (7.27) в кислой среде протекает с достаточно высокой скоростью и может быть описана следующим уравнением:



### ***Обезвреживание хромсодержащих сточных вод***

Для обезвреживания хромсодержащих сточных вод применяют бисульфит или сульфат натрия при pH 2,5 – 3.

Восстановление шестизарядного хрома бисульфитом в кислой среде происходит по следующей реакции



которую можно расписать в виде двух полуреакций:



Затем проводят осаждение трехзарядного хрома:



Согласно СНиП 2.04.03-85, дозу бисульфита натрия принимают равной 7,5 мг на 1 мг шестивалентного хрома при концентрации его до 100 мг/л и 5,5 мг/мг — при концентрации хрома свыше 100 мг/л.

Перед подачей обезвреженных сточных вод на отстойники их нейтрализуют известковым молоком до pH 8,5 – 9.

### *Хлорирование*

Как отмечалось выше, в качестве окислителя в реакциях обезвреживания сточных вод преимущественно используют свободный активный хлор. Его высокую окислительную способность применяют также для обеззараживания питьевых, природных, сточных и очищенных сточных вод (перед их сбросом в водоем или водоток)

Свободным активным хлором называется сумма компонентов  $Cl_2$ ,  $HOCl$ ,  $OCl^{-}$ . Хлорноватистая кислота  $HOCl$  получается, например, при гидролизе молекулярного хлора:



При ее диссоциации образуется ион  $OCl^{-}$ :



Равновесие между  $Cl_2$ ,  $HOCl$  и  $OCl^{-}$  является функцией pH. Бактерицидным действием обладает  $HOCl$ , поэтому оптимальным диапазоном pH для обеззараживания является pH 4–7, в котором преобладает хлорноватистая кислота.

Для обеззараживания воды из подземных источников доза активного хлора составляет 0,7 – 1 мг/л; для бытовых сточных вод после биологической очистки — порядка 3 мг/л; после механической очистки — порядка 10 мг/л.

До недавнего прошлого для обеззараживания вод применяли газообразный хлор, который доставляли к месту потребления (напри-

мер, на станции водоподготовки) в жидком состоянии в специально предназначенных железнодорожных вагонах-цистернах, танках, контейнерах и баллонах. Хлорное хозяйство станции водоподготовки (или водоочистки) должно было обеспечить прием, хранение, испарение жидкого хлора, дозирование газообразного хлора с получением хлорной воды. Перевозка и использование жидкого хлора представляет опасность для окружающей среды и для работающего персонала. Поэтому в настоящее время свободный активный хлор получают при гидролизе гипохлорита натрия или кальция



Равновесие реакции (7.38) является функцией pH.

Гипохлорит можно получать путем электролиза поваренной соли (NaCl) или морской соли.

На аноде происходит окисление иона хлора, полученного при растворении соли

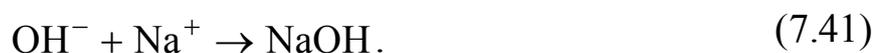


и далее гидролиз молекулярного хлора по уравнению (7.36).

На катоде происходит восстановление катиона водорода



поэтому расходуется ион водорода, который получается при диссоциации воды ( $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}^+$ ), и накапливается ион гидроксила, который вступает в реакцию с катионом натрия (полученным при растворении соли)



Образовавшаяся щелочь реагирует с хлорноватистой кислотой, полученной при гидролизе хлора



При гидролизе раствора NaCl получается продукт с концентрацией активного хлора, до 8 г/л, при гидролизе морской воды — с концентрацией до 3 г/л.

Представленный процесс можно использовать как электрохимический способ обеззараживания воды непосредственно на местах водоподготовки или водоочистки.

### **Озонирование**

Озон является более сильным окислителем, чем хлор. Его окислительный потенциал равен 2,076 В, а то время как для хлора он почти в полтора раза ниже — 1,36 В.

Метод озонирования впервые был применен во Франции в 1886 г. для дезинфекции воды на станции водоподготовки. В начале XX века для тех же целей его использовали на станции водоподготовки в Кронштадте. В настоящее время в процессах водоподготовки и водоочистки озон используют для дезинфекции, а также для деструкции, в основном, трудноокисляющихся органических соединений (фенолов, нефтепродуктов, ароматических углеводородов, пестицидов, цианидов и др.).

Озон представляет собой взрывоопасный газ бледно-фиолетового (голубоватого) цвета. Он относится к отравляющим веществам раздражающего действия. Так, в воздухе рабочих помещений ПДК = 0,1 мг/м<sup>3</sup>, кратковременное пребывание допустимо в помещениях с концентрацией озона 1 мг/м<sup>3</sup>, удушье наступает при концентрации 120 мг/м<sup>3</sup> озона

Молекула озона существует в четырех равноправных состояниях (рис. 7.5). Угол в вершине составляет 116,8 °, длина связи 1,278 Å.

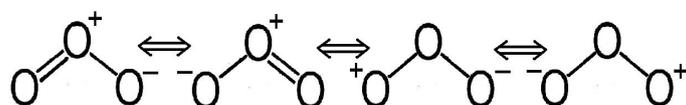


Рис. 7.5. Состояния молекулы озона

Окисляющее действие озона осуществляется через прямое окисление, окисление радикалами, озонлиз и катализ.

В прямом окислении озон вступает в прямую реакцию с окисляемой молекулой, в результате образуется окисленное вещество.

В непрямом окислении участвуют радикалы, образующиеся при реакции озона с разными типами соединений.

Схема реакции озонлиза приведена на рис. 7.6.

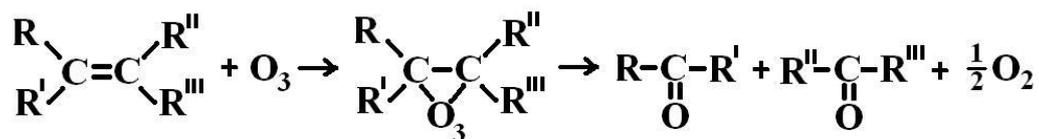


Рис. 7.6. Схема реакции озонлиза

Каталитическое действие озона может проявляться в усилении окисляющей способности кислорода в озонированном воздухе.

Наиболее экономичным способом является получение озона непосредственно на очистных сооружениях из технического кислорода или атмосферного воздуха путем тихого электрического разряда. Тихий разряд образуется в узком газовом пространстве между двумя электродами, к которым приложено высокое напряжение. Электроды могут быть трубчатой или пластинчатой формы и обычно изготавливают из металлизированного стекла (рис. 7.7). Чтобы избежать образования электрической дуги один или два электрода покрывают слоем диэлектрика. Разность потенциалов, которую прикладывают к электродам, зависит от типа и толщины слоя диэлектрика и ширины ионизационного зазора и составляет примерно 10 – 20 кВ.

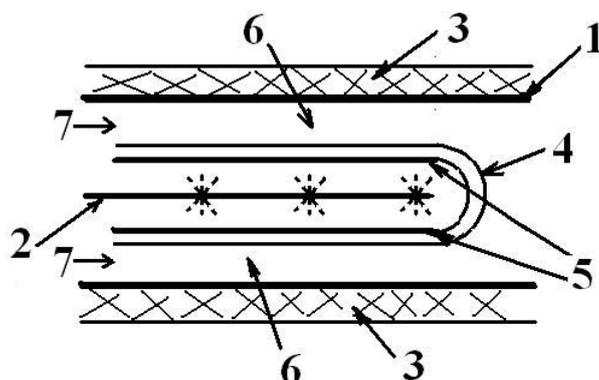


Рис. 7.7. Схема получения озона: 1 — электрод низкого напряжения (цилиндрический), 2 — электрод высокого напряжения, 3 — охлаждающая вода, 4 — стекланный диэлектрик, 5 — внутреннее металлическое покрытие, 6 — зона электрического разряда, 7 — поток воздуха или кислорода

Выход озона зависит от влажности воздуха и от температуры. С повышением температуры и влажности выход озона падает, поэтому

воздух следует охлаждать и осушать. Схема установки получения озона с охладителем и осушителем воздуха представлена на рис. 7.8.

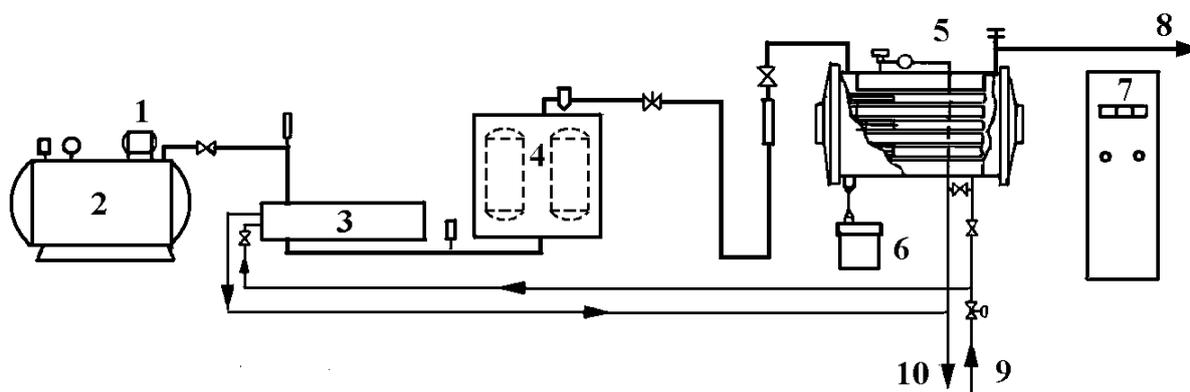


Рис. 7.8. Схема установки получения озона: 1 — компрессор, 2 — ресивер, 3 — охладитель воздуха, 4 — сушилка, 5 — генератор озона, 6 — трансформатор, 7 — электрический щит, 8 — подача озono-воздушной смеси, 9 — подача охлаждающей воды, 10 — отведение охлаждающей воды

При очистке и обеззараживании сточных вод озонированием озono-воздушная смесь из генератора подается в контактную камеру и смешивается с обрабатываемой сточной водой. Большой эффективностью озонирования достигают при циркуляции обрабатываемой воды и озono-воздушной смеси в контактной камере реакции во встречном направлении. Избыточный озон в отходящем озono-воздушном потоке химически инвертируют в кислород, поэтому нет особой необходимости тщательно регулировать дозу озона.

Чаще всего при окислении озонem органических соединений образуются кислоты, которые можно отнести к сравнительно малотоксичным веществам. Количество нефтепродуктов можно уменьшить до 0,3 мг/л при расходе озона 2,5 – 3,0 мг/мг нефтепродуктов. При этом рН раствора понизится вследствие появления в растворе кислых веществ.

Озонирование имеет ряд преимуществ перед другими методами окисления: как было отмечено выше, озон можно получать непосредственно на очистных установках; основным сырьем является атмо-

сферный воздух; в очищаемых водах не возрастает солесодержание; вода практически не загрязняется токсичными продуктами реакции; процесс легко поддается полной автоматизации.

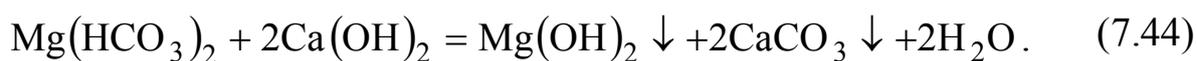
Кроме хлора и озона в процессах водоочистки используют и другие окислители. Например, кислород используют для очистки сточных вод целлюлозных, нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. Пероксид водорода применяют для окисления нитритов, альдегидов, фенолов, серосодержащих отходов, активных красителей, а также цианидов.

### 7.3. ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ В ОЧИСТКЕ ПИТЬЕВЫХ И СТОЧНЫХ ВОД

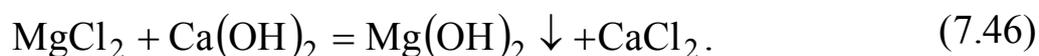
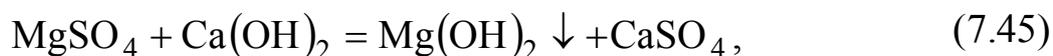
Химическое осаждение можно использовать, например, для снижения карбонатной и некарбонатной жесткости или для удаления ионов тяжелых металлов.

#### *Устранение жесткости*

Так, кальциевую и магниевую карбонатную жесткость можно устранять при добавлении извести:

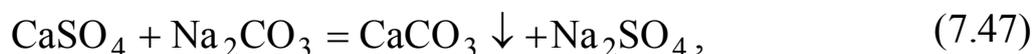


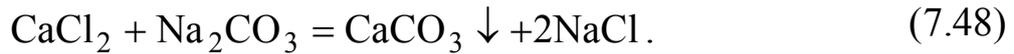
Одновременно магниевые соли некарбонатной жесткости переводятся в кальциевые:



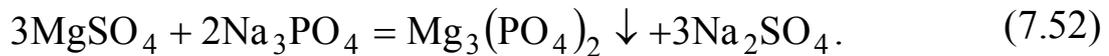
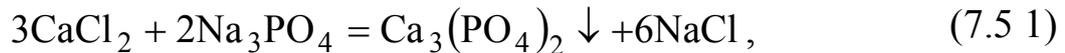
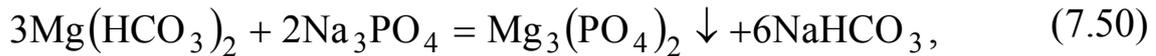
Таким путем можно снизить жесткость до предела растворимости  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . При 20 °С теоретически этот предел равен 0,3 – 0,4 мг-экв/л. Однако на практике он составляет до 0,5 – 1 мг-экв/л.

В другом варианте можно использовать известь с содой, при этом выпадают в осадок соли кальция:





Фосфатное доумягчение после подогрева воды до температуры свыше 100 °С (под давлением) в присутствии извести и соды снижает остаточную кальциевую жесткость с 0,2 мг-экв/л и магниевую с 0,1 мг-экв/л до 0,04 – 0,05 мг-экв/л:



### **Удаление ионов тяжелых металлов**

Для очистки производственных сточных вод от соединений тяжелых металлов их осаждают в виде карбонатов, гидроксидов и сульфидов. Выбор осадителя проводят по значениям произведения растворимости (ПР).

В результате процессов растворения и осаждения между осадком и его растворенной частью (ионами) наступает динамическое равновесие



где  $Kt$  — катион,  $An$  — анион,  $m$  и  $n$  — стехиометрические коэффициенты.

Согласно закону действующих масс, при установившемся равновесии в насыщенном растворе константа химического равновесия  $K$  равна

$$K_{Kt_m An_n} = \frac{a_{Kt}^m \cdot a_{An}^n}{a_{Kt_m An_n}}, \quad (7.54)$$

где  $a$  — активности компонентов реакции.

Произведение активностей ионов малорастворимого электролита в его насыщенном водном растворе при постоянной температуре, возведенных в степени их стехиометрических коэффициентов (см.

выражение (7.53)), называется произведением растворимости и обозначается ПР. Таким образом,

$$ПР = a_{Кт}^m \cdot a_{Ан}^n \quad (7.55)$$

В табл. 7.5 приведены значения ПР при комнатной температуре для разных малорастворимых соединений.

Таблица 7.5

**Значения произведения растворимости малорастворимых соединений при комнатной температуре**

Соединение	ПР	Соединение	ПР
Карбонаты			
BaCO <sub>3</sub>	5·10 <sup>-9</sup>	FeCO <sub>3</sub>	2·10 <sup>-11</sup>
CaCO <sub>3</sub>	4,8·10 <sup>-9</sup>	MnCO <sub>3</sub>	9·10 <sup>-11</sup>
CuCO <sub>3</sub>	1·10 <sup>-9</sup>	PbCO <sub>3</sub>	1·10 <sup>-13</sup>
Гидроксиды			
Al(OH) <sub>3</sub>	1·10 <sup>-33</sup>	Fe(OH) <sub>3</sub>	1·10 <sup>-38</sup>
Ca(OH) <sub>2</sub>	8·10 <sup>-6</sup>	Mg(OH) <sub>2</sub>	6·10 <sup>-12</sup>
Cd(OH) <sub>2</sub>	1·10 <sup>-14</sup>	Mn(OH) <sub>2</sub>	1·10 <sup>-149</sup>
Co(OH) <sub>2</sub>	2·10 <sup>-16</sup>	Ni(OH) <sub>2</sub>	1·10 <sup>-14</sup>
Cr(OH) <sub>3</sub>	1·10 <sup>-30</sup>	Pb(OH) <sub>2</sub>	1·10 <sup>-16</sup>
Cu(OH) <sub>2</sub>	6·10 <sup>-20</sup>	Sn(OH) <sub>2</sub>	1·10 <sup>-15</sup>
Сульфиды			
HgS	1·10 <sup>-54</sup>	ZnS	1·10 <sup>-24</sup>
CuS	1·10 <sup>-40</sup>	FeS	1·10 <sup>-22</sup>
CdS	1·10 <sup>-28</sup>	CoS	1·10 <sup>-21</sup>
PbS	1·10 <sup>-28</sup>	NiS	1·10 <sup>-21</sup>
SnS	1·10 <sup>-28</sup>	MnS	1·10 <sup>-16</sup>

Следует отметить, что при выборе осадителя при химической очистке сточных вод от того или иного иона тяжелых металлов мож-

но сравнивать значения ПР только при одинаковых стехиометрических коэффициентах в уравнении (7.53). Вместе с тем, при сравнении данных табл. 7.5 для ряда ионов можно сделать однозначный выбор, несмотря на то, что у гидроксидов стехиометрический коэффициент при анионе равен двум или трем, а у карбонатов и сульфидов при анионе и катионе он равен единице. Например, по данным для иона меди, видно, что его лучше осаждать в виде сульфида — ПР имеет значение  $1 \cdot 10^{-40}$ , что намного меньше, чем для карбоната меди (ПР =  $1 \cdot 10^{-9}$ ). Для гидроксида меди ПР =  $6 \cdot 10^{-20}$ , что, несмотря на стехиометрический коэффициент  $n = 2$ , все равно значительно больше, чем ПР для сульфида меди.

В целом по данным табл. 7.5 можно сделать вывод, что трехзарядные катионы алюминия, хрома и железа эффективнее осаждают в виде гидроксидов, а ряд двухзарядных ионов тяжелых металлов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и др.) — в виде сульфидов.

При осаждении ионов в виде гидроксидов расход реагента рассчитывают по формуле (7.7), приведенной в подразд. 7.1.

Значения рН, соответствующие началу и окончанию осаждения гидроксидов цветных металлов и железа, представлены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

**Значения рН, соответствующие процессу осаждения гидроксидов металлов при исходной концентрации осаждаемого иона 0,01 моль/л**

Катион	рН, соответствующее началу осаждения	рН при полном осаждении
$\text{Fe}^{2+}$	7,5	9,7
$\text{Fe}^{3+}$	2,3	4,1
$\text{Zn}^{2+}$	6,4	8,0
$\text{Cr}^{3+}$	4,9	6,8
$\text{Ni}^{2+}$	7,7	9,5
$\text{Al}^{3+}$	4,0	5,2
$\text{Cd}^{2+}$	8,2	9,7

Примечание: величина рН полного осаждения соответствует остаточной концентрации иона металла  $10^{-5}$  моль/л.

В многокомпонентных сточных водах значения рН, соответствующие началу и окончанию осаждения гидроксидов, существенно сдвинуты в сторону бóльших величин.

Как уже сказано выше, тяжелые металлы рекомендуется осаждавать в виде сульфидов. Для двухзарядного катиона металла реакция образования сульфида записывается как



В качестве осадителя обычно используют  $\text{Na}_2\text{S}$  или  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ . Растворимость сульфидов зависит от рН раствора (см. табл. 7.7).

Таблица 7.7

**Растворимость сульфидов ряда металлов при комнатной температуре в зависимости от рН**

Сульфид	Растворимость $\lg S$ , моль/л, при рН				
	1	3	7	9	11
MnS	3,1	1,6	-2,6	-3,8	-5,8
FeS	0,85	-1,0	-4,8	-6,0	-9,0
CoS	-0,4	-2,4	-6,2	-7,4	-6,2
NiS	-1,6	-3,6	-7,4	-8,7	-9,2
SnS	-3,3	-5,3	-9,7	-11,6	-13,9
ZnS	-2,4	-4,5	-8,2	-9,4	-8,6
CdS	-3,5	-5,5	-9,3	-10,4	-11,4
PbS	-4,05	-6,05	-9,8	-11,0	-11,8
CuS	-8,1	-10,2	-13,8	-15,1	-14,0
HgS	-16,8	-18,7	-18,7	-17,9	-16,9
Ag <sub>2</sub> S	-10,0	-9,9	-6,4	-5,2	-3,2

Гидроксиды и сульфиды тяжелых металлов образуют устойчивые коллоидные системы, поэтому для интенсификации процесса их осаждения в сточные воды добавляют коагулянты и флокулянты (см.

подразд. 8.1 ). В качестве коагулянтов чаще всего используют сульфаты алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) или трехзарядного железа ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ). В качестве флокулянта обычно применяют полиакриламид в концентрации 0,1 – 10 мг/л очищаемой воды.

Преимуществами методов химического осаждения является высокая степень очистки воды от тяжелых металлов (до значений ПДК), а также простота эксплуатации оборудования. К недостаткам метода относятся: образование большого количества трудноперерабатываемого шлама; существенный расход реагентов и связанная с этим необходимость организации реагентного хозяйства; высокое содержание солей в очищенной воде, что требует дополнительной очистки воды при ее использовании в системах оборотного водоснабжения.

### ***Задание 7***

1. Назовите способы нейтрализации щелочных стоков.
2. Рассчитайте высоту загрузочного материала вертикального фильтра-нейтрализатора для сточной воды, содержащей серную кислоту в концентрации 0,5 г/л .
3. Предложите и рассчитайте реагентное хозяйство для нейтрализации солянокислых сточных вод с концентрацией 0,05 моль/л при расходе 10000 м<sup>3</sup>/сут.
4. Выполните пункт 3 задания при содержании в стоках ионов тяжелых металлов: цинка 9,2 мг/л, никеля 7,3 мг/л, меди 32 мг/л, свинца 9,5 мг/л.
5. Выберите оптимальный осадитель для очистки сточных вод, содержащий ионы алюминия.
6. Напишите полуреакции для окислительно-восстановительной реакции перевода шестизарядного хрома в трехзарядный.
8. Напишите реакции получения гипохлорита натрия из раствора NaCl методом электролиза.
7. Ответьте на вопросы:
  - а) Что является более сильным окислителем, хлор или озон?
  - б) Что такое «свободный активный хлор»?

## **8. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД**

В данном разделе будут рассмотрены физико-химические методы, получившие наиболее широкое распространение в практике водоподготовки и водоочистки.

### **8.1. КОАГУЛЯЦИЯ И ФЛОКУЛЯЦИЯ**

#### **8.1.1. Теоретические представления, лежащие в основе коагуляции и флокуляции**

Теоретические основы процессов коагуляции и флокуляции рассматриваются в коллоидной химии.

Для понимания процессов, используемых в коагуляционной очистке природных и сточных вод, необходимы знания о строении двойного электрического поля (ДЭС), о теории устойчивости лиофобных коллоидов Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека (ДЛФО), о современной теории устойчивости лиофильных дисперсных систем, о гидролизе многозарядных ионов и процессах, следующих за гидролизом.

#### ***Строение двойного электрического слоя***

Опуская вопросы образования ДЭС, остановимся на современных представлениях о его строении, которые объединяют теории Л. Гуи, Д. Чепмена и О. Штерна. Рассмотрим границу твердой и жидкой фаз. Для определенности предположим, что твердая фаза заряжена отрицательно. Ионы, входящие в состав твердой фазы, образуют внутреннюю обкладку ДЭС. Со стороны раствора ионы противоположного знака (противоионы) образуют внешнюю обкладку ДЭС, обращенную к жидкой фазе. Ионы внешней обкладки образуют два слоя — — плотный и диффузный. Плотный слой образуется за счет электростатического притяжения противоионов к внутренней обкладке; он также называется адсорбционным слоем, слоем Гельмгольца, слоем Штерна) (рис. 8.1, а). Диффузный слой, отстоящий от поверх-

ности дальше, образуется, с одной стороны, за счет электростатического притяжения противоионов к ионам внутренней обкладки, а с другой стороны, за счет их стремления равномерно распределиться в объеме раствора. В результате устанавливается динамическое равновесие, в котором скорость диффузии ионов из поверхностного слоя в объем раствора равна скорости обратного процесса, обусловленного полем электростатических сил.

На рис. 8.1, б, изображен избыток ионов во внешней обкладке ДЭС. Система в целом всегда является электронейтральной, т. е. число зарядов внутренней обкладки должно быть равно числу зарядов противоионов (плотный слой плюс избыток в диффузном слое).

Противоионы конечных размеров не могут подойти к поверхности ближе, чем на расстояние  $d$  (плоскость наибольшего приближения). Толщина плотного слоя определяется как сумма радиусов ионов внутренней обкладки и ионов плотного слоя с учетом их гидратации (изображается как расстояние от поверхности до плоскости наибольшего приближения — см. рис. 8.2.) Толщина  $d$  имеет порядок десятых долей нанометра.

Падение потенциала, линейное в плотном слое, переходит в экспоненциальное при  $x > d$ . Толщину диффузного слоя ( $\delta$ ) можно определить как расстояние, на котором штерновский потенциал ( $\psi_1$ ) падает в  $e$  раз.

Ионы, образующие внутреннюю обкладку и вызывающие возникновение межфазного потенциала, называются потенциалопределяющими. Индифферентный электролит не содержит потенциалопределяющих или адсорбирующихся ионов.):

Теория Штерна учитывает также специфическую (некулоновскую) адсорбцию на поверхности раздела фаз, которая существенным образом может влиять на изменение потенциала.

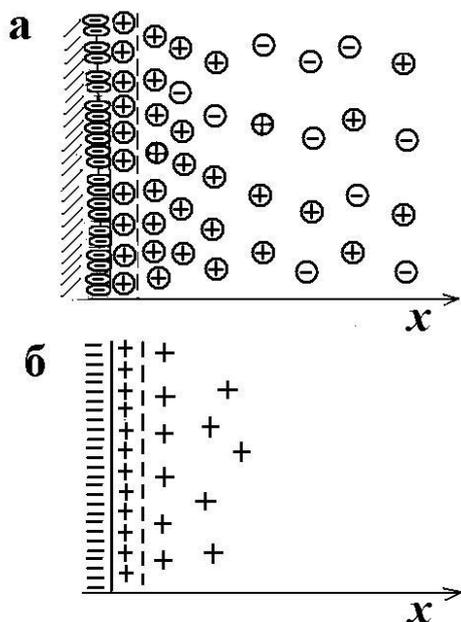


Рис. 8.1. Схема строения двойного электрического слоя:  
 а) распределение ионов;  
 б) схематическое изображение избыточных ионов

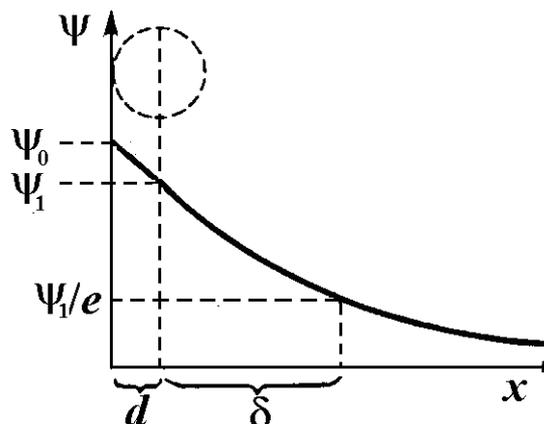


Рис. 8.2. Распределение потенциала в двойном электрическом слое:  $\psi_0$  — потенциал границы раздела фаз,  $\psi_1$  — Штерновский потенциал;  $d$  — толщина плотного слоя;  $\delta$  — толщина диффузного слоя

Из теории строения ДЭС следует, что толщина диффузного слоя внешней обкладки ДЭС  $\delta$  равна

$$\delta = \frac{1}{zF} \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 RT}{2C}}, \quad (8.1)$$

где  $z_i$  — зарядное число ионов с учетом знака;  $F$  — число Фарадея,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды (относительная диэлектрическая проницаемость),  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума), равная  $8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура,  $C$  — концентрация индифферентного электролита.

Для больших значений штерновского потенциала ( $zF\psi_1 \gg RT$ ) получается зависимость

$$\psi_1 = \frac{RT}{zF} (2 \ln \eta_0 + \ln A - \ln C), \quad (8.2)$$

где  $\eta_0$  — поверхностная плотность заряда,  $A = \frac{1}{2\varepsilon\varepsilon_0RT}$ .

При  $\eta_0 = \text{const}$  штерновский потенциал уменьшается с ростом концентрации индифферентного электролита ( $\psi_1 \sim -\ln C$ ) и с ростом зарядного числа ( $\psi_1 \sim \frac{1}{z}$ ).

В области малых потенциалов ( $zF\psi_1 \ll RT$ )

$$\psi_1 = \frac{\eta_0}{zF} \sqrt{\frac{RT}{2\varepsilon\varepsilon_0 C}}, \quad (8.3)$$

т. е. при  $\eta_0 = \text{const}$   $\psi_1 \sim \frac{1}{z}$ ,  $\psi_1 \sim \frac{1}{\sqrt{C}}$ .

Таким образом, с ростом концентрации индифферентного электролита  $C$  величина штерновского потенциала  $\psi_1$  уменьшается и тем сильнее, чем выше  $z$ . При этом происходит «сжатие» диффузного слоя (уменьшение его толщины  $\delta$ ).

В растворах потенциалоопределяющих ионов с ростом их концентрации также происходит сжатие диффузного слоя и уменьшение  $\psi_1$ , однако вместе с этим происходит увеличение  $\eta_0$  (вследствие адсорбции ионов), а следовательно, и  $\psi_1$ . Одновременное проявление двух противоположных тенденций приводит к  $S$ -образному виду кривых  $\psi_1 = f(C)$ .

Штерновский потенциал  $\psi_1$  является величиной строго определенной, но его практически невозможно измерить. Вместе с тем, экспериментально можно измерить величину, близкую к  $\psi_1$ , — это электрокинетический (дзета-) потенциал.

Дзета-потенциал ( $\zeta$ ) определяют как потенциал границы скольжения фаз, отсчитываемый от уровня в жидкой фазе, достаточно удаленного от границы раздела. Границу скольжения фаз устанавливают при относительном перемещении фаз, например, при течении жидкости вдоль поверхности.

В растворах индифферентных электролитов зависимость дзета-потенциала от концентрации соответствует теоретической для штерновского потенциала, т. е.  $\zeta \sim \frac{1}{\sqrt{C}}$  или  $\zeta \sim -\ln C$ , за исключением начального участка (для 1:1-зарядных электролитов наблюдается некоторое увеличение  $\zeta$  с ростом  $C$ ). Зависимость  $\zeta - C$  для одно-, двух- и трехзарядных противоионов представлена на рис. 8.3.

Для трехзарядных противоионов (рис. 8.3, кривая 3) наблюдается сверхэквивалентная специфическая адсорбция противоионов под действием дополнительных (вандерваальсовых сил). Такой способностью обладают либо многозарядные ионы, поляризующие твердую фазу (например,  $\text{Ge}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ), либо сложные органические ионы (алкалоиды, ПАВ, красители), поляризованные твердой фазой. В результате ДЭС приобретает трехслойную структуру, представленную на рис. 8.4.

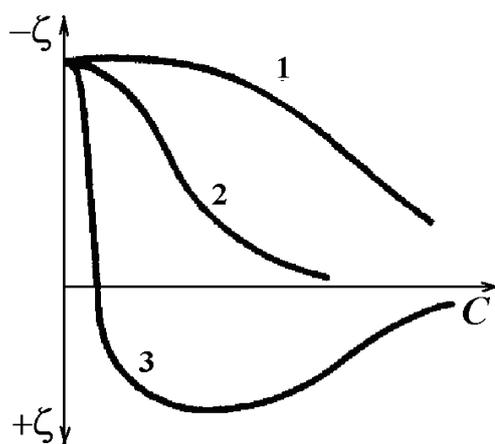


Рис. 8.3. Зависимость электрокинетического потенциала от концентрации индифферентного электролита для одно- — (1), двух- — (2) и трехзарядных — (3) противоионов

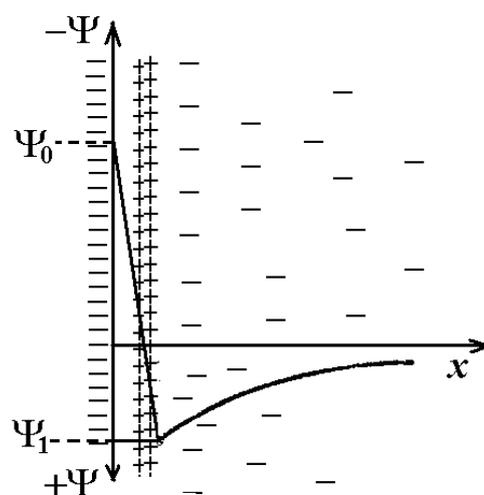


Рис. 8.4. Распределение ионов и падение потенциала в ДЭС при сверхэквивалентной адсорбции

### **Теория ДЛФО**

В классической теории устойчивости лиофобных систем Дерягина-Ландау-Фервея-Овербека процесс коагуляции рассматривается как

результат совместного действия электростатических сил отталкивания и Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения между частицами

$$V_T(H) = V_E(H) + V_M(H), \quad (8.4)$$

где  $H$  — расстояние между частицами (например, между их поверхностями);  $V_T(H)$  — полная (суммарная) потенциальная энергия взаимодействия частиц,  $V_E(H)$  — ионно-электростатическая составляющая, связанная с перекрытием диффузных ионных атмосфер,  $V_M(H)$  — молекулярная составляющая, обусловленная силами Ван-дер-Ваальса.

На рис. 8.5 изображены характерные участки на суммарной кривой зависимости энергии взаимодействия между частицами от расстояния между их поверхностями: первичный минимум, вторичный минимум, потенциальный барьер, а также характер агрегатов, получаемых при коагуляции в первичном и во вторичном минимумах (ближней и дальней ямах).

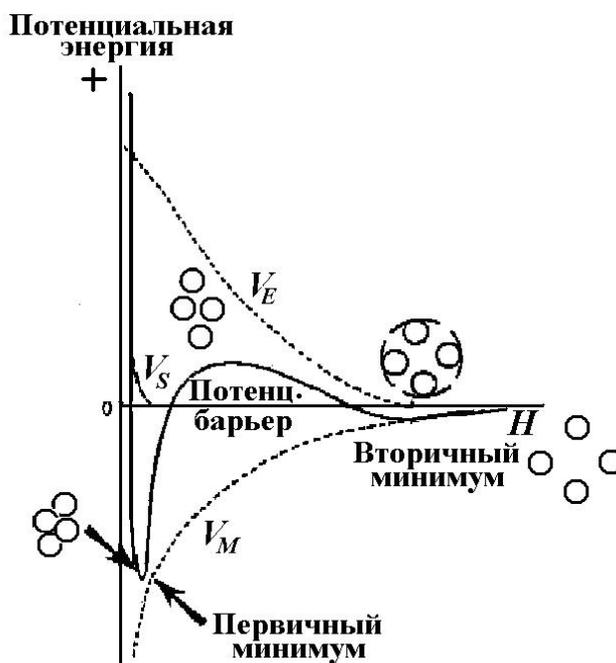


Рис. 8.5. Составляющие энергии взаимодействия коллоидных частиц

Ионно-электростатическая составляющая энергии взаимодействия коллоидов при постоянном потенциале ( $V_E^\Psi$ ) пропорциональна квадрату штерновского потенциала

$$V_E^\Psi = a\pi\epsilon\epsilon_0\Psi_1^2 \left\{ \ln \frac{1 + \exp(-\kappa'H)}{1 - \exp(-\kappa'H)} + \ln[1 - \exp(-2\kappa'H)] \right\}, \quad (8.5)$$

где  $a$  — радиус частиц;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды;  $\Psi_1$  — штерновский потенциал;  $\kappa'$  — параметр Дебая, который находится по формуле

$$\kappa' = \sqrt{\frac{e_0^2 \cdot \sum n_i z_i^2}{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot k \cdot T}}, \quad (8.6)$$

где  $e_0$  — заряд электрона ( $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  кул);  $n_i$  — число  $i$ -х ионов;  $z_i$  — зарядное число  $i$ -го иона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура.

Формула (8.5) справедлива при  $|\Psi_1| < 50/z$  мВ и  $\kappa'H > 5$ .

Энергию молекулярного притяжения обычно рассчитывают по формуле, выведенной из микроскопической теории с учетом электромагнитного запаздывания дисперсионных сил

$$V_M = \frac{A \cdot a}{12H} \cdot \frac{1}{(1 + 1,77p)} \quad \text{при } 0 < p < 2, \quad (8.7)$$

$$V_M = \frac{A \cdot a}{H} \cdot \left( -\frac{2,45}{60p} + \frac{2,17}{180p^2} - \frac{0,59}{420p^3} \right) \quad \text{при } 0,5 < p < \infty, \quad (8.8)$$

где  $A$  — константа Гамакера;  $p = \frac{2\pi H}{\lambda}$ , где  $\lambda$  — характеристическая длина волны света, отвечающая его поглощению (формулы справедливы при  $H \ll a$ ).

Константа Гамакера пропорциональна плотности взаимодействующих веществ, поэтому притяжение возрастает по мере увеличения плотности коллоидных частиц. Значения  $A$  колеблются в пределах  $10^{-21} \dots 10^{-19}$  Дж. Их вычисляют квантово-статистическим путем или находят косвенно из экспериментальных данных.

При взаимодействии двух пластин, состоящих из веществ 1 и 2, константа Гамакера равна

$$A_{12} = \frac{3\pi^2}{2} \cdot \alpha_1 \alpha_2 \cdot \frac{J_1 J_2}{(J_1 + J_2)} v_1 v_2, \quad (8.9)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — число молекул в  $1 \text{ см}^3$  каждой из пластин;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — поляризуемости молекул пластин;  $J_1$  и  $J_2$  — потенциалы ионизации молекул пластин.

Обычно взаимодействие частиц происходит в какой-либо среде, поэтому оно будет зависеть не только от притяжения частица-частица (для одинаковых частичек описывается константой Гамакера  $A_{11}$ ), но и от притяжения частица – среда (описывается константой  $A_{12}$ ) и среда – среда ( $A_{22}$ ). В этом случае смешанная константа Гамакера  $A_{1(2)}$ , описывающая притяжение между частицами 1 в среде 2, равна

$$A_{1(2)} = A_{11} + A_{22} - 2A_{12}, \quad (8.10)$$

где

$$A_{12} = \left( \sqrt{A_{11}} - \sqrt{A_{22}} \right)^2. \quad (8.11)$$

Из приведенных уравнений видно, что процессом коагуляции гидрофобных коллоидов можно управлять, влияя на штерновский потенциал через концентрацию и зарядное число индифферентного электролита, а также влияя на взаимодействие частицы со средой, что скажется на смешанной константе Гамакера.

Наиболее важным фактором, вызывающим коагуляцию частиц, является добавление электролитов. Коагуляция под действием электролитов подчиняется правилу Шульце-Гарди: коагулирующее действие оказывает противоион, и коагулирующая способность возрастает пропорционально некоторой высокой степени его заряда. Правило Шульце-Гарди является отражением выражения для порога коагуляции  $\gamma$  (критической концентрации, при которой данный электролит вызывает быструю коагуляцию):

Гарди: коагулирующее действие оказывает противоион, и коагулирующая способность возрастает пропорционально некоторой высокой степени его заряда. Правило Шульце-Гарди является отражение выражения для порога коагуляции  $\gamma$  (критической концентрации, при которой данный электролит вызывает быструю коагуляцию):

Гарди: коагулирующее действие оказывает противоион, и коагулирующая способность возрастает пропорционально некоторой высокой степени его заряда. Правило Шульце-Гарди является отражение выражения для порога коагуляции  $\gamma$  (критической концентрации, при которой данный электролит вызывает быструю коагуляцию):

$$\gamma z^6 = const.$$

Согласно соотношению (8.12) пороговые концентрации для одно-, двух- и трехзарядных ионов относятся как  $1 : 2^6 : 3^6 = 1 : 64 : 729$ . Данное соотношение относится к случаю коагуляции в первичном минимуме. Для коагуляции во вторичном минимуме справедливо выражение  $\gamma z^{2,5 \dots 3,5} = const$ .

Для лиофильных систем уравнение (8.4) преобразуется в более сложное, включающее дополнительные составляющие выражение:

$$V_T(H) = V_E(H) + V_M(H) + V_S(H) + V_a(H) + V_{St}(H), \quad (8.13)$$

где  $V_S(H)$  — структурная составляющая, возникающая при перекрытии граничных слоев, в которых структура воды отличается от объемной,  $V_a(H)$  — адсорбционная составляющая, связанная с перекрытием диффузных адсорбционных слоёв нейтральных молекул,  $V_{St}(H)$  — составляющая, обусловленная стерическим отталкиванием при сближении двух поверхностей, покрытых адсорбционными слоями ПАВ или полимеров.

Третий член в выражении (8.13) (структурная составляющая) связан с интенсивным взаимодействием лиофильных коллоидных частиц со средой. Решающую роль в их стабилизации играют сольватные слои, формирующиеся на поверхности дисперсной фазы в ре-

зультате полимолекулярной адсорбции растворителя. Наличие сольватных слоев приводит к ограничению первичного минимума. При низких значениях потенциала поверхности или состояниях, близких к изоэлектрической точке, структурные силы могут обеспечить достаточно высокий барьер на кривых энергии взаимодействия частиц, что обеспечит агрегативную устойчивость системы в условиях, приводящих к агрегации лиофобных коллоидов.

Последние члены выражения (8.13) связаны со стабилизацией высокодисперсных системы высокомолекулярными веществами за счет их адсорбции на поверхности дисперсной фазы. Часто это сополимеры, один компонент которых связывается с поверхностью частицы за счет химических взаимодействий, водородных связей и т. п., второй компонент обладает хорошим средством к дисперсионной среде.

### ***Флокуляция***

Следует отметить, что высокомолекулярные вещества, способные адсорбироваться на поверхности частиц дисперсной фазы несколькими участками, могут вызвать дестабилизацию дисперсной системы. Этот процесс называется флокуляцией, а водорастворимые полимеры, очень малые добавки которых могут радикально изменить стабильность дисперсий, называются флокулянтами. Флокулянты используют для расширения оптимальных диапазонов коагуляции (по рН и по температуре), а также для повышения плотности и прочности образующихся хлопьев и снижения расходов коагулянтов, в результате чего повышается надежность работы и пропускная способность очистных сооружений.

Высокомолекулярные флокулянты (ВМФ) обычно подразделяют на три группы: неорганические вещества (например, активная кремнекислота), вещества природного происхождения (крахмал и его производные, агар-агар, протеины, декстрин, производные целлюлозы), синтетические органические полимеры (полиэтиленоксид, полиэтиленимин, полиакриламид и т. д.).

В зависимости от типа полярных групп, входящих в их состав, флокулянты классифицируются на следующие:

- неионогенные — полимеры, содержащие неионогенные группы  $-\text{OH}$ ,  $=\text{CO}$  (крахмал, поливиниловый спирт, полиакрилонитрил и др.);

- анионные — полимеры, содержащие анионные группы  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{OSO}_3\text{H}$  (активная кремневая кислота, полиактилат натрия, альгинат натрия, лигносульфонаты и др.);

- катионные — полимеры, содержащие катионные группы  $-\text{NH}_2$ ,  $=\text{NH}$  (полиэтиленимин, сополимеры винилпиридина и др.);

- амфотерные — полимеры, содержащие одновременно анионные и катионные группы: полиакриламид  $(-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CONH}_2)_n$ , белки и др.

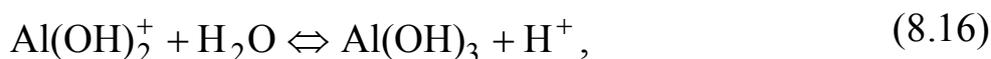
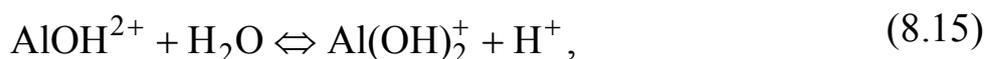
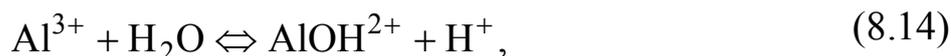
В зависимости от количества добавленного вещества и условий его внесения один и тот же полимер может вызвать как уменьшение (обычно при низких концентрациях полимера,  $C_{\text{п}}$ ), так и увеличение (при высоких концентрациях полимера) стабильности дисперсий.

Эффективность флокуляции характеризуется глубиной минимума на кривых «устойчивость — концентрация полимера» (она свидетельствует о степени осветления дисперсии за данный промежуток времени), минимальной концентрацией ВМФ ( $C_{\text{min}}$ ), вызывающей максимальную флокуляцию и протяженностью области дестабилизации (чем больше интервал  $C_{\text{п}}$ , в котором происходит интенсивная флокуляцию, тем легче управлять этим процессом и тем меньше опасность ухудшения агрегации частиц при незначительном отклонении от оптимальной дозы реагента).

Флокулирующее действие ВМФ зависит от ряда факторов: природы и количества добавляемого полимера, его молекулярной массы и заряда, условий введения реагента, содержания в системе дисперсной фазы и электролитов и др.

## Теория коагуляционной очистки воды с применением трехзарядных электролитов

При очистке природных и сточных вод в качестве коагулянтов чаще всего используют трехзарядные электролиты (соли алюминия, железа). Простейшие уравнения гидролиза трехзарядных катионов алюминия записываются как:



Видно, что на каждой стадии продуктом гидролиза является катион водорода. Следовательно, если в растворах накапливается большое количество катионов водорода, то реакции сдвигаются влево.

В действительности, запись процесса гидролиза выглядит намного сложнее. При приготовлении рабочих растворов коагулянта в разбавленных водных растворах при  $\text{pH} < 3$  ион алюминия существует в виде аквагидроксикомплекса  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$  октаэдрической структуры. Каждая из шести молекул воды первой координационной сферы связана водородными связями с двумя молекулами воды второй сферы. Обмен молекул воды, координированных ионами алюминия, протекает по диссоциативному механизму. При повышении значений  $\text{pH}$  раствора более 3 (3,8 – 4,9) и концентрации ионов алюминия не более  $10^{-3}$  г-ион/дм<sup>3</sup> образуются мономерные аквагидроксикомплексы по схеме (рис. 8.6):

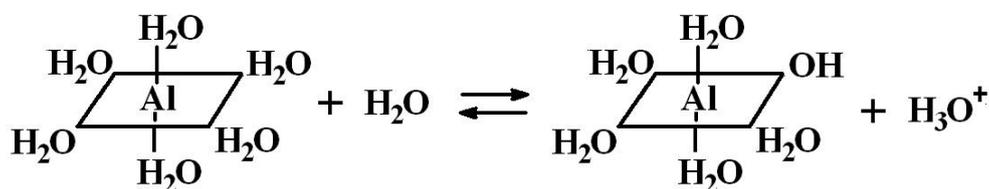


Рис. 8.6. Первая стадия гидролиза иона алюминия

При этом можно предположить, что диссоциативное взаимодействие происходит между протоном одной из шести молекул первой (внутренней) координационной сферы аквагидроксикомплекса алю-

миния с молекулой воды второй сферы с одновременным отщеплением и второй молекулы воды наружной сферы. Отщепление протона обуславливает кислую реакцию водных растворов солей алюминия.

При увеличении концентрации ионов алюминия в растворе, и особенно соотношения концентраций  $\text{OH}^-$  и  $\text{Al}^{3+}$ , происходит гидролитическая полимеризация с образованием димеров по схеме:

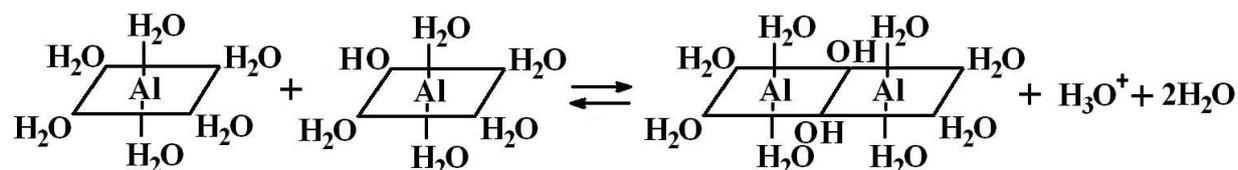


Рис. 8.7. Гидролитическая полимеризация с образованием димеров

Димеризация в определенных условиях может также происходить путем полимеризации мономеров. Структура димеров  $[\text{Al}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2]^{4+}$  состоит из двух октаэдров, соединенных по ребру. При этом можно предположить равную вероятность полимеризации по одному из 12 ребер октаэдра. Во всех случаях образуются два октаэдра, сочлененных по ребру посредством гидроксид-ионов. Связь между двумя атомами алюминия осуществляется диоловой группой (двумя ол-группами — см. рис.8.8):

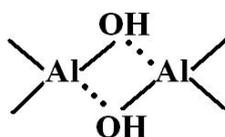


Рис. 8.8 Диоловая группа

С ростом pH дальнейшая полимеризация может приводить к образованию тетрамеров  $[\text{Al}_4(\text{H}_2\text{O})_{12}(\text{OH})_6]^{6+}$ . В результате гидролитической поликонденсации димеров и тетрамеров, по-видимому, происходит образование структур шестиядерных аквагидроксикомплексов  $[\text{Al}_6(\text{H}_2\text{O})_{12}(\text{OH})_6]^{6+}$  (рис. 8.9), структура которых подобна минералу гидраргиллиту:

В гидраргиллите каждый атом алюминия окружен шестью группами  $\text{OH}^-$ , которые образуют его внутреннюю сферу и располагаются по вершинам октаэдра. Гидраргиллит имеет слоистую структуру

(см. рис. 8.10). Каждый слой построен из октаэдров, сочлененных между собой ребрами так, что образуются шестичленные кольца.

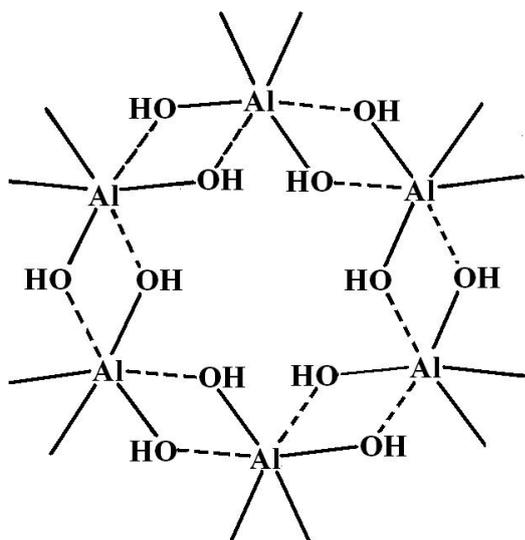


Рис. 8.9. Шестиядерный аквагидрохсокомплекс алюминия

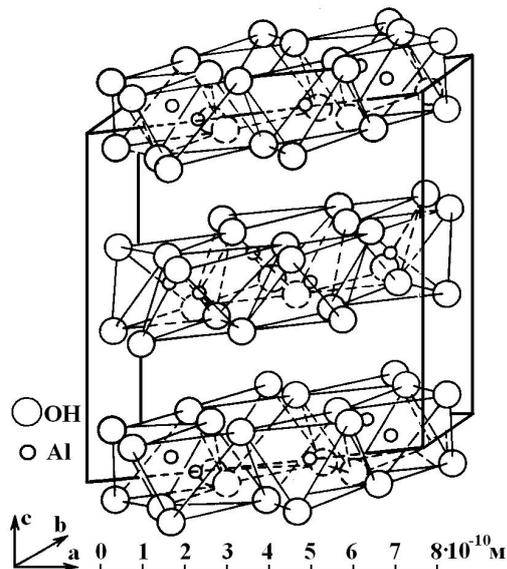


Рис. 8.10. Структура гидраргиллита

При  $\text{pH} > 5$  происходит взаимодействие шестиядерных аквагидрохсокомплексов по ребрам октаэдров. При этом образуется трехслойный аквагидрохсокомплекс  $[\text{Al}_{18}(\text{H}_2\text{O})_{12}(\text{OH})_{48}]^{6+}$ . Как показали расчеты, этот полиядерный комплекс вместе с гидратной оболочкой имеет размер примерно 1,8 – 2,4 нм и представляет собой мицеллу.

При достаточно большой концентрации  $\text{OH}^-$  сульфат алюминия гидролизуется непосредственно до  $\text{Al}(\text{OH})_3$  со структурой гидраргиллита. При этом в неравновесном растворе, каким является очищаемая вода, неизбежно будут присутствовать мономеры и димеры алюминия, которые образуются еще на стадии приготовления рабочих растворов. Эти аквагидрохсокомплексы хемосорбируются на поверхности частиц гидроксида алюминия, сообщая последним соответствующий заряд. Поэтому в дисперсной системе могут присутствовать частицы, характеризующиеся различными дисперсностью и величиной заряда. В результате протекания реакции гидролиза на поверхности происходит нейтрализация заряда, что способствует коагуляции частиц.

Находясь в броуновском движении, частицы подходят на близкие расстояния и коагулируют, и благодаря последующему гидролитическому взаимодействию сочленяются посредством водородной связи, образуя шарообразные агрегаты размером порядка 20 нм. На поверхности частиц находятся положительно заряженные аквагидрокомплексы алюминия, образующие активные центры. Их положительный заряд компенсируется противоионами, например,  $\text{SO}_4^{2-}$ . Стабилизации дисперсной системы также способствуют гидратные оболочки вокруг частиц.

В процессе водоочистки образовавшиеся мицеллы и более крупные агрегаты золя, а также менее полимеризованные аквагидрокомплексы, хемосорбируются на поверхности глинистых и других минеральных частиц очищаемой воды. При этом происходит взаимодействие с гидратной оболочкой глинистой частицы с образованием водородных связей и одновременно нейтрализуется заряд. В результате этого частицы покрываются плотным слоем гидроксида алюминия (рис. 8.11).

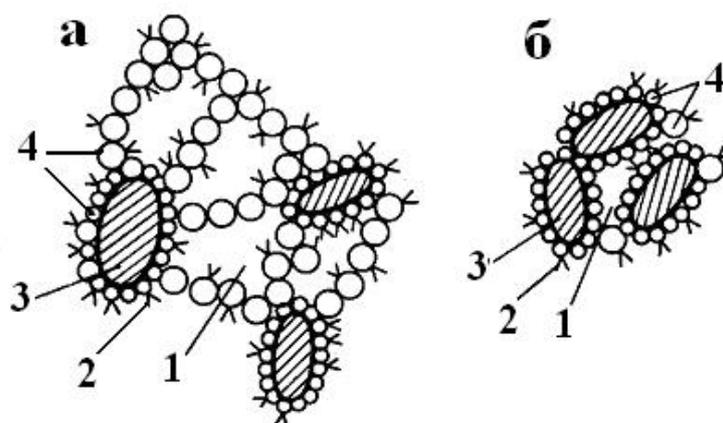


Рис. 8.11. Структура хлопьев при малой (а) и большой (б) концентрации взвеси в очищаемой воде: 1 — захваченная вода; 2 — гуминовые вещества, 3 — глинистые частицы взвеси; 4 — частицы гидроксида алюминия

Взвешенные примеси (замутнители) играют роль поверхности, провоцирующей первые этапы адсорбционно-коагуляционного взаи-

модействия и способствуют образованию плотных агрегированных структур (рис. 8.11, б).

Образующиеся после гидролиза алюминия (и образования первичных наночастиц) шарообразные агрегаты разной степени дисперсности коагулируют далее в соответствии с разными кинетическими закономерностями. Так, коагуляция более крупных частиц, участвующих в броуновском движении, описывается теорией быстрой коагуляции Смолуховского. Скорость их коагуляции ( $dv/d\tau$ ) равна

$$-\frac{dv}{d\tau} = \frac{2kT\ell}{3\eta r} v^2, \quad (8.17)$$

где  $\ell$  — расстояние между частицами,  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — абсолютная температура,  $v$  — численная концентрация,  $\eta$  — динамическая вязкость дисперсионной среды,  $r$  — радиус частиц.

Из выражения (8.17) следует, что скорость быстрой коагуляции находится в прямой зависимости от температуры, расстояния и особенно численной концентрации частиц, а также в обратной зависимости от динамической вязкости и радиуса частиц.

По мере снижения температуры значительно повышается вязкость среды, уменьшается степень гидролиза коагулянта. Например, при снижении температуры от 30 до 0 градусов вязкость увеличивается в 2,24 раза. Увеличение вязкости снижает интенсивность броуновского движения и, в итоге, скорость коагуляции. Это отмечается в практике очистки воды коагулянтами в зимнее время. Когда температура опускается до 4 градусов, из-за малой кинетической энергии шарообразных агрегатов образуются слабые рыхлые хлопья.

При быстрой коагуляции (по Смолуховскому) время половинной коагуляции  $\tau_{1/2}$  равно

$$\tau_{1/2} = \frac{1}{4\pi D\ell v_0} = \frac{3\eta}{4kTv_0}, \quad (8.18)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии,  $v_0$  — начальная численная концентрация частиц.

Если дисперсионной средой является вода ( $\eta = 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ ), то при  $T = 298 \text{ К}$  время половинной коагуляции, выраженное в секундах, равно:  $\tau_{1/2} \cong \frac{2 \cdot 10^{11}}{v_0}$  (где  $v_0$  выражено в  $\text{см}^3$ ), т. е. зависит только от численной концентрации частиц.

Более крупные шарообразные частицы золя гидроксида алюминия коагулируют медленнее мелких с образованием цепочечных рыхлых структур.

В соответствии с автокаталитической теорией Мюллера для полидисперсных систем частицы различной величины агрегируют быстрее, чем частицы одинаковых размеров. Если частицы различаются по размерам в 10 раз, то происходит ускорение коагуляции примерно в 3 раза; а если соотношение размеров частиц составляет 30 – 40, то скорость коагуляции возрастает примерно в 8 – 10 раз. При очистке воды сульфатом алюминия размер мицелл и первичных частиц золя гидроксида алюминия находятся в пределах 2 – 50 нм, тогда как глинистые частицы имеют размер 50 – 100 нм. Поэтому происходит очень быстрый (быстрее, чем по Смолуховскому) процесс гетерокоагуляции мелких частиц гидроксида алюминия и «крупных» глинистых частиц, при котором мелкие частицы как бы облепляют крупные (см. рис. 8.11). Теория Мюллера показывает, что изменение числа мелких частиц идет быстрее, чем крупных. Введение в дисперсную систему крупных частиц приводит к исчезновению мелких, и тем скорее, чем больше разница в их размерах.

Коагуляция первичных частиц удлиненной формы также ускоряется, поскольку они подвержены одновременно поступательному и вращательному броуновскому движению, что увеличивает вероятность столкновения анизометрических частиц.

Когда размеры агрегатов усредняются, коагуляция «по Мюллеру» переходит в коагуляцию «по Смолуховскому». Глинистые частицы, покрытые «шубой» более мелких шарообразных частиц гидроксида алюминия, соединяются между собой посредством цепочечных

структур гидроксида алюминия, образуя мостики (см. рис. 5). Образование мостиков происходит при малом содержании глинистых частиц. При повышенном содержании глинистых частиц, покрытые «гидроксидной шубой», они соединяются друг с другом, образуя более плотные хлопья. В случае более крупных глинистых частиц требуется меньший расход коагулянтов.

Коагуляция цепочек гидроксида алюминия и глинистых частиц, покрытых «гидроксидной шубой», или последних друг с другом осуществляется в результате движения частиц с различными скоростями оседания в гравитационном поле (гравитационная коагуляция) или в результате интенсивного перемешивания (градиентная коагуляция). Гравитационная коагуляция осуществляется в результате инерционных явлений, осаждения захватом и подтягивания частиц. Инерционные силы действуют при прямом столкновении относительно крупных (свыше 0,1 мкм) частиц разных размеров. Чаще всего мелкие частицы осаждаются захватом и подтягиванием при движении по искривленным траекториям.

Градиентная коагуляция наблюдается в поли- и монодисперсных системах при размерах частиц более 2 – 3 мкм. При перемешивании отдельные объемы воды движутся неравномерно, это приводит к столкновению и коагуляции частиц на границе микро- и макропотоков. Скорость градиентной коагуляции возрастает при увеличении интенсивности перемешивания. В отдельных участках образовавшихся хлопьев возникают напряжения, что приводит к их разрушению. Хлопья оптимального размера образуются при одинаковых скоростях их образования и разрушения (30 – 60 с<sup>-1</sup>) и оптимальной продолжительности перемешивания, которая определяется выражением

$$G \cdot \tau = 10^4 \dots 10^5, \quad (8.19)$$

где  $G$  — средний градиент скорости, с<sup>-1</sup>,  $\tau$  — время перемешивания, с.

Средний градиент скорости определяется из выражения

$$G = \sqrt{\frac{E}{\eta V \tau}}, \quad (8.20)$$

где  $E$  — энергия, затрачиваемая на перемешивание, Дж,  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости, Па·с,  $V$  — перемешиваемый объем жидкости, м<sup>3</sup>,  $\tau$  — время перемешивания.

В процессе построения шарообразных агрегатов и цепочечных структур, сочлененных в кольца, образуются поры, заполненные водой. В результате образуются крупные хлопья с плотностью, близкой к плотности воды. Частицы с такой плотностью оседают в гравитационном поле очень медленно, поскольку скорость оседания пропорциональна разности плотностей частицы и дисперсионной среды (см. подразд. 3.1). Оседание в отстойниках происходит только благодаря очень большим размерам образующихся хлопьев, достигающим долей — единиц миллиметров. Поэтому в процессах водоподготовки чаще используют после стадии коагуляции не отстойники, а медленные фильтры.

Таким образом, весь процесс осветления воды, основанный на коагуляции, можно разделить на несколько стадий:

- 1) гидролиз коагулянта после его введения в очищаемую воду;
- 2) образование мицелл (на основе гидроксида металла) размером 2 – 2,5 нм;
- 3) агрегирование мицелл в шарообразные частицы размером около 0,01 – 0,1 мкм с одновременной адсорбцией органических примесей, а также гетерокоагуляцией мелких частиц с крупными глинистыми образованиями;
- 4) построение цепочечных структур из более крупных шарообразных частиц;
- 5) образование хлопьев, включающих цепочечные структуры из крупных шарообразных частиц и агрегатов глинистых частиц с мелкими частицами;
- 6) рост хлопьев до размеров, определяющих их седиментацию;
- 7) седиментация крупных хлопьев в гравитационном поле.

### **8.1.2. Технологические основы очистки природных и сточных вод путем коагуляции и флокуляции**

С позиций технологии очистки природных и сточных вод важно учитывать особенности молекулярно-кинетической, градиентной и гравитационной стадий, две последние усложняются процессами флокуляции и сорбции.

Молекулярно-кинетическая стадия коагуляции практически совпадает с периодом распределения раствора коагулянта в объеме смесителя (в технологиях водоподготовки смешение коагулянта с водой происходит в трубах).

Стадия градиентной коагуляции происходит в процессе перемешивания (более медленного и более продолжительного), который осуществляется в камерах хлопьеобразования. Особенностью стадии является столкновение дисперсных частиц при взаимодействии вихревых потоков, возникающих в перемешиваемом объеме воды. Результат этой стадии существенно зависит от условий перемешивания, которые характеризуют средним градиентом скорости (см. выражение (8.20)). С увеличением интенсивности смешения сначала размеры хлопьев увеличиваются (за счет ускорения коагуляции), затем происходит разрушение рыхлых и образование более компактных агрегатов.

Гравитационная стадия коагуляции осуществляется при отделении формирующихся хлопьев путем осаждения в гравитационном поле (разд. 3) или флотации (подразд. 8.4).

Стадия адсорбции загрязнений (в первую очередь, органических) на свежееобразовавшейся (следовательно, обладающей большой поверхностной энергией) поверхности описывается закономерностями статической адсорбции.

Для интенсификации процессов отделения скоагулированных загрязнений применяют флокулянты (см. пункт 8.1.1). Эффективность любого флокулянта может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\eta = \frac{(W_{\text{фл}} - W)}{W \cdot q}, \quad (8.21)$$

где  $W_{\text{фл}}$  — скорость оседания флокулированных загрязнений, мм/с;  $W$  — скорость оседания нефлокулированных загрязнений, мм/с,  $q$  — расход флокулянта, г, на тонну твердого вещества.

На долю растворенных органических примесей городских сточных вод приходится примерно 20 %. Из растворенных органических соединений 62 – 66 % относится к кислотной группе, 28,4 – 34,0 % — к нейтральной, 8,2 – 9,6 % — к основной.

В процессе очистки городских сточных вод путем коагуляции солями алюминия и железа за счет адсорбции на свежесформированной поверхности частиц гидроксида алюминия и последующего осаждения образовавшихся хлопьев в гравитационном поле удаляется примерно 30 – 40 % растворенных органических соединений. При этом соединения, относящиеся к основной группе, удаляются на 68 – 70 %, к нейтральной — на 58 – 62 %, к кислотной — на 10 – 23 %.

Соединения фосфора, находящиеся в растворенном состоянии, в процессе коагулирования образуют слаборастворимые фосфаты алюминия, железа или кальция и выпадают в осадок. Сложные и нерастворимые формы фосфора удаляются путем адсорбции на хлопьях гидроксидов.

Удаление тяжелых металлов происходит в результате сорбции и осаждения их гидроксидов, полнота которого зависит от pH сточной воды и свойств самого металла.

Таким образом, в процессе коагулирования и последующего отделения образовавшихся осадков из сточных вод могут быть достаточно полно удалены не только взвешенные вещества (называемые выше глинистыми), но и органические коллоидно- и молекулярно растворенные загрязнения, соединения фосфора, соли тяжелых металлов и т. д. Метод неэффективен в отношении аммонийного азота.

Для эффективного проведения процесса коагуляции необходимо обеспечить наиболее благоприятные условия протекания гидролиза

коагулянтов и образования прочных хлопьев достаточного размера для их быстрого осаждения или хорошей флотуемости. Смешение коагулянта с водой должно происходить так, чтобы сразу образовалось большое количество мелких агрегатов, которые впоследствии станут центрами кристаллизации гидроксидов, способствующими формированию крупных хлопьев.

Используют различные технологические схемы, обеспечивающие наилучшие результаты очистки сточных вод в конкретных условиях (см. рис. 8.12).

В схеме (а) раствор коагулянта подают в начало смесителя. Данный вариант предполагает оперативное управление процессом, учитывающее изменение состава и расхода поступающей воды.

В схеме (б) часть ранее скоагулированных и отделенных примесей возвращают в смеситель. Рециркуляция способствует ускорению процесса и образованию более плотных хлопьев. Различают рециркуляцию по внутреннему и наружному контуру. При рециркуляции по внутреннему контуру образовавшиеся хлопья возвращают в место подачи коагулянта без их вывода из рециркуляционной емкости. При рециркуляции по наружному контуру шлам отводят из камер хлопьеобразования, осветлителей, отстойников, фильтров или флотаторов и возвращают в смеситель.

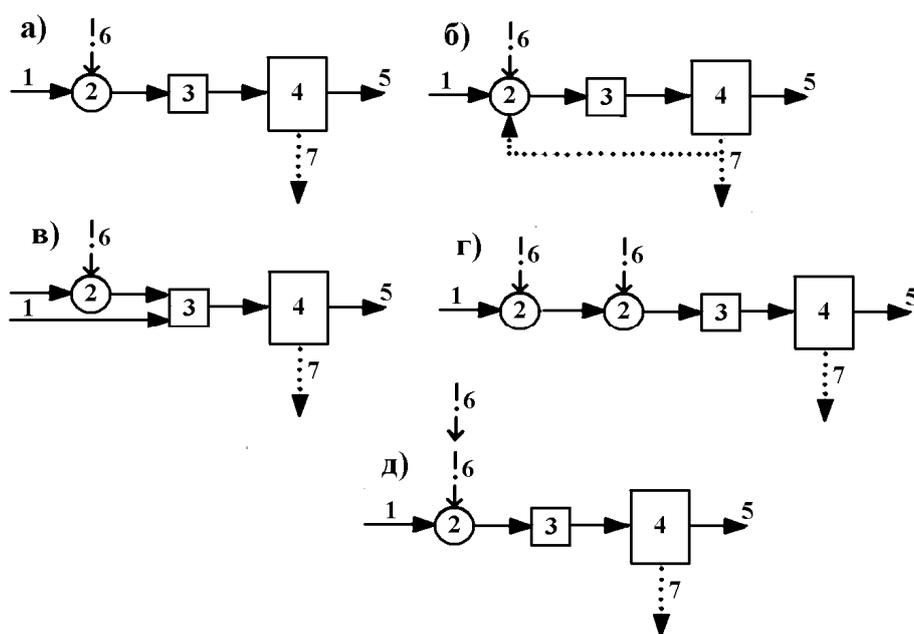


Рис. 8.12. Технологические схемы метода коагулирования:

а — непрерывное, б — непрерывное с возвратом части осадка, в — раздельное, г — дробное, д — прерывистое: 1 — подача сточных вод, 2 — смеситель, 3 — камера флокуляции, 4 — разделительное сооружение, 5 — отведение очищенной воды, 6 — подача коагулянта, 7 — отвод осадка

В схеме (в) реагент вводят в относительно небольшой объем очищаемой воды, а затем его быстро смешивают с остальной частью воды. Это интенсифицирует и стабилизирует процесс коагуляции вследствие более быстрого начала формирования хлопьев при повышенной концентрации коагулянта в небольшом объеме сточных вод. В результате такой обработки образуются крупные и плотные хлопья, что повышает степень осветления воды.

В схеме (г) реагенты добавляют к очищаемой воде порциями или последовательно вводят различные коагулянты. При таком дробном коагулировании получают полидисперсные агрегаты коагулянта, а также увеличивается период существования положительно заряженных полиядерных гидроксокомплексов, что приводит к интенсификации процесса.

В схеме (д) совмещено раздельное и дробное коагулирование. Периоды подачи увеличенных доз коагулянта чередуются с периодами полного прекращения коагулирования. В результате наблюдаются колебания рН, что в ряде случаев благоприятно влияет на зарождение центров коагуляции в сточных водах со сложной структурой загрязнений.

При коагуляционной очистке сточных вод вид реагента и его доза зависят от характера загрязнений сточных вод, необходимой степени их удаления, местных условий и т. п. Для сточных вод некоторых отраслей промышленности и городских сточных вод дозы реагентов — коагулянтов (солей алюминия или железа), извести и флокулянтов (водорастворимых органических полимеров неионогенного,

анионного и катионного типов), приведены в СНиП 2.04.03-85 (см. табл. 8.1).

Таблица 8.1

**Дозы реагентов при коагуляционной очистке сточных вод**

Сточные воды	Загрязняющие вещества	Концентрация примесей мг/л	Реагенты	Доза реагента, мг/л				
				из-веси	солей алюминия	солей железа	флокулянта по активному полимеру	
							анионного	катионного
Нефтеперерабатывающих заводов, нефтеперевалочных баз	Нефтепродукты	До 100	Соли алюминия совместно	-	50 – 75	-	0,5	2,5 – 5
		100 – 200	с анионным флокулянтом	-	75 – 100	-	1,0	5 – 10
		200 – 300	или без него, катионные флокулянты	-	100 – 150	-	1,5	10 – 15

Таблица 8.1 (продолжение)

Сточные воды	Загрязняющие вещества	Концентрация примесей мг/л	Реагенты	Доза реагента, мг/л				
				из-веси	солей алюминия	солей железа	флокулянта по активному полимеру	
							анионного	катионного
Нефтеперерабатывающих заводов, нефтеперевалочных баз	Нефтепродукты	До 100	Соли алюминия совместно	-	50 – 75	-	0,5	2,5 – 5
		100 – 200	с анионным флокулянтом	-	75 – 100	-	1,0	5 – 10
		200 – 300	или без него, катионные флокулянты	-	100 – 150	-	1,5	10 – 15
Машиностроительных, коксохимических заводов	Масла	До 600	Соли алюминия или железа совместно с анионным флокулянтом или без него,	-	50 – 300	50 – 300	0,5 – 2	5 – 20

Сточные воды	Загрязняющие вещества	Концентрация примесей мг/л	Реагенты	Доза реагента, мг/л				
				из-вес ти	со-лей алю-ми-ния	со-лей же-леза	флокулянта по активному поли-меру	
							анион-ного	катионно-го
			катионные флокулянты					
Пищевой пром-сти, шерсто-мойных фабрик, за-водов ме-таллообр., синтетиче-ских воло-кон	Эмульсии масел и жи-ров	100	Соли алюми-ния или желе-за совместно с анионным флокулянтом или без него	-	150	150	-	-
		300		-	300	300	0,5 – 3	-
		500		-	500	500	0,5 – 3	-
		1000		-	700	700	0,5 – 3	-
Целлюлоз-но-бумажной промыш-ленности	Цветность (сульфан. лигнин), град ПКШ	950	То же	-	250	250	-	-
		1450		-	275	275	-	-
		2250		-	400–500	400–500	-	-
	Цветность (лигносуль-фат), град ПКШ	1000	Известь СаО	1000	-	-	-	-
		2000		2500	-	-	-	-

Таблица 8.1 (окончание)

Сточные воды	Загрязняющие вещества	Концентрация примесей мг/л	Реагенты	Доза реагента, мг/л				
				из-вес ти	со-лей алю-ми-ния	со-лей же-леза	флокулянта по активному поли-меру	
							анион-ного	катионно-го
Шламовые воды угле-обогати-тельных фабрик, шахтные	Суспензия угольных частиц	До 100	Анионный флокулянт	-	-	-	2 – 5	-
		100 – 500		-	-	-	5 – 10	-
		500 – 1000		-	-	-	10 – 15	-
		1000 –		-	-	-	15 –	-
				-	-	-		

Сточные воды	Загрязняющие вещества	Концентрация примесей мг/л	Реагенты	Доза реагента, мг/л				
				из-веси	солей алюминия	солей железа	флокулянта по активному полимеру	
							анионного	катионного
воды		2000					25	
Бумажных и картонных фабрик	Суспензия целлюлозы	До 1000	Соли алюминия совместно с анионным флокулянтом	-	50 – 300	-	0,5 – 2	-
			Катионный флокулянт	-	-	-	-	2,5 – 20
Городские и бытовые	БПК <sub>полн</sub>	До 300	Соли алюминия совместно с анионным флокулянтом	-	30 – 40*	-	0,5 – 1,0	-
			или без него	-	40 – 50*	-	-	-
	Взвешенные вещества	До 350	Соли железа совместно с анионным флокулянтом	-	-	40 – 50**	0,5 – 1,0	-
			или без него	-	-	100 – 150***	0,5 – 1,0	-
			Катионный флокулянт	-	-	50 – 70***	-	10 – 20

Примечание. Дозы реагентов приведены по товарному продукту, флокулянтов — по активному полимеру, за исключением: \* — по  $Al_2O_3$ , \*\* — по  $FeSO_4$ , \*\*\* — по  $FeCl_3$ .

Как видно из данных табл. 8.1, доза флокулянта, как минимум, в 10 раз меньше дозы коагулянта. Это соотношение достигает 100 и более раз.

Для организации коагуляционной очистки сточных вод используют следующие сооружения.

Коагулянты смешивают с обрабатываемой сточной водой в смесителях. Применяют перегородчатые, дырчатые, шайбовые и вертикальные смесители, а также механические в пропеллерными или лопастными мешалками.

Процесс хлопьеобразования осуществляют в сооружениях смешения при среднем градиенте скорости  $G = 50 - 60 \text{ с}^{-1}$ . По виду движения потока воды камеры хлопьеобразования могут быть водоворотными, перегородчатыми, вихревыми, а также с механическим перемешиванием.

Перегородчатые камеры могут быть горизонтальными или вертикальными. В горизонтальной камере сточная вода протекает по нескольким последовательно соединенным коридорам. Перемешивание осуществляется за счет 8 – 10 поворотов.

Водоворотная камера хлопьеобразования представляет собой цилиндр, в верхнюю часть которого из смесителя вводится сточная вода через диаметрально расположенные сопла с противоположным направлением выхода струи. При скорости выпуска воды из сопел 2 – 3 м/с в камере поддерживается вращательное движение. В нижней части камеры перед входом в отстойник находятся гасители вращательного движения воды.

Вихревая камера хлопьеобразования представляет собой конический или цилиндрический расширяющийся кверху резервуар с нижним впуском сточной воды. Угол наклона стенок камеры к горизонту составляет примерно  $70^\circ$ .

В камерах хлопьеобразования, оборудованных лопастными мешалками, продолжительность пребывания воды равна 20 – 30 мин, скорость движения 0,15 – 0,2 м/с.

Последующее осветление сточной воды производят в горизонтальных, радиальных и вертикальных отстойниках, осветлителях со взвешенным слоем осадка или флотаторах. Для очистки городских сточных вод наиболее целесообразной является двухступенчатая схема. На первой ступени осуществляется простое отстаивание в отстой-

нике без коагулянта, на второй ступени — обработка сточных вод коагулянтами и флокулянтами с последующим отстаиванием в отстойнике.

## 8.2. АДСОРБЦИЯ

### 8.1.2. Теоретические представления, лежащие в основе адсорбционной очистки сточных вод

Понятие адсорбции является частным случаем более общего понятия — сорбция (от лат. *sorbeo*, что означает «поглощаю»). В отличие от термина «абсорбция» (поглощение объемом) термин «адсорбция» означает «поглощение поверхностью». Часто используют упрощенное определение: *адсорбция — это концентрирование вещества на границе раздела фаз*. Поскольку адсорбция может быть не только положительной, но и отрицательной, то более общим является следующее определение: *адсорбция — изменение концентрации компонента в поверхностном слое, по сравнению с объемной фазой, отнесенное к единице площади поверхности*.

Адсорбцию принято выражать в  $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2}$ , вместе с тем, на практике широко используют размерности  $\text{моль}/\text{г}_{\text{адсорбента}}$ ,  $\text{мг}_{\text{адсорбата}}/\text{г}_{\text{адсорбента}}$ ,  $\text{мг}_{\text{адсорбата}}/\text{м}^2_{\text{адсорбента}}$ . *Адсорбатом* называют компонент, который адсорбируется, *адсорбентом* — фазу, на поверхности которой происходит адсорбция.

С термодинамической точки зрения *адсорбция — это самопроизвольный процесс выравнивания химических потенциалов веществ в объеме и межфазном (поверхностном) слое системы*. Этот процесс происходит вследствие стремления к минимуму поверхностной энергии или энергии Гиббса всей системы.

Адсорбцию на границе твердое тело – жидкость широко применяют в процессах очистки природных и сточных вод. Причем адсорбцию осуществляют с применением как природных, так и искусственно созданных адсорбентов, число которых неуклонно растет. Адсорб-

ции подвергают минеральные и органические компоненты, находящиеся в молекулярно- или коллоидно-растворенном состоянии, а также в ионном виде.

Адсорбцию на границе твердое тело – жидкость можно разделить на два самостоятельных раздела: а) адсорбцию чистых жидкостей; б) адсорбцию из растворов. В свою очередь, адсорбцию из растворов можно подразделить на адсорбцию: а) нейтральных молекул (неэлектролитов), б) ионов (электролитов), в) коллоидных частиц.

Различают адсорбцию физическую и химическую. Химическая адсорбция — это, по сути, химическая реакция между компонентами, находящимися в разных фазах.

Адсорбция молекул из растворов является намного более сложным процессом, чем адсорбция газов. Во-первых, в растворе присутствуют, по крайней мере, два компонента — растворитель и растворенное вещество. Они конкурируют за свободные места на поверхности адсорбента. Во-вторых, при адсорбции газов часто можно пренебречь взаимодействием между молекулами (атомами) адсорбата. Для растворов (молекулярных и коллоидных), напротив, необходимо учитывать взаимодействия в жидкой фазе и в адсорбционном слое — между молекулами растворителя, молекулами (коллоидами) растворенного вещества, сольватацию-десольватацию.

При адсорбции из растворов принято определять величину адсорбции  $i$ -го компонента ( $x_i$ ) через молярные объемные концентрации до адсорбции ( $C_i^0$ ) и после адсорбции ( $C_i^{\text{равн}}$ )

$$x_i = \frac{(C_i^0 - C_i^{\text{равн}}) \cdot V_{\text{общ}}}{m}, \quad (8.22)$$

где  $m$  — масса адсорбента;  $V_{\text{общ}}$  — общий объем раствора.

Если концентрацию растворенных компонентов выразить в виде мольной доли, то изотермы адсорбции из растворов могут быть представлены в виде основных пяти типов, изображенных на рис. 8.13. При мольных долях  $N_i = 0$  и  $N_i = 1$ , что соответствует однокомпонентной системе, избыток  $x_i$  в молях на единицу массы адсорбента

равен нулю (объемными изменениями пренебрегают). Таким образом, изотерма адсорбции должна проходить через экстремум.

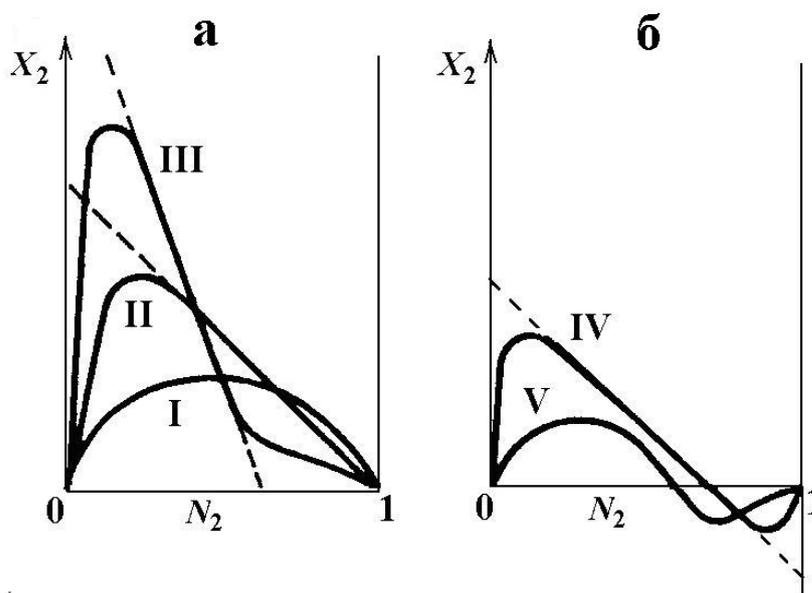


Рис. 8.13. Изотермы молекулярной адсорбции из растворов на твердом адсорбенте (по Шаю)

Индекс 2 присвоен растворенному веществу

Кривые I – III характеризуют положительную адсорбцию растворенного вещества ( $x_2 > 0$ ). Изотерма типа II характерна для поверхностно-активных веществ (ПАВ). На кривых IV и V происходит смена знака  $x_2$ . Состав в точке пересечения кривой с абсциссой ( $x_2 = 0$ ) носит название адсорбционного азеотропа (составы объемной фазы и поверхностного слоя равны).

Для начальных участков приведенных изотерм допустимо использовать уравнение изотермы адсорбции Ленгмюра, которые можно представить через степень заполнения поверхности адсорбционными комплексами ( $\theta$ ), через величину адсорбции, относящуюся к единице поверхности ( $\alpha_s$ ) и величину адсорбции, относящуюся к единице массы адсорбента ( $A_g$ )

$$\theta = \frac{K C_p}{1 + K C_p}; \quad \alpha_s = \frac{\alpha_{s,m} \cdot K' C_p}{1 + K' C_p}; \quad A_g = \frac{A_{g,m} \cdot K'' C_p}{1 + K'' C_p}, \quad (8.23)$$

где  $C_p$  — равновесная концентрация,  $K, K', K''$  — константы адсорбционного равновесия,  $\alpha_{s,m}$  и  $A_{g,m}$  — величины адсорбции при плотном заполнении монослоя.

При низких равновесных концентрациях, когда значение второго члена в знаменателях уравнений (8.23) намного меньше единицы, изотерма Ленгмюра переходит в изотерму Генри

$$\theta = KC_p; \quad \alpha_s = \alpha_{s,m} \cdot K' C_p; \quad A_g = A_{g,m} \cdot K'' C_p, \quad (8.24)$$

Для восходящей ветви кривых наиболее распространенного типа I часто применяют эмпирические формулы, например, уравнение Фрейндлиха

$$x = b \cdot C^{1/n}, \quad (8.25)$$

где  $b$  и  $n > 1$  — константы.

Для процесса адсорбции из растворов на поверхности твердого тела характерны два практически важных правила: применимость (и обращение) правила Траубе и правило уравнивания полярностей Ребиндера.

Правило Траубе гласит: *адсорбционная способность возрастает в гомологическом ряду в 3 – 3,5 раза при увеличении длины цепи на одно звено*. Проследить это увеличение можно по константам адсорбционного равновесия, которые отражают крутизну начального участка изотерм адсорбции. Правило Траубе применимо не только для членов гомологического ряда, но и для однотипных органических (биоорганических) соединений.

В том случае, когда поры адсорбента соизмеримы с молекулами адсорбата, наблюдается обращение правила Траубе — величина адсорбции уменьшается с ростом длины молекулы адсорбата. Затруднение диффузии молекул в поры адсорбента приводит к тому, что внутренняя поверхность пор используется в меньшей степени (при одинаковом времени адсорбции). Следовательно, величина адсорбции, отнесенная к величине удельной поверхности, которая определяется, в основном, внутрипоровой площадью, падает. Начиная с некоторого

соотношения между размером молекул и пор, что зависит также от формы обеих и распределения пор и молекул по размерам, молекулы неспособны диффундировать в поры даже при больших временах адсорбции.

Правило уравнивания полярностей Ребиндера определяется полярностью фаз и формулируется следующим образом: *процесс адсорбции идет в сторону выравнивания полярностей фаз и тем сильнее, чем больше первоначальная разность полярностей.*

На рис. 8.14 приведена схема, поясняющая это правило. Предположим, необходимо сделать выбор между гидрофобным адсорбентом (активированный уголь) и гидрофильным (силикагель —  $\text{SiO}_2$ ) при адсорбции поверхностно активного вещества ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$  — бензойная кислота) из водной ( $\text{H}_2\text{O}$ ) или органической ( $\text{C}_6\text{H}_6$  — бензол) среды. Резкое различие полярностей наблюдается между активированным углем и водой, либо бензолом и силикагелем. Взаимодействие между названными парами фаз будет незначительным, что создает благоприятные условия для адсорбции растворенного вещества (ПАВ), а не растворителя. Свободная энергия пропорциональна разности полярностей на границе раздела фаз, и чем она больше, тем больше возможность ее снижения за счет адсорбции растворенного вещества, обладающего промежуточной полярностью. Снижение разности полярностей (следовательно, снижение поверхностного натяжения) определяет ориентацию молекул растворенного вещества (ПАВ) в поверхностном слое. Как показано на рис. 8.14, а, молекула ПАВ ориентируется гидрофильной «головкой» в сторону воды, а гидрофобным «хвостиком» — в сторону угля. Таким образом, твердая поверхность становится гидрофильной и разность полярностей фаз уменьшается. Как видно из рис. 8.14, б, молекула ПАВ поворачивается гидрофильной «головкой» в сторону гидрофильной поверхности силикагеля, а гидрофобным «хвостиком» — в сторону органического растворителя.

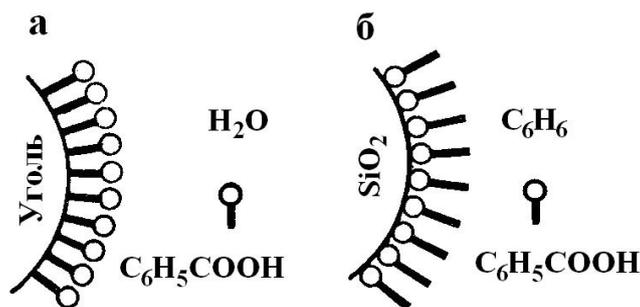


Рис. 8.14 Пояснение к правилу уравнивания полярностей Ребиндера: а) адсорбция ПАВ на неполярном адсорбенте из полярной среды; б) адсорбция ПАВ на полярном адсорбенте из неполярной среды

Следует отметить, что представленный пример поясняет сущность процесса адсорбции из растворов на поверхности твердых тел в монослой. В реальных системах может происходить полислойная адсорбция. Кроме того, адсорбция органических (биоорганических) молекул, например, аминокислот, белков, из водных растворов может происходить на поверхности гидрофильных адсорбентов, а не только гидрофобных. Энергия связи при этом будет меньшей, зато обратимость адсорбции лучшей.

Адсорбционные методы очистки относятся к наиболее эффективным для глубокой очистки сточных вод от растворенных органических соединений. Адсорбционная очистка может применяться самостоятельно или совместно с другими методами предварительной и глубокой очистки сточных вод.

Преимуществом метода является возможность адсорбции веществ из многокомпонентных смесей, а также высокая эффективность при малых концентрациях загрязнений сточных вод.

Адсорбционные методы эффективны для извлечений из сточных вод ценных растворенных веществ с их последующей утилизацией и использованием очищенных сточных вод в системе оборотного водоснабжения.

В процессах водоочистки в качестве адсорбентов применяют природные и синтетические материалы, а также отходы некоторых производств, в том числе, технологий водоочистки (например, из от-

ходов избыточного активного ила при биохимической очистке сточных вод можно производить активированный уголь).

Природные пористые материалы, такие как торф, активные глины и производственные отходы (зола, коксовая мелочь, силикагели, алюмогели) обладают, как правило, невысокой адсорбционной емкостью.

Эффективными адсорбентами являются активированные (активные) угли различных марок, пористость которых составляет 60 – 75 %, а удельная поверхность 400 – 900 м<sup>2</sup>/г. Адсорбционные свойства активированных углей в значительной мере зависят от структуры пор, их величины и распределения по размерам. Поры по размерам делятся на три вида: макропоры размером 0,1 – 2 мкм, мезопоры размером 0,004 – 0,1 мкм и микропоры размером менее 0,004 мкм. При сорбционной очистке сточных вод с помощью активных углей макропоры и мезопоры играют, как правило, роль транспортных каналов, а сорбционная емкость активированных углей определяется в основном микропористой структурой (энергия адсорбции равна произведению поверхностного (межфазного) натяжения и площади поверхности, а удельная поверхность (площадь поверхности, отнесенная к объему или массе) обратно пропорциональна размеру пор). Растворенные органические вещества, имеющие размеры молекул менее 0,001 мкм, заполняют объем микропор сорбента, т. е. процесс адсорбции переходит в процесс абсорбции.

В табл. 8.2 приведены характеристики активированных углей разных марок.

В настоящее время синтезировано достаточно много полимерных пористых материалов, например, для адсорбции из водной среды синтезированы полисорбты (на основе стирола и дивинилбензола). Технологические свойства полисорбтов отличаются от активных углей несколько меньшей энергией связывания с органическими адсорбатами, однако они легче поддаются регенерации растворителями, что является важным при утилизации ценных компонентов.

Таблица 8.2

**Характеристики активированных углей**

Марка угля	Полная емкость, см <sup>3</sup> /г	Емкость микропор, см <sup>3</sup> /г	Основной размер зерен, мм	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
АГ – 2	0,6	0,3	1 – 3,5	600
АГ – 3	0,8 – 1,06	0,37	1,5 – 2,8	450
БАУ	1,5	0,32	1 – 3,5	260
АР – 3	0,7	0,19	1 – 5,5	550
КАД-йодный	1	0,23	1 – 5	380
КАД молотый	0,42	0,12	< 0,04	
СКТ	0,98	0,51	1,5 – 2,0	420

**8.1.2. Технологические основы адсорбционной очистки природных и сточных вод**

Процесс адсорбции можно осуществлять в статическом режиме — при интенсивном перемешивании адсорбента с очищаемой водой, в динамическом режиме: а) при фильтровании через неподвижный слой, б) в псевдооживленном слое. Процесс можно производить на сооружениях периодического или непрерывного действия.

Основные схемы адсорбционного процесса очистки приведены на рис. 8.15. Процесс адсорбции в статических условиях (рис. 8.15, а, б) осуществляют путем интенсивного перемешивания обрабатываемой сточной воды с сорбентом в течение определенного периода времени  $\tau$  и последующего отделения сорбента от воды отстаиванием, фильтрованием и т. п. При последовательном введении новых порций адсорбента в очищаемую воду (рис. 8.15, а) теоретически можно очистить ее от загрязняющих веществ до любой концентрации, однако число ступеней при этом может быть весьма значительным, особенно, если изотерма адсорбции имеет вогнутый вид на начальном участке.

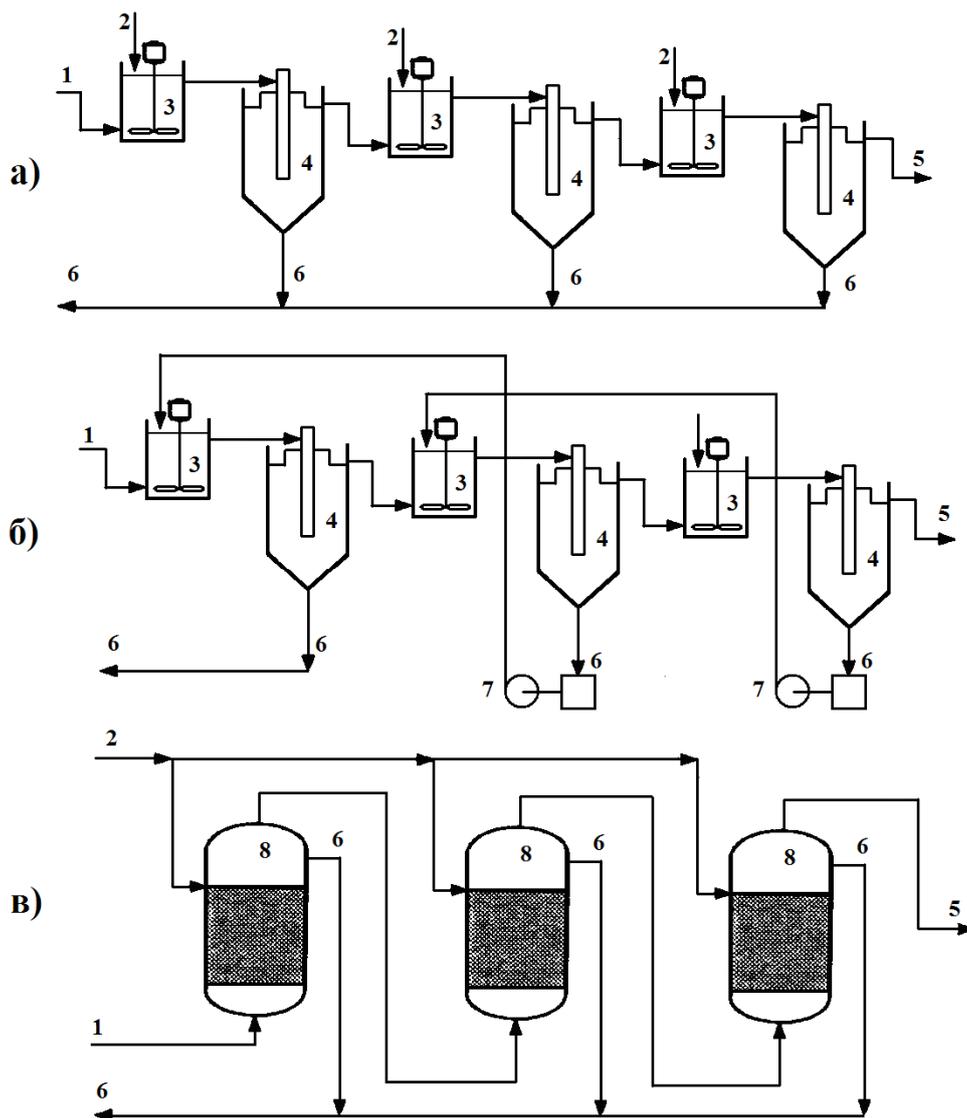


Рис. 8.15. Схемы сооружений для адсорбционной очистки сточных вод: а — сорбционная установка с последовательным введением адсорбента, б — адсорбционная установка с противоточным введением адсорбента, в — адсорбционная установка с неподвижным слоем адсорбента; 1 — подача сточной воды, 2 — подача адсорбента, 3 — резервуары с перемешивающим устройством, 4 — отстойники для отделения отработанного адсорбента от очищаемой воды, 5 — отведение очищенной воды, 6 — выпуск отработанного адсорбента, 7 — система подачи адсорбента на предыдущую ступень, 8 — адсорбционный фильтр

В противоточной схеме (рис. 8.15, б) чистый (свежий или регенерированный) адсорбент вводят только в последнюю ступень. Поскольку его адсорбционная емкость на последней ступени используется мало (сточные воды, доходящие до нее, уже существенно очищены от извлекаемого компонента), то адсорбент можно использовать на предыдущей ступени. Таким образом, он последовательно подается на предыдущие ступени вплоть до первой. Эта схема позволяет вести процесс очистки непрерывно при значительно меньшем расходе адсорбента вследствие более полного использования его адсорбционной емкости. Вследствие более экономичного расходования адсорбента, противоточные схемы применяются значительно шире, чем прямоточные. К недостаткам противоточной схемы относится сложность эксплуатации и большие энергетические затраты.

При адсорбции в динамических условиях (рис. 8.15, в) сточные воды фильтруются через слой плотно упакованного адсорбента. Скорость фильтрования зависит от концентрации растворенных в сточных водах веществ и составляет 1 – 12 м/ч., крупность зерен сорбента — 0,8 – 5 мм.

Обычно фильтрование проводят снизу вверх, при этом происходит более равномерное заполнение всего сечения колонны, а также относительно легко вытесняются пузырьки воздуха или газов, попадающие в слой сорбента вместе со сточной водой.

Обычно сорбционная установка представляет собой несколько параллельно работающих секций, состоящих из 3 – 5 последовательно расположенных фильтров. При насыщении головной фильтр отключают на регенерацию, а обрабатываемую воду подают на следующий фильтр. После регенерации головной фильтр включают в схему очистки уже в качестве последней ступени.

Согласно СНиП 2.04.03-85, при динамической адсорбции в плотном слое содержание взвешенных веществ в сточных водах, поступающих на адсорберы, не должно превышать 5 мг/л. При несоблюдении этого требования резко возрастает сопротивление потоку за

счет того, что взвешенные вещества отлагаются при входе в фильтрующий слой.

При относительно высоком содержании в сточной воде мелкодисперсных частиц, не отделяемых на стадиях механической очистки, целесообразно проводить адсорбцию в псевдооживленном слое сорбента. В соответствии со СНиП 2.04.03-85, допускается подавать на сорбционную очистку сточные воды с концентрацией взвешенных веществ не выше 1 г/л, гидравлическая крупность которых составляет не более 0,3 мм/с.

Псевдооживление наступает при повышении скорости потока сточной воды, проходящей снизу вверх через поперечное сечение сооружения, до величины, равной гидравлической крупности зерен загрузки. При этом важнейшим показателем работы установки является показатель оживления  $\varepsilon$

$$\varepsilon = H_{\text{пж}} / H_{\text{пл}}, \quad (8.26)$$

где  $H_{\text{пж}}$ ,  $H_{\text{пл}}$  — высоты псевдооживленного и плотного слоев сорбента.

Величину показателя оживления  $\varepsilon$  рекомендуется поддерживать равной 1,4 – 1,6.

Сорбенты, используемые для очистки сточных вод, могут быть нерегенерируемыми и регенерируемыми. К технологиям регенерации относятся утилизация (извлеченные вещества используются) и деструкция (извлеченные вещества уничтожаются).

Для извлечения адсорбированных веществ может быть применено экстрагирование органическим растворителем, изменение степени диссоциации слабого электролита в равновесном растворе, отгонка адсорбированного вещества с водяным паром, испарение адсорбированного вещества током инертного газоносителя. В отдельных случаях осуществляют химические превращения сорбированных веществ с последующей десорбцией.

При деструктивной регенерации обычно применяют термические или окислительные методы. При термическом методе потери углеродного материала могут достигать 5 – 10 %.

В структуре затрат на адсорбционную очистку стоимость сорбентов составляет 30 – 35 %.

При адсорбционной очистке с использованием неподвижного плотного слоя адсорбента сооружение (адсорбер) выполняют подобно напорным фильтрам с зернистой загрузкой или безнапорным фильтрам в виде резервуара прямоугольного или круглого сечения. Отработанный сорбент выгружают из адсорбера насосом, гидроэлеватором, эрлифтом или шнеком при относительном расширении загрузки на 20 – 25 %, создаваемом потоком воды со скоростью 40 – 45 м/ч. В напорных адсорберах допускается предусматривать выгрузку адсорбента под давлением не менее 0,3 МПа.

Аппараты с движущимся слоем адсорбента применяют в виде цилиндрических одноярусных адсорберов с псевдооживленным слоем (рис. 8.16). Аппарат представляет собой колонну высотой 4 м; диаметр ее верхней части в 1,5 – 2 раза больше, чем диаметр основной колонны. Центральный угол конического днища колонны зависит от ее диаметра и составляет от 30 до 60 °. Непосредственно над коническим днищем находится распределительная решетка с отверстиями 5 – 10 мм и шагом отверстий около 10 мм. На решетку загружается активированный уголь с размером частиц 0,25 – 1 мм, основная доля которых приходится на размер 0,5 – 0,75 мм. Высота неподвижного слоя угля составляет 2,5 – 2,7 м.

В нижнюю часть аппарата через центральную трубу, заканчивающуюся диффузором под решеткой, поступает сточная вода. Она может также подаваться через боковой патрубок тройника, присоединенного к конусному днищу. Скорость подачи воды обеспечивает показатель оживления в пределах 1,4 – 1,6. 5 – 20 % суспензия сорбента поступает в верхнюю расширенную часть той же центральной трубы, по которой подается сточная вода. В трубе уголь смешивается с водой

и поступает через диффузор под решетку, затем продавливается через нее и остается «висеть» в нижней части псевдооживленного слоя. Постепенно отработанный уголь поднимается выше и отводится через боковую трубу в сгуститель сорбента, откуда направляется на регенерацию. Очищенная вода отводится в кольцевой желоб в верхней части колонны.

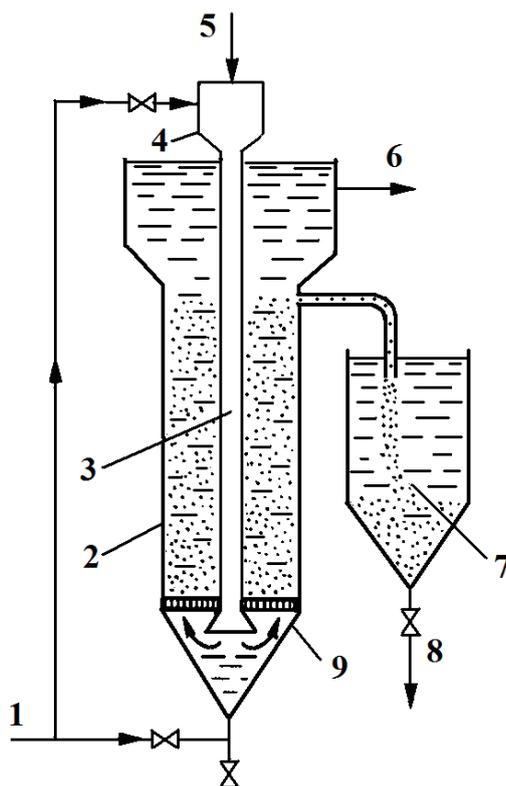


Рис. 8.16. Цилиндрический одноярусный адсорбер: 1 — подача сточных вод, 2 — цилиндрическая колонна, 3 — центральная труба с диффузором, 4 — воронка, 5 — трубопровод для подачи сорбента, 6 — отведение очищенной воды, 7 — сгуститель сорбента, 8 — выпуск отработанного сорбента, 9 — распределительная решетка

При небольшой высоте адсорберов (0,5 – 1, м) необходимо устанавливать секционирующие решетки с круглой перфорацией 10 – 20 мм и долей живого сечения 10 – 15 %. Оптимальное число секций 3 – 4. Скорость восходящего потока воды в адсорберах принимают 30 – 40 м/ч при крупности частиц сорбента 1 – 2,5 мм, либо 10 – 20 м/ч при крупности частиц 0,25 – 1 мм.

### 8.1.3. Расчет адсорберов

В основу расчета установок статической адсорбции с перемешивающими устройствами положено уравнение материального баланса:

$$m \cdot a + Q \cdot C = Q \cdot C_0, \quad (8.27)$$

где  $m$  — масса адсорбента, подаваемая в адсорбер в единицу времени, кг/ч,  $a$  — величина адсорбции, кг/кг адсорбента,  $Q$  — расход воды, м<sup>3</sup>/ч,  $C_0$  — концентрация сорбата в подаваемой воде, кг/м<sup>3</sup>,  $C$  — концентрация сорбата в очищенной воде (равновесная концентрация), кг/м<sup>3</sup>.

Примем, что адсорбция описывается уравнение Генри:

$$a = K \cdot C_p, \quad (8.28)$$

где  $K$  — константа адсорбционного равновесия,  $C_p$  — равновесная концентрация, равная концентрации сорбата в очищенной воде ( $C$ ).

Подставим выражение (8.28) в уравнение (8.27):  $mKC + QC = QC_0$ , откуда выразим  $m$  и  $C$ :

$$m = \frac{Q(C_0 - C)}{KC}, \quad (8.29)$$

$$C = \frac{QC_0}{Q + mK}, \quad (8.30)$$

При числе ступеней адсорбции равном  $n$  концентрация загрязнений в очищенной воде после  $n$ -ой ступени (при  $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$ ) будет равна

$$C_n = \left( \frac{Q}{Q + mK} \right)^n C_0. \quad (8.31)$$

Из выражения (8.31) находим расход сорбента на каждую ступень  $m_n$

$$m_n = \frac{Q}{K} \left( \sqrt[n]{\frac{C_0}{C_n}} - 1 \right). \quad (8.32)$$

Общее количество сорбента в установке с прямоточным введением сорбента (рис. 8.15, а) равно

$$m = n \cdot m_n. \quad (8.33)$$

Расчет адсорбера с плотным слоем загрузки активного угля следует выполнять в соответствии с рекомендациями, изложенными в СНиП 2.04.03-85.

Как отмечалось выше, в качестве адсорберов следует применять конструкции безнапорных открытых и напорных фильтров с загрузкой в виде плотного слоя гранулированного угля крупностью 0,8 – 5 мм. Содержание взвешенных веществ в сточных водах, поступающих на адсорберы, не должно превышать 5 мг/л.

Площадь загрузки адсорбционной установки  $F_{ads}$ , м<sup>2</sup>, определяют по формуле

$$F_{ads} = \frac{q_w}{v}, \quad (8.34)$$

где  $q_w$  — среднечасовой расход сточных вод, м<sup>3</sup>/ч;  $v$  — скорость потока, принимаемая не более 12 м/ч.

При выключении одного адсорбера скорость фильтрования на остальных не должна увеличиваться более чем на 20 %.

Число последовательно работающих адсорберов  $N_{ads}$  рассчитывают по формуле

$$N_{ads} = \frac{H_{tot}}{H_{ads}}, \quad (8.35)$$

где  $H_{ads}$  — высота сорбционной загрузки одного фильтра, м, принимаемая конструктивно;  $H_{tot}$  — общая высота сорбционного слоя, м, определяемая по формуле

$$H_{tot} = H_1 + H_2 + H_3, \quad (8.36)$$

где  $H_1$  — высота сорбционного слоя, м, в котором за период  $t_{ads}$  адсорбционная емкость сорбента исчерпывается до степени  $K$ .

$H_1$  рассчитывают по формуле

$$H_1 = \frac{D_{sb}^{\min} q_w t_{ads}}{F_{ads} \gamma_{sb}}, \quad (8.37)$$

где  $\gamma_{sb}$  — насыпной вес активного угля, г/м<sup>3</sup>, принимаемый по справочным данным;  $D_{sb}^{\min}$  — минимальная доза активного угля, г/л, выгружаемого из адсорбера при коэффициенте исчерпания емкости  $K_{sb}$ , определяемая по формуле

$$D_{sb}^{\min} = \frac{C_{en} - C_{ex}}{K_{sb} a_{sb}^{\max}}, \quad (8.38)$$

где  $C_{en}$ ,  $C_{ex}$  — концентрации сорбируемого вещества до и после очистки, мг/л;  $K_{sb}$  — принимается равным 0,6–0,8;  $a_{sb}^{\max}$  — максимальная сорбционная емкость активного угля, мг/л, определяемая экспериментально;  $H_2$  — высота загрузки сорбционного слоя, обеспечивающая работу установки до концентрации  $C_{ex}$  в течение времени  $t_{ads}$ , принимаемого по условиям эксплуатации, и определяемая по формуле

$$H_2 = \frac{D_{sb}^{\max} q_w t_{ads}}{F_{ads} \gamma_{sb}}, \quad (8.39)$$

где  $D_{sb}^{\max}$  — максимальная доза активного угля, г/л, определяемая по формуле

$$D_{sb}^{\max} = \frac{C_{en} - C_{ex}}{a_{sb}^{\min}}, \quad (8.40)$$

здесь  $a_{sb}^{\min}$  — минимальная сорбционная емкость активного угля, мг/л, определяемая экспериментально;  $H_3$  — резервный слой сорбента, рассчитанный на продолжительность работы установки в течение времени перегрузки или регенерации слоя сорбента высотой  $H_1$ , м.

### 8.3. ИОННЫЙ ОБМЕН

#### 8.1.2. Теоретические представления, лежащие в основе ионообменной очистки сточных вод

В подразд. 8.2 отмечалось, что одним из видов адсорбции является адсорбция ионов (электролитов). При этом адсорбция ионов мо-

жет происходить путем эквивалентного обмена одних ионов на другие. Это и есть случай ионообменной адсорбции.

Ионообменная адсорбция из растворов наблюдается на поверхностях с достаточно выраженным двойным электрическим слоем. Подвижные противоионы внешней обкладки ДЭС (см. подразд. 8.1) способны обмениваться на другие ионы того же знака, находящиеся в растворе.

Вещества, проявляющие способность к ионному обмену и используемые для адсорбции ионов, называются ионообменниками или ионитами.

Примером природных неорганических катионообменных материалов (катионитов) могут служить кристаллические силикаты типа цеолитов (шабазит, глауконит и др.). Они имеют правильную сетчатую структуру в виде алюмосиликатного каркаса. В порах (со стороны раствора) располагаются ионы щелочных или щелочноземельных металлов, играющие роль противоионов. Некоторые минералы, такие как апатит, способны к обмену анионов, т. е. являются анионитами.

Природными ионитами органического происхождения являются гумусовые вещества, содержащие разные функциональные группы с различными константами диссоциации — карбоксильные, фенолгидроксильные, метоксильные, карбонильные, амидные. Вещества, составляющие почву, обладают амфотерными свойствами и поэтому могут обменивать и катионы, и анионы.

Природные иониты не нашли широкого технического применения, поскольку они химически нестойки, не обладают достаточной механической прочностью и проявляют сравнительно невысокую обменную емкость.

Емкость определяется числом ионогенных групп в ионите. Различают статическую и динамическую обменную емкость. Статическая обменная емкость — это полная емкость, характеризующая общее число ионогенных групп, приходящееся на единицу массы сухого или на единицу объема набухшего ионита. Динамическая, или рабо-

чая обменная емкость относится только к той части ионогенных групп, которая используется в процессе. Она зависит от физико-химических и динамических условий процесса и всегда меньше статической обменной емкости.

Статическая емкость природных ионитов обычно не превышает 0,2 – 0,3 мг-экв/г сухой массы ионита. В то же время для синтетических ионообменных материалов, в частности, ионообменных смол, она находится в пределах 3 – 5 мг-экв/г, а иногда достигает 10 мг-экв/г.

Синтетические смолы состоят из жесткой высокомолекулярной матрицы (каркаса, сетки), включающей фиксированные ионы одного знака, пропитанной раствором, который содержит в основном подвижные противоионы (рис. 8.17). Синтетические смолы получают двумя методами: поликонденсацией и полимеризацией. Процесс синтеза синтетических смол включает стадии получения линейных полимеров, образования сетчатой структуры из отдельных линейных полимеров с помощью мостикообразователей и введения в макромолекулы ионогенных групп (ионогенные группы могут находиться уже в исходном мономере).



Рис. 8.17. Модель матрицы полиэлектrolита (катионита) с фиксированными анионами и подвижными противоионами

По кислотно-основным свойствам иониты делят на сильнокислотные катиониты (например, имеющие группу  $-\text{SO}_3\text{H}$ ), слабокислотные катиониты ( $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{SiOH}$ ), сильноосновные аниониты ( $-\text{H}_2\text{NMe}_3\text{Cl}$ ), слабоосновные аниониты ( $-\text{NH}_2$ ,  $=\text{NH}$ ), полифункциональные иониты, в том числе амфолиты (амфотерные). Кислотно-основные свойства ионитов, как и растворимых электролитов, характеризуются константой кислотно-основного равновесия.

В табл. 8.3 и 8.4 представлены характеристики основных марок отечественных катионитов и анионитов, выпускаемых для очистки природных и сточных вод.

Емкость ионитов, обладающих сильными кислотно-основными свойствами в широкой области рН, не зависит от рН раствора. У слабокислотных катионитов максимальная емкость достигается только при высоких значениях, а у слабоосновных — только при низких значениях рН. Поэтому сильные иониты можно использовать в технологических процессах (например, при водоочистке) в широком диапазоне рН, слабые катиониты, в основном, при  $\text{pH} > 7$ , слабоосновные аниониты — при  $\text{pH} < 7$ .

Характерным свойством ионитов является набухаемость при контакте сухого ионита с раствором. Особенно сильно набухают синтетические ионообменные смолы. Основной причиной набухания ионитов в воде является наличие гидрофильных функциональных групп. Набуханию способствуют большая обменная емкость, гидратация противоионов и разбавление раствора. Неорганические иониты набухают очень слабо и удерживают растворитель в полостях кристаллической структуры.

Процесс ионного обмена может быть описан уравнением Никольского

$$\frac{(x_1)_{z_1}^{\frac{1}{z_1}}}{(x_2)_{z_2}^{\frac{1}{z_2}}} = K_{1,2} \frac{(a_1)_{z_1}^{\frac{1}{z_1}}}{(a_2)_{z_2}^{\frac{1}{z_2}}}, \quad (8.41)$$

где  $x_i$  — поглощенное количество;  $z_i$  — зарядное число ионов 1 и 2 с одинаковым знаком заряда;  $K_{1,2}$  — константа ионного обмена;  $a_i$  — активность иона в равновесном растворе.

Таблица 8.3, а

**Характеристика основных марок отечественных катионитов выпускаемых для очистки природных и сточных вод**

Катионит – смола		Основа матрицы	Сшивающий агент	Функциональная группа	Ионная форма	Кислотность
Марка	Тип					
КУ-2	Полимеризационная	Полистирол	Дивинилбензол 8 – 10 %	SO <sub>3</sub> H	H <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup>	Сильнокислотный
КУ-2-8	« – »	« – »	« – »	SO <sub>3</sub> H	H <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup>	« – »
КУ-2-12П	Полимеризационная*	« – »	« – »	SO <sub>3</sub> H	H <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup>	« – »
КУ-1	Конденсационная	Фенолформальдегид	« – »	SO <sub>3</sub> H	H <sup>+</sup>	« – »
КФ-1	Полимеризационная	Полистирол	« – »	PO(OH) <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup>	Среднекислотный
КФ-2	« – »	« – »	« – »	(CH) <sub>2</sub> [PO(OH) <sub>2</sub> ]	Na <sup>+</sup>	« – »
КБ-1	« – »	метакриловая кислота	« – »	COOH	Na <sup>+</sup>	Слабокислотный
КБ-4	« – »	« – »	Дивинилбензол 10 %	COOH	Na <sup>+</sup>	« – »
КБ-4-10П	Полимеризационная*	« – »	« – »	COOH		« – »

Примечание: \* — макропористая

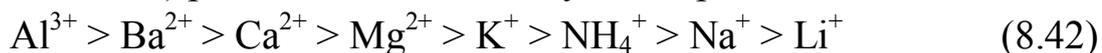
Таблица 8.3, б

Катионит	Полная обменная емкость		Насыпная плотность	Влажность	Максимальная рабочая температура, °С	Размер зерна ионита, мм
	экв/т	экв/м <sup>3</sup>				
КУ-2	4700 – 5100	1300 – 1800	0,7 – 0,9	50, 60	120 – 130	0,3 – 1,5
КУ-2-8	5100	1800	0,7 – 0,9	50, 60	120 – 130	0,3 – 1,5
КУ-2-12П	4950	1500	-	-	-	0,5 – 1,5
КУ-1	4000	1400	0,6 – 0,75	30, 50	90	0,3 – 1,5
КФ-1	5000	1900	0,7	-	-	
КФ-2	7000	2600	0,7	-	-	
КБ-1	8500 – 10000	4200 – 3800	0,55 – 0,6	30	-	0,3 – 1,5
КБ-4	8500	4200	0,55 – 0,6	50	150 – 180	0,3 – 2,0
КБ-4-10П	7500	-	0,68 – 0,82	75	-	0,25 – 1,0

Если можно пренебречь взаимодействием ионов (при равенстве единице коэффициентов активности), то в формуле (8.41) активности заменяются на равновесные концентрации ионов.

Константа ионного обмена характеризует относительное сродство ионов к иониту, т. е. селективность ионита к тому или другому иону.

По адсорбционной способности ионы располагаются в ряды, которые получили название лиотропных. Так, например, на основании изучения ионного обмена катионов на почвах и грунтах, К.К. Гедройц (начало XX века) расположил их в следующий ряд



В первом приближении такое расположение ионов можно объяснить тем, что противоионы удерживаются во внешней обкладке ДЭС кулоновскими силами, которые прямо пропорциональны заряду и обратно пропорциональны квадрату расстояния от центра противоиона до центра тяжести электрического заряда аниона внутренней об-

кладки. Поэтому адсорбционная способность увеличивается с возрастанием зарядного числа иона ( $Al^{3+} > Ba^{2+} > K^+$ ), а для равнозарядных ионов — с уменьшением радиуса гидратированного иона (радиус ионов возрастает в ряду  $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$ , радиус гидратированных ионов в этом ряду убывает).

Местоположение иона водорода в лиотропном ряду зависит от силы катионита. Сильный катионообменник можно уподобить сильной кислоте, для которой сила взаимодействия кислотного остатка с катионом водорода незначительная (сильные кислоты полностью диссоциированы), поэтому место катиона водорода в лиотропном ряду (записанному аналогично (8.42)) справа. Для слабых катионообменников связь функциональной группы с катионом водорода значительная (также как и в слабых кислотах связь кислотного остатка с катионом водорода). Поэтому место катиона водорода в лиотропном ряду — слева.

Таблица 8.4

**Характеристика основных марок отечественных анионитов выпускаемых для очистки природных и сточных вод**

Анионит – смола		Основа матрицы	Сшивающий агент	Функциональная группа	Основность
марка	тип				
(АВ-17х8)	Полимеризационный	Полистирол	Дивинилбензол 8 %	$R_3N^+$	Сильноосновной
ЭДЭ-10Д	« – »	Эпоксиполиамин		$RNH, R_2N, R_3N^+$ (10 – 20 %)	Промежуточный
АВ-16	« – »	-		$RNH, R_2N, R_3N^+$	« – »
АН-22	« – »	Полистирол	Дивинилбензол	$NH_2, RNH$	Слабоосновной
АН-31	Конденсационный	Полиэтиленполиамин	Эпихлоргидрин	$RNH, R_2N$	« – »

Анионит – смола		Основа матрицы	Сшивающий агент	Функциональная группа	Основность
марка	тип				
АН-2Ф	« – »	« – »	-	RNH, R <sub>2</sub> N	Слабоосновной

Таблица 8.4, б

Анионит	Полная обменная емкость		Насыпная плотность, т/м <sup>3</sup>		Влажность, %	Размер зерна, мм
	марка	экв/т	экв/м <sup>3</sup>	исходного		
(АВ-17x8)	3800 – 4500	1300 – 1500	0,66 – 0,74	0,33 – 0,35	40 – 65	0,4 – 1,2
ЭДЭ-10Д	900 – 10000	-	0,6 – 0,72	-	10 – 15	0,4 – 1,8
АВ-16	9800 – 10500	2300	0,68 – 0,82	-	60	0,3 – 1,8
АН-22	7000	2100 – 2500	0,6 – 0,8	0,36	40 – 60	0,25 – 1,0
АН-31	9000 – 9900	4050 – 4550	0,66	0,45	15	0,3 – 2,0
АН-2Ф	9000 – 10500	3700	0,7 – 0,9	-	15	0,3 – 2,0

Аналогичные лиотропные ряды существуют и для анионообменных материалов. И соответствующим образом определяется для них местоположение иона гидроксила.

Идеализированный лиотропный ряд (8.42) несколько преобразуется для каждого ионообменника. Это объясняется наличием иных (кроме кулоновского) механизмов взаимодействия ионообменных материалов с обмениваемыми ионами (например, специфической адсорбцией или координационными связями). Поэтому при выборе ионообменного материала для организации технологического процесса очистки сточных вод от различных ионов необходимо иметь полный

набор его характеристик, включающий значение емкости и лиотропный ряд, содержащий интересующие ионы.

Катиониты используют обычно в  $H^+$  или  $Na^+$  форме, аниониты — в  $OH^-$  или  $Cl^-$  форме (см. табл. 8.3 и 8.4). Это означает, что перед началом работы для отрицательно заряженных функциональных групп катионитов противоионами являются, соответственно,  $H^+$  или  $Na^+$ , а для положительно заряженных функциональных групп анионитов —  $OH^-$  или  $Cl^-$ . Форма ионита определяет и вид регенерационного раствора. Катиониты, используемые в  $H^+$  форме, регенерируют сильными кислотами (например,  $HCl$ ), аниониты в  $OH^-$  форме — сильными щелочами ( $NaOH$ ), катиониты в  $Na^+$  форме и аниониты в  $Cl^-$  форме — раствором  $NaCl$ .

Возможность регенерации ионообменников (т. е. обратного протекания ионообменного процесса) легко объясняется на основании уравнения ионного обмена Никольского (8.41). Если прямой процесс обмена ионов идет за счет большего сродства извлекаемых ионов к иониту (противоион стоит в лиотропном ряду правее), то обратный процесс возможен только за счет заметного превосходства концентрации регенерирующего иона над концентрацией извлекаемых. Поэтому регенерацию сильных ионообменников проводят концентрированными растворами (7 – 10 %). Для регенерации слабых ионообменников достаточно невысоких концентраций регенерирующих растворов (0,1 – 0,3  $N$   $HCl$  или  $NaOH$ ), поскольку ион водорода (или ион гидроксила) имеют большее сродство к ионообменнику, чем обмениваемые ионы.

Кинетику процесса ионного обмена можно представить в виде пяти стадий: 1) диффузия адсорбирующихся ионов из раствора к поверхности ионита; 2) диффузия внутрь зерна ионита; 3) обмен ионов; 4) диффузия замещенных ионов к поверхности ионита; 5) диффузия от поверхности ионита в раствор. Лимитирующей (наиболее медленной) является стадия диффузии внутрь зерен ионита. Она, главным

образом, и определяет скорость ионного обмена. Диффузию в растворе можно ускорить, например, с помощью перемешивания. Скорость массообмена внутри зерна можно увеличить путем уменьшения размера зерна и повышения температуры. Уменьшение степени сшивки полимера при его синтезе приводит к увеличению набухания и к росту скорости ионного обмена. В зависимости от природы ионитов и обмениваемых ионов, а также от их концентрации, время установления ионообменного равновесия колеблется от нескольких минут до нескольких суток.

Ионообменная адсорбция находит широкое применение в практике водоподготовки и водоочистки. Например, ионный обмен применяют для умягчения вод (освобождения от щелочноземельных ионов), для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, для извлечения ценных компонентов (урана, золота, серебра).

Процессы ионообменной очистки сточных вод осуществляют в аппаратах периодического и непрерывного действия. Аппараты периодического действия представляют собой закрытые фильтры — цилиндрические резервуары, у дна которых располагаются дренажные щелевые устройства, обеспечивающие равномерное распределение воды по сечению фильтра. Высота слоя загрузки ионита составляет 1,5 – 2,5 м. Фильтр может работать по параллельно-точной схеме, при которой вода и регенерационный раствор подаются сверху, и по противоточной схеме, при которой сточная вода подается снизу. А регенерирующий раствор — сверху. Перед подачей сточной воды в ионообменную установку следует, как и при адсорбции в плотном слое, максимально удалить взвешенные вещества (до 8 мг/л).

Процесс регенерации ионитов проводят в три стадии — взрыхления ионита, собственно регенерации и отмывки ионита от продуктов регенерации и избытка регенерирующих веществ. Объем промывных вод обычно составляет 75 – 100 % объема регенерационных растворов.

На рис. 8.18 представлена схема аппарата непрерывного действия. В нем ионит движется по замкнутому кругу, последовательно проходя стадии ионообменной сорбции, регенерации и промывки.

Колонна аппарата, представленного на рис.8.18, выполнена в виде усеченного конуса. Внутри него находится другой усеченный конус, где происходят процессы регенерации и отмывки. Сточную воду подают в колонну через трубу с конической насадкой. Вода проходит через псевдооживленный слой ионита и выходит из верхней части колонны. Отработанный ионит осаждается в нижней части колонны, откуда через трубчатое устройство с помощью эрлифта или эжектора подается в верхнюю часть колонны. Во внутреннем полем усеченном конусе скорость движения потока вода уменьшают с помощью регулятора. Это способствует вовлечению отработанного ионита во внутренний конус и последующему осаждению его в нижней части ионообменной колонны.

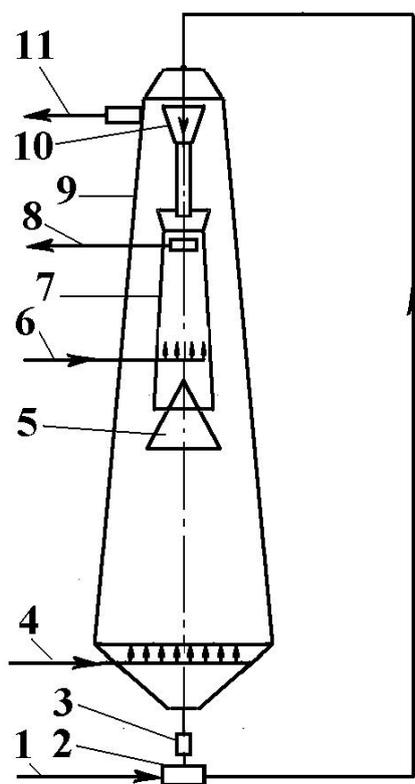


Рис. 8.18. Ионообменный аппарат непрерывного действия:  
1 — подача воды, 2 — устройство для транспортирования ионита,

3 — устройство для отбора ионита, 4 — подача сточной воды, 5 — регулятор скорости движения воды в регенераторе, 6 — подача регенерационного раствора, 7 — внутренний корпус для регенерации ионита, 8 — отвод послерегенерационного раствора, 8 — ионообменная колонна, 10 — воронка для приема отработанного ионита, 1 — выпуск отработанной сточной воды

Регенерационный раствор подают в нижнюю часть внутреннего усеченного конуса, а отводят из его верхней части. Регенерированный ионит, продолжая опускаться навстречу восходящему потоку воды, промывается и проходит в рабочую зону колонны.

Расчет установок для ионообменной очистки природных и сточных вод следует выполнять в соответствии с рекомендациями, изложенными в СНиП 2.04.03-85.

#### ***Расчет катионообменника***

Число катионитовых фильтров первой ступени следует принимать: рабочих — не менее двух, резервных — один.

Сточные воды, подаваемые на установку, не должны содержать: солей свыше 3000 мг/л; взвешенных веществ свыше 8 мг/л; ХПК не должна превышать 8 мг/л.

При большем содержании в сточной воде взвешенных веществ и большей ХПК необходимо предусматривать ее предварительную очистку.

Объем катионита  $W_{kat}$ , м<sup>3</sup>, в водород-катионитовых фильтрах следует определять по формуле

$$W_{kat} = \frac{24q_w (\sum C_{en}^k - \sum C_{ex}^k)}{n_{reg} E_{wc}^k}, \quad (8.43)$$

где  $q_w$  — расход обрабатываемой воды, м<sup>3</sup>/ч;  $\sum C_{en}^k$  — суммарная концентрация катионов в обрабатываемой воде, г·экв/м<sup>3</sup>;  $\sum C_{ex}^k$  — допустимая суммарная концентрация катионов в очищенной воде, г·экв/м<sup>3</sup>;  $n_{reg}$  — число регенераций каждого фильтра в сутки (выбирается в зависимости от конкретных условий, но не более двух);  $E_{wc}^k$  —

рабочая обменная емкость катионита по наименее сорбируемому катиону, г-экв/м<sup>3</sup>:

$$E_{wc}^k = \alpha_k E_{gen}^k - K_{ion} q_k \sum C_w^k \quad (8.44)$$

где  $\alpha_k$  — коэффициент эффективности регенерации, учитывающий неполноту регенерации и принимаемый равным 0,8–0,9;  $E_{gen}^k$  — полная обменная емкость катионита, г-экв/м<sup>3</sup>, определяемая по заводским паспортным данным, по каталогу на иониты или по экспериментальным данным;  $q_k$  — удельный расход воды на отмывку катионита после регенерации, м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> катионита, принимаемый равным 3–4;  $K_{ion}$  — коэффициент, учитывающий тип ионита; для катионита принимается равным 0,5;  $\sum C_w^k$  — суммарная концентрация катионов в отмывочной воде (при отмывке катионита ионированной водой).

Площадь катионитовых фильтров  $F_k$ , м<sup>2</sup>, определяют по формулам:

$$F_k = \frac{W_k}{H_k}; \quad (8.45)$$

$$F_k = \frac{q_w}{v_f}, \quad (8.46)$$

где  $H_k$  — высота слоя катионита в фильтре, принимаемая по каталогу ионообменных фильтров от 2 до 3 м,  $q_w$  — расход воды, м<sup>3</sup>/ч,  $v_f$  — скорость фильтрования, м/ч, принимаемая по следующим условиям: Скорость фильтрования воды  $v_f$  для напорных фильтров первой ступени не должна превышать 20 м/ч при общем солесодержании воды до 5 мг-экв/л; 15 м/ч при солесодержании 5–15 мг-экв/л, 10 м/ч при солесодержании 15–20 мг-экв/л, 8 м/ч при солесодержании свыше 20 мг-экв/л.

При значительных отклонениях площадей, рассчитанных по формулам (8.45) и (8.46) следует в формуле (8.43) проводить корректировку числа регенераций  $n_{reg}$ .

Потери напора в напорных катионитовых фильтрах следует принимать по 8.5.

Интенсивность подачи воды при взрыхлении катионита следует принимать  $3 - 4 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$  продолжительность взрыхления — 0,25 ч. Для взрыхления катионита перед регенерацией следует использовать последние фракции воды от отмывки катионита.

Таблица 8.5

**Потери напора в напорных катионовых фильтрах**

Скорость фильтрования $v_f$ , м/ч	Потери напора в фильтре, м, при раз- мере зерен ионита, мм			
	0,3 – 0,8		0,5 – 1,2	
	при высоте слоя загрузки, м			
	2	2,5	4	2,5
5	5	5,5	4	4,5
10	5,5	6	5	5,5
15	6	6,5	5,5	6
20	6,5	7	6	6,5
25	9	10	7	7,5

Регенерацию катионитовых фильтров первой ступени надлежит производить 7 – 10 %-ными растворами кислот (соляной, серной). Скорость пропуска регенерационного раствора кислоты через слой катионита не должна превышать 2 м/ч. Последующая отмывка катионита осуществляется ионированной водой, пропускаемой через слой катионита сверху вниз со скоростью 6 – 8 м/ч. Удельный расход составляет 2,5 – 3 м на 1 м<sup>3</sup> загрузки фильтра.

Первая половина объема отмывочной воды сбрасывается в бак для приготовления регенерирующего раствора кислоты, вторая половина — в бак воды для взрыхления катионита.

Расчет анионита проводят примерно по аналогичной схеме по близким формулам (см. СНиП 2.04.03-85).

## 8.4. ФЛОТАЦИЯ

Флотация — это метод адсорбционно-пузырькового разделения, основанный на формировании всплывающих агломератов (флотокомплексов) загрязнений с диспергированной газовой фазой (ДГФ) и последующим отделением в виде концентрированного пенного продукта (флотошлама).

В основе флотации лежит явление смачивания. Различие в степени смачивания компонентов определяет эффективность их разделения при флотации.

Наиболее широко флотацию применяют в горнодобывающей промышленности при отделении руды от пустой породы. К основным видам флотации относятся пенная, масляная и пленочная.

При пенной флотации (в случае обогащения руд) горную породу измельчают, смешивают в большой емкости с водой и пропускают через нее пузырьки воздуха. Частички металла или их сульфиды прилипают к пузырькам пены и поднимаются вместе с ними на поверхность. Пустая порода (кварц, алюмосиликаты) хорошо смачивается водой, поэтому должна опускаться на дно емкости.

При масляной флотации вместо пузырьков воздуха используют масляную эмульсию. При пленочной флотации измельченную руду высыпают на движущуюся водную поверхность. Хорошо смачиваемые частицы тонут, а плохо смачиваемые движутся вместе с поверхностью и затем собираются с помощью специального устройства.

В процессах водоочистки применяют пенную флотацию.

Условие флотируемости частиц определяется следующим выражением для флотирующей силы  $f_{\text{фл}}$ , которая должна превосходить силу тяжести ( $P = mg$ ):

$$f_{\text{фл}} = \sigma_{\text{тж}} + \sigma_{\text{жг}} - \sigma_{\text{тг}} = \sigma_{\text{жг}}(1 - \cos \theta) > mg. \quad (8.47)$$

где  $\sigma_{\text{тж}}$  — межфазное натяжение на границе твердое тело / газ,  $\sigma_{\text{жг}}$  — поверхностное натяжение на границе жидкость / газ,  $\sigma_{\text{тг}}$  —

межфазное натяжение на границе твердое тело / газ,  $\theta$  — краевой угол смачивания (см. рис. 8.19).

Для частиц, хорошо смачиваемых водой,  $\theta \rightarrow 0$  и  $\cos \theta \rightarrow 1$ , следовательно, прочность прилипания минимальна. Для несмачиваемых частиц она максимальна.

Для эффективного протекания процесса флотации поверхностное натяжение воды не должно превышать 65 мН/м, а размеры воздушных пузырьков находиться в пределах 15 – 30 мкм (в отдельных случаях достигать 100 – 200 мкм).

В зависимости от показателей сточных вод (вида и концентрации примесей, расхода и т. д.) используют различные способы создания пузырьков воздуха (диспергированной газовой фазы).

Одним из общепринятых подходов к классификации флотационных сооружений является классификация по способу получения ДГФ (см. табл. 8.6).

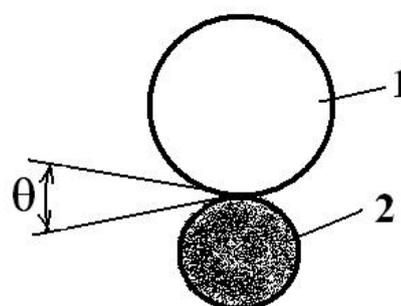


Рис. 8.19. Схема прилипания пузырька газа к взвешенной в воде частице: 1 — пузырек газа, 2 — частица,  $\theta$  — краевой угол смачивания

Таблица 8.6

**Классификация флотационных сооружений по способу получения диспергированной газовой фазы**

Способ получения диспергированной газовой фазы					
Диспергирование			Выделение из воды		
Барботажные	Импеллерные	Гидродинамические	Компрессорные и вакуумные	Электрохимические	Химические

Двум способам получения ДГФ соответствуют два типа флотокомплексов, представленных на рис. 8.20.



Рис. 8.20. Основные типы флотокомплексов: а — газовой-дисперсный, б — дисперсно-газовый

Первый тип, газовой-дисперсный, образуется в результате столкновений дисперсных загрязнений (твердых или жидких) с движущимися газовыми пузырьками (рис. 8.20, а). Структура такого флотокомплекса, как правило, состоит из малого числа относительно крупных пузырьков. Второй тип (дисперсно-газовый) наблюдается при выделении газа из обрабатываемой воды в условиях уменьшения его растворимости (рис. 8.20, б). Поскольку вероятность зарождения пузырьков на межфазной границе во много раз больше вероятности их возникновения в объеме чистой воды, дисперсные частицы становятся центрами формирования флотокомплексов. В дальнейшем в результате коалесценции газовой фазы дисперсно-газовый флотокомплекс может трансформироваться в газовой-дисперсный.

#### 8.4.1. Флотация с диспергированием воздуха

Рассмотрим сначала методы флотации, в которых пузырьки получают путем диспергирования воздуха.

##### *Подача воздуха через пористые материалы (барботажное получение ДГФ)*

Барботаж является одним из наиболее распространенных методов получения ДГФ. Диспергируемый газ проходит через отверстия (поры) фильтросного устройства (пористые пластины, трубы с отверстиями, насадки и т. п), погруженного в воду (уложенного на дно камеры), в результате образуется поток газовых пузырьков.

Размер пузырьков определяется условием отрыва от кромки пор. Минимальная величина диаметра пузырьков ( $d_{\Pi}$ ) определяется по формуле

$$d_{\Pi} = \sqrt[3]{\frac{6d_0\sigma}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}}, \quad (8.48)$$

где  $d_0$  — диаметр отверстий (пор), через которые поступает газ,  $\sigma$  — поверхностное натяжение на границе раздела фаз «вода – газ»,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости,  $\rho_{\text{г}}$  — плотность газа.

Уравнение (8.48) справедливо для невысокой скорости образования пузырьков и не зависит от расхода газа. С увеличением расхода газа число пузырьков растет до тех пор, пока не будет достигнут критический расход газа, после чего отрывающиеся от отверстия пузырьки соприкасаются друг с другом и поднимаются в виде цепочки пузырьков.

При установившемся гидродинамическом режиме скорость подъема пузырьков определяется из условия равенства подъемной силы и силы сопротивления сред. Для ламинарного режима (по Стоксу) это соответствует закономерности, полученной в подразд. 3.1:

$$V_{\Pi} = \frac{d_{\Pi}^2 g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}{18\eta}, \quad (8.48)$$

где  $\eta$  — динамическая вязкость сточной воды.

Основные технологические параметры процесса флотации при барботажном получении пузырьков, следующие: величина отверстий, через которые проходит воздух, составляет 4 – 20 мкм, давление воздуха — 0,1 – 0,2 МПа; продолжительность флотации — 20 – 30 мин; рабочий уровень обрабатываемой сточной воды — 1,5 – 2 м.

Преимуществами данного способа флотации являются его простота и малые расходы энергии. К основным недостаткам относится высокая вероятность засорения диспергирующих воздух устройств и

трудность подбора пористых материалов для распылителей (с одинаковыми или близкими по размеру порами).

### ***Импеллерные установки***

Импеллер, расположенный на дне камеры, производит интенсивное перемешивание сточной воды. Он диспергирует засасываемую струю воздуха на отдельные пузырьки определенного размера. Перемешанные в импеллере воздух и вода выбрасываются через статор, проходят через решетки, расположенные вокруг него, что позволяет уменьшить размер воздушных пузырьков.

Основные характеристики процесса флотации следующие: окружная скорость вращения импеллера 12 – 15 м/с, диаметр импеллера обычно не превышает 750 мм. Высота флотационной камеры составляет 1,5 – 3,0 м; продолжительность флотации 20 – 30 мин.

Импеллерные установки рекомендуется применять при очистке сточных вод с концентрацией загрязняющих частиц более 2 – 3 г/л, особенно содержащих нефть и нефтепродукты, а также жиры.

### ***Безнапорные флотационные установки***

В данном методе образование пузырьков происходит за счет воздействия рабочего колеса центробежного насоса. Метод эффективен для очистки сточных вод от жира и волокнистых загрязнений. Не рекомендуется его использовать для выделения мелких загрязняющих частиц.

### ***Пневматические флотационные установки***

В пневматических установках воздух диспергируется при его пропускании через сопла, расположенные на дне флотационной камеры. Рекомендуется использовать для очистки производственных сточных вод, содержащих агрессивные загрязнения (вызывающие быстрое разрушение насосов, арматуры и т. д.).

Технологические параметры процесса следующие: диаметр отверстий сопел составляет 1 – 1,2 мм; рабочее давление перед ними — 0,3 – 0,5 МПа; скорость выхода струи из сопел — 100 – 200 м/с; глу-

бина флотатора — 3 – 4 м; расход воздуха при аэрации — 15 – 20 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

#### **8.4.2. Флотация с выделением воздуха из раствора**

Сущность флотации с выделением воздуха из раствора заключается в создании пересыщенного раствора воздуха в сточной воде, при выделении которого образуются макропузырьки, позволяющие удалять высокодиспергированные загрязнения. Количество воздуха, необходимого для эффективной флотации, составляет 1 – 5 % от объема обрабатываемой воды.

Вакуумная и напорная флотация основаны на зависимости растворимости газов от давления.

##### ***Вакуумная флотация***

При вакуумной флотации сточную воду в течение нескольких минут насыщают воздухом, потом ее направляют в деаэратор, где удаляется нерастворившийся воздух. Затем вода поступает во флотационную камеру, где создается пониженное давление (0,02 – 0,03 МПа). Понижение давления приводит к уменьшению растворимости воздуха, поэтому он выделяется из воды в виде микропузырьков, которые взаимодействуют с частицами загрязнений и переносят их на поверхность воды в пенный слой. Пену удаляют вращающимися скребками в пеносборник. Продолжительность обработки сточной воды в вакуумном флотаторе составляет 20 мин, производительность, рассчитанная на 1 м<sup>2</sup> поверхности флотатора, равна 200 м<sup>3</sup>/сут.

Вакуумную флотацию используют для очистки сточных вод с невысокой концентрацией загрязнений (не более 250 мг/л). Достоинствами метода являются низкие энергозатраты и высокая стабильность всплывающих агрегатов «частица – пузырек воздуха». К недостаткам относится достаточно высокая сложность создания и эксплуатации вакуумных систем.

##### ***Напорная флотация***

При напорной флотации очищаемую воду в течение 1 – 3 минут насыщают воздухом в сатураторе при избыточном давлении 0,3 – 0,5 МПа. Насыщенную воздухом воду направляют во флотационную камеру, где при атмосферном давлении происходит выделение пузырьков воздуха за счет уменьшения его растворимости (при понижении давления). Пузырьки взаимодействуют с загрязнителями и переводят их в слой пены на поверхности воды. Образующуюся пену удаляют в пеносборник.

Количество растворяющегося в сатураторе воздуха составляет 3 – 5 % от объема обрабатываемой воды. Продолжительность флотации примерно равна 20 мин, нагрузка на 1 м<sup>2</sup> площади камеры составляет 6 – 10 м<sup>3</sup>/ч.

Напорную флотацию применяют для концентрированных стоков (4 – 5 г/л и более).

Аналогичные процессы происходят в эрлифтной флотации, в которой аэратор расположен на 20 – 35 м выше флотационной камеры. Такая сложность конструкции ограничивает применение эрлифтной флотации. В то же время, она в несколько раз выигрывает по затратам энергии по сравнению с напорной флотацией.

### ***Химическая, биологическая, молекулярная и ионная флотация***

Химическая флотация основана на протекании реакций с выделением газов, например, таких как O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub> и др. Пузырьки газов прилипают к загрязняющим веществам и выносят их в пенный слой. Пена, содержащая загрязняющие частицы, удаляется с поверхности воды в шламоприемник.

Биологическую флотацию используют для уплотнения осадков из первичных отстойников при очистке бытовых сточных вод. Указанные осадки нагревают до 36 – 55 °С и выдерживают при этой температуре в течение нескольких суток. В результате биохимических процессов выделяются пузырьки газа, которые транспортируют частицы осадка в пенный слой, где они уплотняются и обезвоживаются.

Это экономически выгоднее, чем механическое обезвоживание, сбраживание, термическая сушка и сжигание.

В процессах водоочистки флотацию можно применять и для извлечения ценных молекулярно растворенных и ионных компонентов («молекулярная» и «ионная» флотация). Например, если в воде находятся ионы щелочноземельных или тяжелых металлов, то при добавлении растворимых солей жирных кислот образуются нерастворимые соли, которые объединяются в мицеллы (или коллоидные частицы) и затем флотируются. Ионную флотацию используют, например, для выделения из сточных вод при помощи ПАВ таких металлов как молибден, вольфрам, рений, ванадий и др.

### Электрофлотация

В процессах электрофлотации пузырьки газов образуются при электролизе сточных вод. На катоде выделяется водород, на аноде — кислород. Пузырьки водорода являются самыми мелкими пузырьками среди тех, которые используются в разных видах флотации.

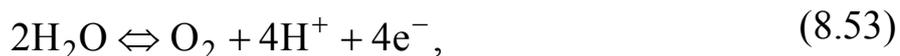
В кислой среде восстановление иона водорода происходит по следующей схеме:



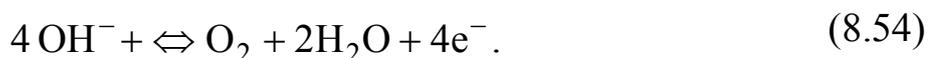
В щелочных растворах:



Выделение молекул кислорода в кислой среде происходит в соответствии с уравнением:



в щелочной среде:



Методом электрофлотации очищают сточные воды нефтеперерабатывающих заводов, целлюлозно-бумажных комбинатов и др.

## 8.5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Электрохимические методы обработки питьевых, природных и сточных вод условно можно отнести к трем группам (см. табл. 8.7): 1) методы превращения — это методы, обеспечивающие изменение физико-химических и фазово-дисперсных характеристик загрязнений для их обезвреживания или более быстрого извлечения из воды; 2) методы разделения — методы, обеспечивающие концентрирование примесей в локальном объеме электролите без существенных изменения фазово-дисперсных или физико-химических свойств извлекаемых веществ; 3) комбинированные методы — совмещенные в одном аппарате методы превращения и разделения загрязнений.

Таблица 8.7

### Классификация электрохимических методов обработки воды

Электрохимические методы		
Методы превращения	Методы разделения	Комбинированные методы
Электрокоагуляция	Электрофлотация	Электрофлотокоагуляция
Электрохимическая деструкция	Электродиализ	Электродокаталитическая деструкция
Электрокристаллизация	Электроосмос	Комплекс электрических воздействий
Электроокисление (примесей или воды)	Электрофорез	Электроосаждение
Электровосстановление (примесей или воды)	Электрофильтрация	Электроионообменный метод
		Электрохимическое обеззараживание

Принятое подразделение методов на методы превращения, разделения и комбинированные, как отмечалось выше, является условным, поскольку каждый метод является комбинированным — даже в методах разделения на электродах происходят процессы превращения

(окисления и восстановления продуктов диссоциации молекул воды и присутствующих в воде различных ионов — см. пример электрохимического получения гипохлорита натрия в подразд. 7.2).

Рассмотрим примеры наиболее часто используемых при очистке разных типов вод электрохимических методов.

#### 8.4.1. Электрохимические процессы восстановления и окисления

В химических процессах (в отсутствие электрического поля) реакции окисления и восстановления являются сопряженными (см. подразд. 7.2). В электрохимических процессах они пространственно разнесены — на катоде происходит реакция восстановления, на аноде — реакция окисления.

Электрохимические процессы окисления часто применяют для очистки сточных вод от органических загрязнений. Они приводят к разрушению основной углерод-углеродной цепи органических веществ и обеспечивают глубокую минерализацию вплоть до воды и двуокиси углерода. Катодное восстановление органических веществ имеет меньшее значение. Тем не менее, оно также применяется, например, восстановление нитробензола до анилина (см. рис. 8.21).

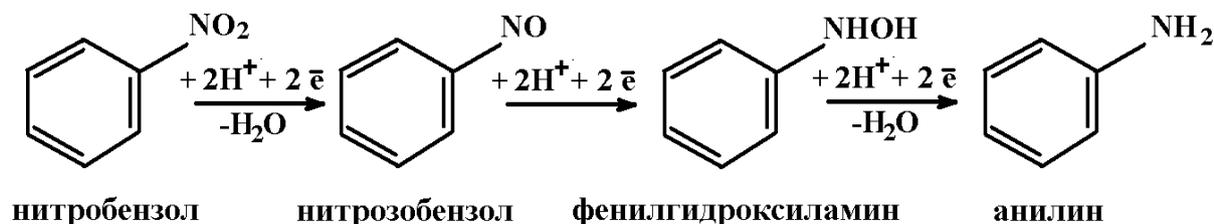


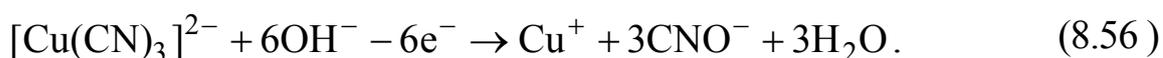
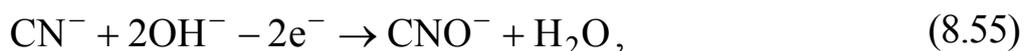
Рис. 8.21. Схема восстановления нитробензола до анилина

Образующиеся аминосоединения значительно легче окисляются, чем исходные нитросоединения. Сточные воды, содержащие нитросоединения сначала обрабатывают в катодной камере, где происходит электровосстановление, затем в анодной камере (где происходит электроокисление).

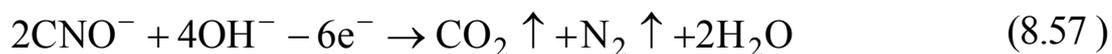
Описанные в подразд. 7.2 процессы химического окисления цианидов можно проводить электрохимическим путем. Таким путем можно, например, обезвреживать сточные воды гальванических цехов. Данные

способ наиболее экономичен при концентрациях цианидов не менее 200 мг/л.

При электролизе щелочных сточных вод (рН 8 – 12), содержащих цианистые соединения, происходит анодное окисление  $\text{CN}^-$  ионов, а также комплексных анионов, содержащих  $\text{CN}^-$  – группы ( $[\text{Cu}(\text{CN}_3)]^{2-}$ ,  $[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-}$ ,  $[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$  и др.) с образованием цианат-ионов:



Образующиеся по реакциям цианат-ионы ( $\text{CNO}^-$ ) частично окисляются на аноде с образованием нетоксичных газообразных продуктов:



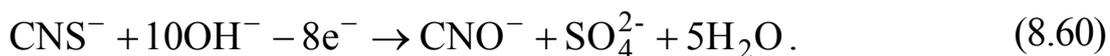
На катоде происходит разряд ионов водорода с образованием газообразного водорода, а также разряд ионов тяжелых металлов, образующихся при диссоциации комплексных ионов, содержащих  $\text{CN}$ -группы ( $[\text{Cu}(\text{CN}_3)]^{2-}$ ,  $[\text{Zn}(\text{CN})_4]^{2-}$ ,  $[\text{Cd}(\text{CN})_4]^{2-}$  и др.)

Электролиз сточных вод проводят при анодной плотности тока 0,5 – 2 А/дм<sup>2</sup>. К сточным водам добавляют хлорид натрия в концентрации 5 – 10 г/л. При этом цианиды дополнительно окисляются хлором, выделяющимся на аноде вследствие электрохимического разложения хлорида натрия:

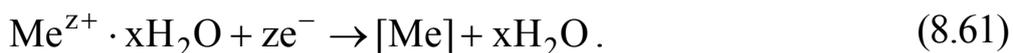


Степень очистки сточных вод от цианидов приближается к 100 %. Кроме того, утилизируется до 80 % общего количества металлов, которые выделяются в виде катодных осадков. Остальные 20 % от общего количества металлов удаляются в виде гидроксидов. рН процесса следует поддерживать в пределах 8 – 9.

Роданиды при анодном окислении разрушаются по следующей схеме



Катодное восстановление металлов используют для выделения из сточных вод следующих ионов тяжелых металлов:  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Sn}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  и др. Общая схема восстановления на катоде ионов металлов из гидратированных форм описывается реакцией



Очистку сточных вод от ионов  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  проводят в кислой среде на катодах из смеси угольного и сернистого порошков при плотности тока до  $2,5 \text{ A/дм}^2$ . Названные ионы осаждают в виде сульфидов и бисульфидов.

Электрохимическим восстановлением можно также очищать сточные воды от нитрата аммония. При проведении электролиза используют графический катод, на котором протекает реакция



Нитрит аммония при нагревании разлагается с выделением азота



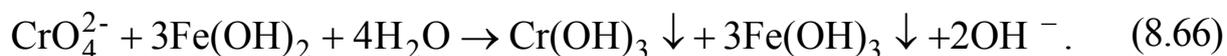
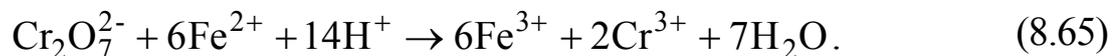
#### 8.4.2. Электрокоагуляция

Как правило электрокоагуляцию применяют для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов и для выделения хрома из бихромат- ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) или хромат-ионов ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ). При реализации метода электрокоагуляции протекают следующие физико-химические процессы: электролиз воды, поляризация частиц, электрофорез, окислительно-восстановительные процессы, взаимодействие продуктов электролиза друг с другом. Таким образом, коагуляции подвергаются продукты электролиза.

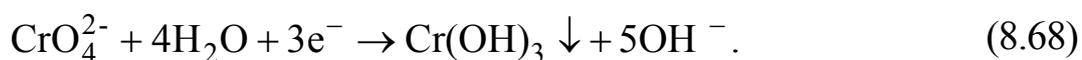
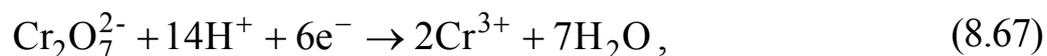
При очистке хромсодержащих сточных вод используют стальные электроды, которые растворяются по реакции



Восстановление шестизарядного хрома двухвалентным железом протекает с достаточно высокой скоростью в кислой, нейтральной и щелочной средах в соответствии с уравнениями:



Кроме того, восстановление  $\text{Cr}^{6+}$  происходит в результате протекания следующих реакций:



Оптимальные величины pH электрокоагуляционной очистки хромосодержащих сточных вод составляет 3 – 6.

Электрохимическая очистка от хрома целесообразна при исходном солесодержании сточных вод  $\geq 0,3$  г/л. Если концентрация солей ниже данного значения, то к сточным водам добавляют электролиты (обычно NaCl), которые повышают электропроводность сточных вод, в результате чего снижаются затраты электроэнергии на их очистку.

### 8.4.3. Электродиализ

Электродиализом называют процесс переноса ионов через мембрану (систему капилляров) под действием приложенного к ней электрического поля.

Перенос ионов характеризуется числами переноса ионов ( $n_i$ ). Число переноса  $n_i$  определяется как доля электричества, переносимая данным видом ионов, или как отношение парциального тока ( $I_i$ ) к общему ( $I$ )

$$n_i = \frac{I_i}{I} = \frac{z_i C_i U_i}{\sum_i z_i C_i U_i}, \quad (8.71)$$

где  $z_i$  — зарядное число  $i$ -го иона,  $C_i$  — его концентрация,  $U_i$  — электрофоретическая подвижность.

В порах капиллярной системы (в порах мембраны) для бинарного симметричного электролита числа переноса катиона и аниона равны

$$n_+ = \frac{C_+ U_+}{C_+ U_+ + C_- U_-}, \quad n_- = \frac{C_- U_-}{C_+ U_+ + C_- U_-}. \quad (8.72)$$

Для отрицательно заряженной поверхности в диффузном слое двойного электрического слоя (ДЭС)  $C_+ > C_-$ , поэтому если отношение подвижностей ионов близко, то  $n_+ > n_-$ .

С уменьшением радиуса капилляра (поры мембраны) происходит увеличение числа переноса противоиона и уменьшение числа переноса коиона.

Способность изменять числа переноса характерна как для гетерогенных капиллярных систем, так и для гомогенных мембран, изготовленных из ионообменных смол, в которых электричество переносится практически целиком подвижными противоионами. Фиксированные в матрице ионы не участвуют в переносе. Мембраны, изменяющие число переноса, называются электрохимически активными или ионоселективными. Такие мембраны используются для процесса электродиализа, широко применяемого для обессоливания питьевых и сточных вод, а также для извлечения (концентрирования) ценных ионов.

На рис. 8.22 представлена трехкамерная ячейка для электродиализа. Ячейка разделена на три камеры электрохимически активными мембранами. Знаком «минус» отмечена отрицательно заряженная мембрана (проводящая преимущественно катионы), знаком «плюс» — положительно заряженная мембрана, проводящая анионы.

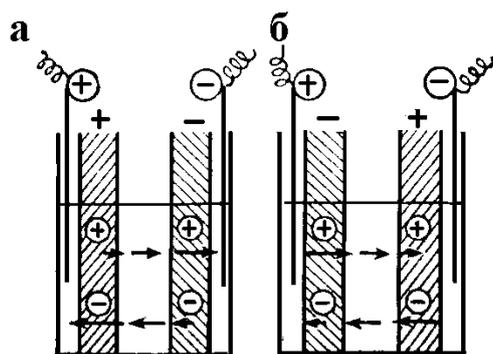


Рис. 8.22. Схема электродиализа: а) очистка средней камеры от электролита; б) концентрирование электролита в средней камере

Пусть все камеры в начальный момент времени заполнены одним и тем же раствором электролита. Под действием приложенной разности потенциала в ячейке, представленной на рис. 8.22, а, катионы перемещаются из средней камеры в правую, а анионы — из средней камеры в левую. Обратный поток ионов запрещен либо проводимостью мембран, либо расположением катода и анода. В результате, в средней камере будет происходить очистка раствора от электролита.

В ячейке, изображенной на рис. 8.22, б, наоборот, катионы будут перемещаться из левой камеры в среднюю, анионы — из правой в среднюю. Таким образом, концентрация соли в средней камере будет возрастать.

В настоящее время электродиализ все шире применяется для регенерации кислот в травильных отделениях метизных заводов. Образующиеся там стоки представляют большую опасность для окружающей среды. Они содержат минеральные кислоты, ионы тяжелых металлов, смазочные масла, взвешенные примеси и др. При сбросе неочищенных стоков в водоеме резко увеличивается содержание взвешенных веществ, значительная часть которых осаждается вблизи места выпуска. Отложения осадка в водоеме могут достигать нескольких десятков сантиметров и служить источником вторичного загрязнения. Параллельно с этим отмечается уменьшение прозрачности и появление специфической бурой окраски воды, происходит ухудшение кислородного режима. Поступление токсичных веществ наряду с наличием высоких концентраций мелкодисперсной взвеси, при-

водит к гибели водных организмов и нарушению естественных процессов самоочищения. Особо неблагоприятные условия могут создаваться при сбросе таких стоков в водохранилище. Наблюдаемое в зарегулированных водоемах слабое перемешивание и замедленное течение приводят к резкому ухудшению санитарно-гигиенического состояния водного объекта.

На рис. 8.23 приведена принципиальная схема регенерации травильных кислот с помощью электродиализа.

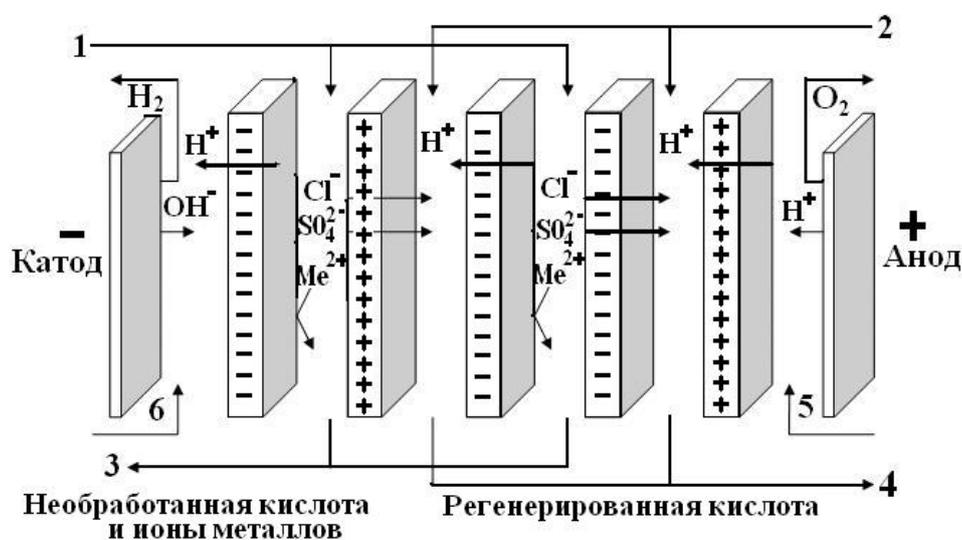


Рис. 8.23. Функциональные принципы электродиализной регенерации травильных кислот: 1 — дилуат (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ионы металлов); 2 — концентрат (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>); 3 — электролизер; 4 — резервуар сбора регенерированной кислоты; 5 — промывка анода; 6 — промывка катода

В электрическом поле блока электродиализа катионы и анионы мигрируют по направлению к противоположно заряженным электродам. При этом положительно заряженные ионы диффундируют через отрицательно заряженные мембраны, но они отражаются (не пропускаются) положительно заряженными мембранами. Противостоящая поляризация следующей мембранной пары предотвращает дальнейшее перемещение ионов, и анионы (кислотные остатки) и катионы водорода объединяются, чтобы дать свободную кислоту (концентрат). Концентрат может перерабатываться до тех пор, пока не достигает номинальной концентрации ванн травления.

Технологические схемы электродиализных установок (ЭДУ) состоит из следующих узлов: 1) аппаратов предварительной подготовки исходной воды; 2) собственно электродиализной установки; 3) кислотного хозяйства и системы сжатого воздуха; 4) фильтров, загруженных активированным углем БАУ или АГ-3, и бактерицидных установок.

Различают электродиализные установки двух типов: прокладочные и лабиринтные. Электродиализаторы прокладочного типа (ЭДУ-50, ЭХО-М-5000Х200, «Родник-3») имеют горизонтальную ось электрического поля; их пропускная способность 2 – 20 м<sup>3</sup>/ч. Электродиализаторы лабиринтного типа (Э-400М, ЭДУ-2, ЭДУ-1000, АЭ-25) имеют вертикальную ось электрического поля; их пропускная способность 1 – 25 м<sup>3</sup>/ч.

В практике обессоливания и очистки воды применяют следующие типы установок:

- прямоточные ЭДУ, в которых сточная вода последовательно или параллельно проходит через аппараты установки и солесодержание воды снижается от исходного до заданного за один проход;

- циркуляционные (порционные) ЭДУ, в которых определенный объем частично обессоленной воды из бака дилюата перекачивается через мембранный электродиализный аппарат обратно в бак до тех пор, пока не будет достигнута необходимая степень обессоливания;

- циркуляционные ЭДУ непрерывного действия, в которых часть сточной воды непрерывно смешивается с частью не полностью обессоленной воды (дилюата), проходит через электродиализатор и подается потребителю или в резервуар очищенной воды;

- ЭДУ с аппаратами, имеющими последовательную гидравлическую систему движения потоков в рабочих камерах.

Каждая из указанных выше технологических схем имеет определенные преимущества и недостатки, и их выбор производится на основании технико-экономических расчетов. Исходными параметрами для расчета являются: конкретные местные условия, пропускная способность ЭДУ солесодержание и состав обрабатываемых сточных вод. Например, при су-

точном расходе более 300 – 500 м<sup>3</sup> сточных вод считается рациональным применение технологических схем проточного типа.

Мембраны для электродиализаторов изготавливают в виде гибких листов прямоугольной формы или рулонов из термопластичного полимерного связующего и порошка ионообменных смол.

Оптимальная область применения электродиализаторов — при концентрации солей в сточной воде 3 – 8 г/л. Во всех конструкциях электродиализаторов в основном применяют электроды, изготовленные из платинированного титана. Для эффективной работы аппаратов большое значение имеет промывка приэлектродных камер, что предохраняет крайние мембраны.

### ***Задание 8***

Ответьте на вопросы:

1 Через какие параметры водного раствора можно управлять ионно-электростатической энергией взаимодействия коллоидных примесей при их коагуляции?

2 Что такое константа Гамакера?

3 Какие члены входят в уравнение для энергии взаимодействия гидрофильных коллоидов?

4 Объясните, когда флокулянт может приводить не к агрегации, а к увеличению агрегативной устойчивости системы?

5 Какими уравнениями чаще всего описывают процесс адсорбции молекулярно растворенных примесей из сточных вод на поверхности адсорбентов?

6 Какое практически важное правило используют при выборе адсорбента?

7 Какой тип пор преобладает в активированных углях, используемых в водоочистке?

8 На чем основана возможность регенерации ионообменников?

9 Как работает аппарат непрерывного действия при ионном обмене?

10 Что такое числа переноса ионов?

11. Назовите стадии процесса очистки сточных вод путем коагуляции солями алюминия. Какие виды кинетики коагуляции при этом реализуются?

12. В чем заключается принцип действия электродиализатора?

13. Какой электрохимический метод можно предложить для очистки сточных вод, содержащих цианиды и роданиды?

Выполните расчет по приведенным данным:

1. Сточная вода машиностроительного производства (расход 10000 м<sup>3</sup>/сут) содержит ряд примесных ионов: Cr<sup>3+</sup> — 60 мг/л, Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> — 6 мг/л, Zn<sup>2+</sup> — 78, Cd<sup>2+</sup> — 40 мг/л, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> — 180 мг/л. Рассчитайте ионнообменные установки, используя рекомендации СНиП.

2. В эксперименте по выбору адсорбента для удаления фульвокислот из питьевой воды были получены следующие значения величины адсорбции (а, мг/г) при равновесных концентрациях (С<sub>р</sub>, мг/л):

С <sub>р</sub> , мг/л	20,5	31	52	65
а, мг/г	1,4	1,9	2,95	3,25

Постройте изотерму адсорбции, определите ее тип. Рассчитайте константу адсорбционного равновесия и величину предельной адсорбции (при плотном заполнении монослоя).

## 9. БИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

В данном разделе будут рассмотрены биологические методы, традиционно используемые в практике водоочистки.

### 9.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Биологические (биохимические) методы очистки сточных вод основываются на естественных процессах жизнедеятельности гетеротрофных (гетеро — иное, в отличие от неорганического углерода, пи-

тание) микроорганизмов. Выделяют три свойства микроорганизмов, широко используемые для целей водоочистки:

1) способность потреблять в качестве источников питания органические (и некоторые неорганические) соединения для получения энергии и обеспечения своего функционирования;

2) свойство быстро размножаться — удвоение числа клеток за каждые 30 минут. Расчеты показывают, что за 5 – 7 дней 1 вид микроорганизмов может заполнить все моря и океаны;

3) способность образовывать колонии и скопления, которые сравнительно легко можно отделить от очищаемой воды.

Механизм изъятия из раствора и последующей диссимиляции субстрата носит многоступенчатый характер:

1) сорбционное изъятие и накопление изымаемого вещества на поверхности клетки;

2) перемещение через клеточную оболочку либо самого вещества, либо продуктов его гидролиза, либо гидрофобного комплекса;

3) метаболическая трансформация поступивших внутрь клетки питательных веществ.

Ранее считалось, что механизм переноса (2) — диффузионный. С началом метаболических превращений сорбционное равновесие нарушается, и за счет градиента концентраций обеспечивается дальнейшее поступление субстрата в клетку. В настоящее время полагают наличие гидрофильного «канала», через который внутрь клетки проходят гидрофильные субстраты. Может быть «эстафетная» передача молекул субстрата от одной функциональной группы к другой. Другая альтернативная модель — наличие гидрофобного мембранного переносчика, который путем конформационных изменений, вызываемых субстратом, проводит его на внутреннюю сторону мембраны (модель конформационной транслокации).

Таким образом, происходит процесс «активного» транспорта, приводящего к повышению содержания питательных веществ в клет-

ке против градиента концентраций. Необходимая энергия высвобождается в результате протекания в клетке метаболических процессов.

На третьем этапе в аэробных условиях происходят метаболические превращения субстрата частично в такие конечные продукты как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , нитраты, сульфаты (процесс окисления органических веществ), частично в новые микробные клетки (процесс синтеза биомассы). В анаэробных условиях могут образовываться промежуточные продукты (спирты, глицерин, летучие жирные кислоты, бутанол, ацетон, водород), а также такие продукты как  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и новые клетки.

Рассмотрим процесс биохимического изъятия и окисления органических соединений. Он основывается на двух положениях теории ферментативной кинетики: 1) фермент и субстрат вступают во взаимодействие друг с другом, образуя фермент-субстратный комплекс, который в результате одной или нескольких трансформаций приводит к появлению продуктов, снижающих барьер активации катализируемой реакции за счет ее дробления на ряд промежуточных этапов, каждый из которых не встречает энергетических препятствий; 2) в конце процесса фермент выходит в неизменном виде и способен вступать во взаимодействие со следующей молекулой субстрата.

Процесс записывается в виде следующих выражений:

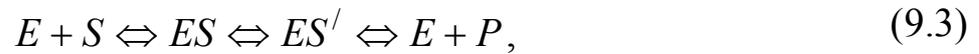


где  $E$  — фермент (энзим),  $S$  — субстрат,  $ES$  — фермент-субстратный комплекс,  $P$  — продукт реакции.

Промежуточное соединение  $ES$  подвергается дальнейшим ферментативным преобразованиям. В простейшем случае в результате трансформации комплекса образуется продукт реакции  $P$  и фермент  $E$  (выражение (9.2)):

Чаще распаду комплекса предшествует его химическое преобразование (активирование), которое составляет еще одну (или несколь-

ко) промежуточную стадию (стадий), что выражается уравнением Михаэлиса-Ментен



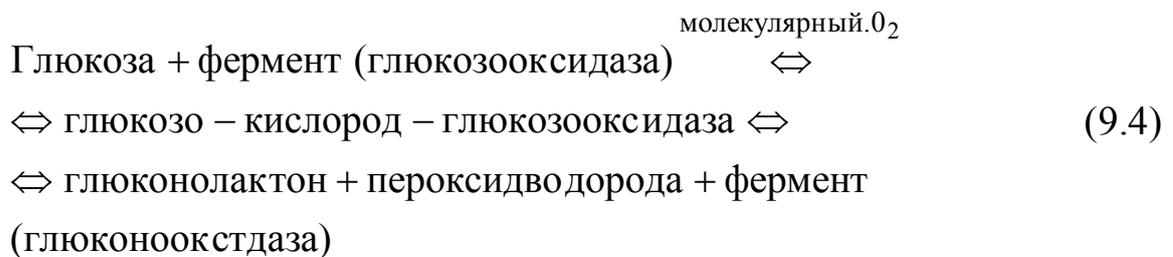
где  $ES'$  — преобразованный фермент-субстратный комплекс.

На рис. 9.1 представлен пример извлечения глюкозы из раствора, содержащего также фруктозу, сахарозу, мальтозу, крахмал.



Рис. 9.1.Схема узнавания ферментом субстрата, образование фермент-субстратного комплекса и катализ

Представленный процесс можно записать словами как



Образовавшийся глюконолактон подвергается гидролизу с образованием глюконовой кислоты. Суммарно обе реакции можно выразить уравнением



Пероксид водорода под действием фермента каталазы (или пероксидазы) расщепляется на воду и кислород, т. е.



Процессы биохимического окисления у гетеротрофных микроорганизмов делят на три группы в зависимости от того, что является конечным акцептором водородных атомов или электронов, отщепляемых от окисляемого субстрата. Если акцептор кислород, то процесс называется клеточным дыханием; если акцептор водорода органическое вещество, то — брожение; если акцептор водорода неорганическое вещество (типа нитратов, сульфатов), то — анаэробное дыхание. Ферментативное анаэробное расщепление белков и аминокислот — гниение.

Представляют интерес основные закономерности колонии микроорганизмов, вводимой в контакт с жидкостью, содержащей питательные вещества при достаточном обеспечении ее растворенным кислородом. Можно выделить следующие фазы (рис. 9.2):

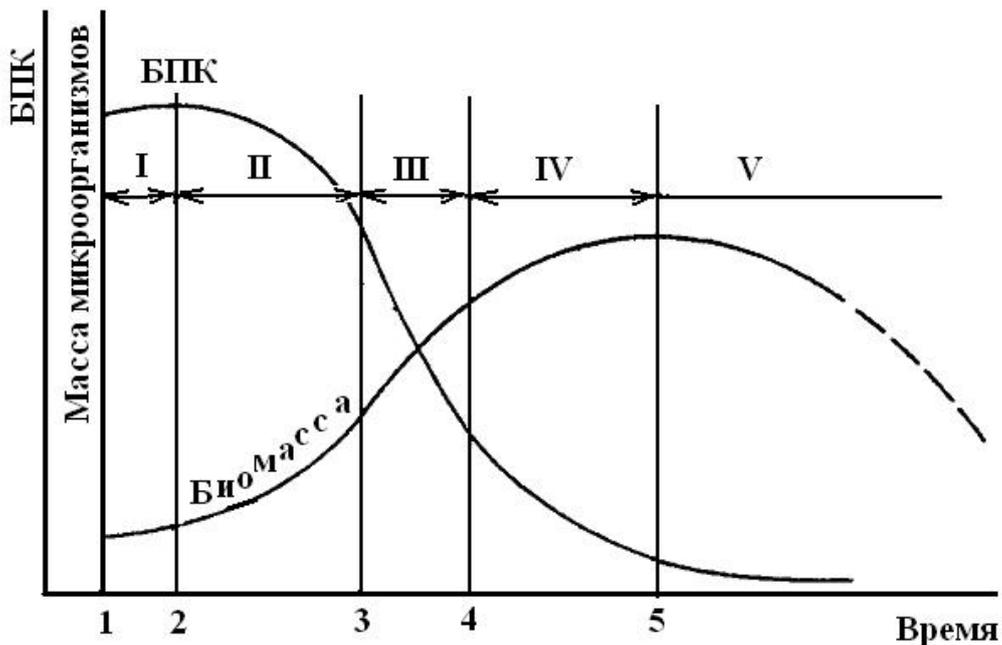


Рис. 9.2. Зависимость прироста биомассы в аэробных условиях от концентрации питательных веществ

I — лаг-фаза (фаза адаптации) — сразу после введения микробной культуры в контакт с питательной средой. Не происходит прироста биомассы. Длительность зависит от природы органических веществ, степени адаптации микроорганизмов к ним, от условий, в которые вносятся биомасса.

II — фаза экспоненциального роста — избыток питательных веществ, отсутствие (недостаток) продуктов обмена.

III — фаза замедленного роста — истощение питательных веществ, накопление продуктов метаболизма.

IV — фаза нулевого роста (прекращения роста) — равновесие между наличием питательных веществ и накоплением биомассы.

V — фаза эндогенного дыхания (самоокисления) — из-за недостатка питания начинается отмирание и распад клеток, что приводит к снижению общего количества биомассы в биореакторе.

### *Аэробный процесс*

В условиях аэробного метаболизма около 90 % потребляемого кислорода используется на дыхательный путь получения энергии

клетками микроорганизмов (процесс называется клеточным дыханием, если акцептором водородных атомов или электронов, отщепляемых от окисляемого субстрата, является кислород).

Аэробный процесс окисления является наиболее полным, поскольку его продукты — вещества, не способные к дальнейшему разложению в микробной клетке и не содержащие запаса энергии, которая могла бы быть высвобождена обычными химическими реакциями. Главные из этих веществ — диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) и вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Несмотря на то, что оба эти вещества содержат кислород, химический путь их образования в клетке может быть различным. Углекислый газ может получаться в результате биохимических процессов, протекающих в бескислородной среде под действием ферментов декарбоксилаз, которые отщепляют  $\text{CO}_2$  от карбоксильной группы ( $\text{COOH}$ ) кислоты. Вода образуется в результате жизнедеятельности клеток путем соединения кислорода воздуха с водородом тех органических веществ, от которых он отщепляется в процессе их окисления.

В аэробном процессе липиды (в присутствии бактерий и грибов) подвергаются гидролизу с образованием глицерина и жирных кислот, затем происходит их биохимическая деструкция до предельных карбоновых кислот (муравьиной, уксусной, пропионовой, масляной), а впоследствии, до углекислого газа и воды. Углеводы под действием микроорганизмов разлагаются до глюкозы, которая затем окисляется. Белки под влиянием микроорганизмов и экзоферментов гидролизуются с образованием полипептидов, расщепляющихся до аминокислот, которые в присутствии микроорганизмов-аммонификаторов разлагаются с образованием аммиака,  $\text{CO}_2$  и воды. Если в белковых соединениях присутствует сера, то при разложении могут образоваться тиоспирты (меркаптаны) и сульфат-ионы. Фосфор органических соединений (входящий в состав клеточных мембран, нуклеиновых кислот) окисляется до минеральных фосфатов и, взаимодействуя с ионами металлов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и др.), осаждается.

### *Анаэробный процесс*

На рис. 9.3 представлена упрощенная схема анаэробного сбраживания биоорганических соединений.

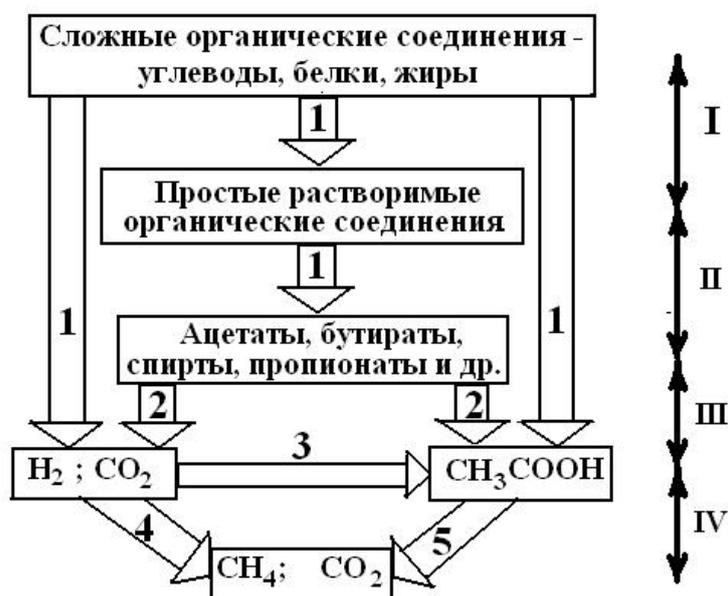


Рис. 9.3. Схема анаэробного метанового сбраживания сложных биоорганических соединений: I — гидролиз; II — кислотогенез (ацидогенез); III — ацетогенез; IV — метаногенез; 1 — ферментативные кислотогены; 2 — ацетогены, образующие  $H_2$ , 3 — ацетогены, использующие  $H_2$ ; 4 — метаногены, восстанавливающие  $CO_2$ ; 5 — метаногены, использующие ацетат

Стадия ферментативного гидролиза осуществляется быстрорастущими факультативными анаэробами, выделяющими экзоферменты, при участии которых осуществляется гидролиз нерастворенных сложных биоорганических соединений с образованием более простых растворенных веществ. Оптимальное значение pH для развития этой группы бактерий находится в интервале 6,5 – 7,5.

Стадия кислотообразования (ацидогенная) сопровождается выделением летучих жирных кислот, аминокислот, спиртов, а также водорода и углекислого газа. Стадия осуществляется быстрорастущими, весьма устойчивыми к неблагоприятным условиям гетерогенными бактериями.

Ацетогенная стадия превращения летучих жирных кислот (ЛЖК), аминокислот и спиртов в уксусную кислоту осуществляется двумя группами ацетогенных бактерий. Первая группа, образующая ацетаты с выде-

лением водорода из продуктов предшествующих стадий, называется ацетогенами, образующими водород:  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$ .

Вторая группа, также образующая ацетаты и использующая водород для восстановления диоксида углерода, называется ацетогенами, использующими водород:  $4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$ .

Метаногенная стадия, осуществляется медленно растущими бактериями, являющимися строгими анаэробами, весьма чувствительными к изменениям условий среды, особенно к снижению pH менее 7,0 – 7,5 и температуры. Разные группы метаногенов образуют метан двумя путями:

- расщеплением ацетата:  $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{CO}_2$ ;
- восстановлением диоксида углерода:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ .

По первому пути образуется 72 % метана, по второму 28 %. Таким образом, анаэробное разложение органических веществ осуществляется сообществом микроорганизмов, составляющих трофическую цепь первичных и вторичных анаэробов, причем продукты метаболизма одних групп бактерий используются другими. Первичные факультативные анаэробы осуществляют стадии гидролиза и кислотообразования, вторичные — стадии ацетогенеза и метаногенеза из субстратов, образующихся первичными анаэробами.

Исследования показали, что зачастую тип метаболизма зависит не столько от наличия кислорода в среде, сколько от концентрации субстрата (см. табл. 9.1).

Таблица 9.1

**Тип метаболизма в зависимости от концентрации субстрата и кислорода**

Кислород	Глюкоза	
	Низкие концентрации	Высокие концентрации
Высокие концентрации	1) $R_s = 1,2 \text{ мМ}/(\text{мг}\cdot\text{ч})$ ; $R_p = 0,04 \text{ мМ}/(\text{мг}\cdot\text{ч})$ 98 % дыхание	1) $R_s = 7,6 \text{ мМ}/(\text{мг}\cdot\text{ч})$ ; $R_p = 9,7 \text{ мМ}/(\text{мг}\cdot\text{ч})$ Преобладает брожение
Низкие концентрации	1) $R_s = 2,2 \text{ мМ}/(\text{мг}\cdot\text{ч})$ ; $R_p = 3,5 \text{ мМ}/(\text{мг}\cdot\text{ч})$	1) $R_s = 18,2 \text{ мМ}/(\text{мг}\cdot\text{ч})$ ; $R_p = 20 \text{ мМ}/(\text{мг}\cdot\text{ч})$

	80 % брожение	Преобладает брожение
--	---------------	----------------------

Примечание:  $R_s$  — удельная скорость потребления глюкозы;  $R_p$  — удельная скорость образования этанола

Из табл. 9.1 видно, что в условиях избытка глюкозы этанол вырабатывается дрожжами *Candida Utilis* при любых концентрациях кислорода. Удельная скорость потребления глюкозы и удельная скорость образования этанола зависели как от концентрации кислорода, так и от концентрации глюкозы.

При концентрации растворенных органических загрязнений, выражаемых в БПК<sub>полн</sub><sup>1</sup>, менее 1000 мг/л, наиболее выгодно применение аэробных методов очистки. При БПК<sub>полн</sub> от 1000 до 5000 мг/л экономические показатели аэробных и анаэробных методов будут практически одинаковыми. При БПК<sub>полн</sub> свыше 5000 мг/л более целесообразным будет применение анаэробных методов. При этом, однако, следует принимать во внимание не только концентрацию загрязнений, но и расходы сточных вод, а также то, что анаэробные методы приводят к образованию таких конечных продуктов, как метан, аммиак, сероводород и др., поэтому качество очищенной воды будет значительно ниже качества воды, очищенной аэробными методами. Поэтому при высоких концентрациях загрязнений применяется сочетание анаэробных методов на первых ступенях (первой ступени) и аэробных методов на последней ступени.

## 9.2. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ

Для аэробной очистки сточных вод используют естественные и искусственные сооружения. К первым относятся поля орошения, поля фильтрации, биологические пруды. Поля орошения — это участки земли, подготовленные для естественной биологической очистки сточных вод и выращивания сельскохозяйственных растений. Поля фильтрации — участки земли, приспособленные для естественной биологической очистки сточных вод путём фильтрации их через поч-

<sup>1</sup> БПК<sub>полн</sub> — биохимическое потребление кислорода полное

венные горизонты. Это система подземных канав в суглинистых грунтах, в каждой из которых под площадкой со щебнем необходимо установить фильтрующий слой из песка, в котором проложены дренажные трубы. Биологические пруды представляют собой искусственно созданные водоемы для биологической очистки сточных вод, основанной на процессах, которые происходят при самоочищении водоемов. При отсутствии хорошо фильтрующих почв для устройства полей фильтрации или полей орошения пруды могут быть использованы как самостоятельные сооружения для очистки сточных вод, а также для их доочистки в сочетании с другими очистными сооружениями. Пруды делают небольшой глубины — от 0,5 до 1 м. Это позволяет создать значительную поверхность соприкосновения воды с воздухом и обеспечить прогрев всей толщи воды и хорошее ее перемешивание. Таким образом, создаются благоприятные условия для массового развития водных организмов, в частности планктонных водорослей, которые ассимилируют биогенные элементы и в результате процесса синтеза обогащают воду кислородом, необходимым при окислении органических веществ.

К основным искусственным сооружениям, в которых проводят биологическую очистку сточных вод в аэробных условиях, относятся аэротенки, окситенки и биофильтры. В этих сооружениях используются активная биомасса — активный ил, взвешенный в воде, и биопленка, прикрепленная к зернам инертной загрузки.

Биомасса активного ила или биопленки образует сложный биоценоз, представленный бактериями, простейшими, грибами, водорослями и некоторыми многоклеточными, такими как коловратки, черви, личинки насекомых.

В аэротенках и биофильтрах разные условия для жизнедеятельности, поэтому и разный состав обитающих микроорганизмов с преобладанием числа видов в биопленках. В то же время в аэротенках большее число типов бактерий.

Основная задача бактерий — первичная трансформация и разложение растворенных органических веществ. Также они участвуют в разложении взвешенных органических веществ посредством синтеза внеклеточных ферментов. Обычное содержание бактерий в активном иле  $10^{10} - 10^{12}$  на литр (или  $10^8 - 10^{14}$  клеток на 1 г сухого вещества).

Грибы конкурируют с бактериями за источники питания. Преимущество обычно оказывается на стороне бактерий. Развитию грибов способствует низкое значение pH. В биофильтрах грибов обычно больше, чем в активном иле.

Водоросли в основном обнаруживаются на поверхности биофильтров, поскольку там реализуются благоприятные условия для их развития (свет и питание), а также в биопрудах.

Простейшие — обычные обитатели биофильтров. В аэротенках чем ниже нагрузка на ил, тем больше простейших. Простейшие паразитируют на бактериях, поедают грибы и водоросли, взвешенные органические вещества, поддерживают в иле бактериальное равновесие, поедая наряду с молодыми и старые клетки. Таким образом, простейшие обуславливают омоложение ила. Кроме того, в воду высвобождается дополнительное количество экзоферментов. Поглощая взвешенные примеси, простейшие также способствуют дополнительному осветлению воды. В иле хорошо работающих аэротенков обычно присутствует 10–15 видов простейших. Любое нарушение в работе аэротенка приводит к снижению их числа, преобладанию одного или двух видов, изменению размера и подвижности организмов.

Многоклеточные предпочитают биофильтры и активный ил при низкой нагрузке. В биореакторах можно обнаружить коловраток, ракообразных, различного вида насекомых.

Видовой состав бактерий биопленки практически не отличается от активного ила. Существуют различия в составе фауны. Так, в биопленке в большом количестве развиваются черви, потребляющие в качестве питания избыточную биомассу. Прорывая ходы в биопленке, черви облегчают доступ кислорода к глубоким слоям.

В определенные периоды года в биопленке развивается множество прожорливых личинок и куколок насекомых, которые поедают биопленку.

Активный ил имеет вид хлопьевидной массы со средним размером частиц 1 – 4 мм. Очень развитая поверхность хлопьев активного ила ( $\sim 100 \text{ м}^2/\text{г}$  сухого вещества) обуславливает их высокую адсорбционную способность – уже через несколько минут после начала контакта ила со сточной водой основная масса загрязнений сорбируется хлопьями. Последующий процесс окисления происходит значительно медленнее, чем изъятие веществ из сточной воды.

На рис. 9.4 представлен вид флоккулы активного ила под микроскопом. Флоккулы состоят из микроорганизмов, органических и неорганических частиц. Они склеиваются полимерным веществом, выделяемым бактериями. Наличие плотных флоккул правильной формы, содержащих простейшие, указывают на здоровое состояние биомассы. При ингибировании или других нарушениях режима простейшие погибают одновременно с разрушением структуры флоккул. Нитчатые бактерии (на данном рисунке не видны) понижают осаждаемость флоккул и их способность концентрироваться.

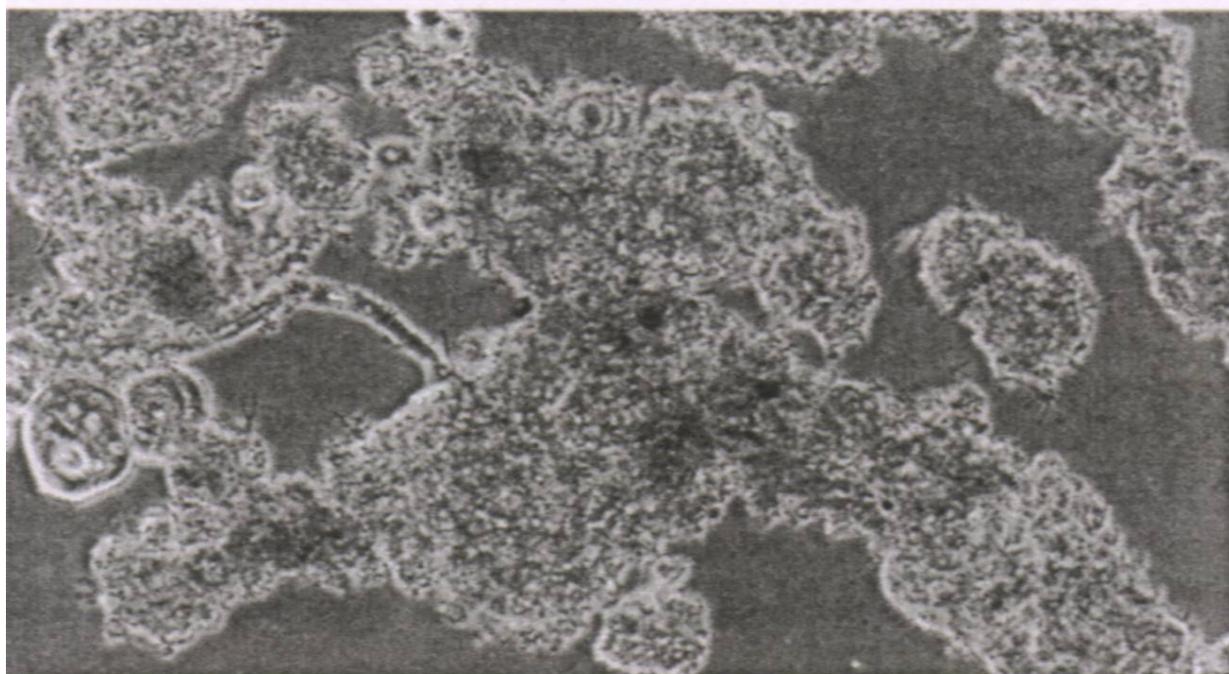


Рис. 9.4. Флокулы активного ила под микроскопом  
(увеличение в 200 раз)

Для нормальной жизнедеятельности организмов активного ила необходимо достаточное количество биогенных элементов – азота и фосфора. Должно соблюдаться определенное соотношение между БПК, азотом и фосфором. Ориентировочное соотношение  $\text{БПК} : \text{N} : \text{P} = 100 : 5 : 1$ .

### 9.2.1. Очистка сточных вод в аэротенках

Процесс аэробной очистки сточных вод в аэротенке схематически представлен на рис. 9.5.

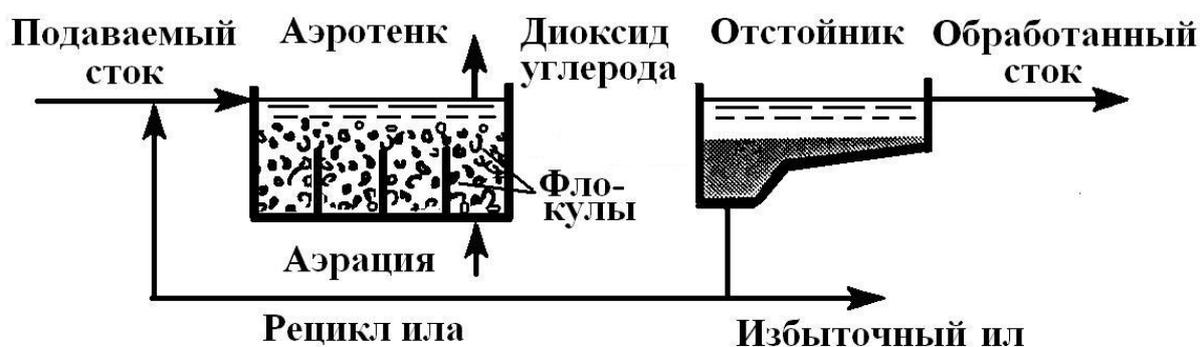


Рис. 9.5. Схема очистки сточных вод с активным илом

На входе в аэротенк в сточную воду подается активный ил. В первые минуты их контакта происходит адсорбционное изъятие органических примесей, за ним следует стадия окисления, которая требует аэрации воды. В процессе окисления органических веществ (а также фагоцитоза взвешенных примесей) происходит регенерация активного ила и нарастание его массы. Разделение очищенной воды и активного ила происходит во вторичном отстойнике. Оттуда часть ила возвращают в аэротенк (рециркулирующий ил), другую часть отводят из установки (избыточный ил). Отделение активного ила можно проводить также путем флотации или фильтрации (см. ниже).

Аэротенк представляет собой железобетонный аэрируемый резервуар — открытый бассейн, оборудованный устройствами для принудительной аэрации. Аэротенки бывают одно-, двух-, трех-, четырехкоридорными глубиной 2 – 5 м.

К сточным водам, подаваемым на очистку в аэротенки, предъявляют ряд требований. Основные из них — это требования к температуре воды ( $T$ ), рН, концентрации взвешенных примесей ( $C_{\text{взв. прим}}$  и концентрации нефтепродуктов ( $C_{\text{нефт}}$ ):  $6\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $6,5 < \text{pH} < 9$ ;  $C_{\text{взв. прим}} \leq 150\text{ мг/л}$ ;  $C_{\text{нефт}} < 25\text{ мг/л}$ .

Аэротенки классифицируют по разным признакам. Ниже приведены основные виды классификации:

1. По гидродинамическому режиму:

- аэротенки-вытеснители,
- аэротенки-смесители,
- аэротенки промежуточного типа;

2. По способу введения сточных вод и возврата активного ила:

- с вводом воды и активного ила в начале первого и выводом в конце последнего коридора (прямоточные),
- с рассредоточенным поступлением воды и возвратного активного ила по длине первого коридора и отводом очищенной воды и активного ила в конце последнего коридора,
- с равномерным поступлением сточной воды и возвратом активного ила по всей длине аэротенка и равномерным отводом иловой смеси по всей длине аэротенка;

3. По способу диспергирования воздуха:

- аэротенки с пневматической аэрацией,
- аэротенки с механической аэрацией (импеллерные, цилиндрические и центробежные аэраторы),
- аэротенки с пневмомеханической аэрацией;

4. По способу регенерации активного ила:

- аэротенки с отдельной регенерацией,
- аэротенки без отдельной регенерации;

5. По нагрузке на активный ил:

- высоконагружаемые (для неполной очистки),
- обычные и низконагружаемые (с продленной аэрацией);

6. По количеству ступеней:

- одноступенчатые,
- двухступенчатые,
- многоступенчатые;

7. По режиму ввода сточных вод:

- проточные,
- полупроточные,
- с переменным рабочим уровнем,
- контактные;

8. По конструктивным признакам:

- прямоугольные,
- круглые,
- комбинированные,
- противоточные,
- шахтные,
- фильтротенки,
- флототенки.

Рассмотрим два типа аэротенков — аэротенк-смеситель и аэротенк–вытеснитель.

#### ***Аэротенк-смеситель***

Аэротенк-смеситель (А-С) — это сооружение, в котором поступающие сточные воды и активный ил почти мгновенно перемешиваются со всей массой иловой смеси резервуара. Конструктивной особенностью А-С является рассредоточенный выпуск смеси сточных вод и активного ила и такой же выпуск ее (вдоль длинных сторон коридора) (рис. 9.6). Обеспечивается равномерное распределение активного ила и растворенного кислорода. Во всех точках объема А-С устанавливается одинаковая концентрация органических веществ.

Поскольку поступающие сточные воды разбавляются существенно очищенной водой, содержащейся в аэротенке, то можно подавать в него сточную воду с относительно высокой концентрацией загрязнений.

Аэротенки-смесители используют для очистки концентрированных сточных вод, обычно при БПК не выше 1000 мг/л, хотя допускается и до 3000 мг/л.

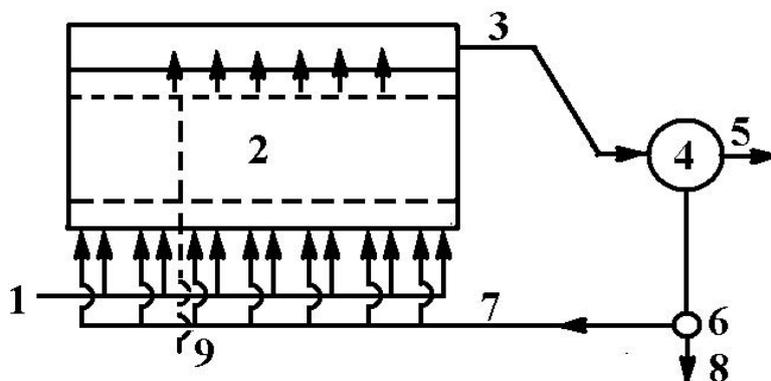


Рис. 9.6 Аэротенк-смеситель с рассредоточенным подводом воды и ила вдоль сооружения: 1 — сточная вода после первичных отстойников, 2 — аэротенк, 3 — иловая смесь из аэротенка, 4 — вторичный отстойник, 5 — очищенная вода, 6 — иловая камера, 7 — циркуляционный активный ил, 8 — избыточный активный ил, 9 — воздух из воздуходувки

К недостаткам А-С относятся:

- а) сложная система впуска и выпуска жидкости;
- б) сравнительно низкая средняя удельная скорость окисления (поскольку концентрация загрязнений в иловой смеси находится на уровне значений, предъявляемых к очищенной воде). Окислительная мощность аэротенка-смесителя меньше, чем аэротенка-вытеснителя.

#### **Аэротенк-вытеснитель**

Аэротенк-вытеснитель (А-В) — коридорное сооружение, в котором сточные воды проходят последовательную очистку без полного смешения со всем объемом жидкости в резервуаре (рис. 9.7). Здесь глубина очистки сточных вод является функцией расстояния, пройденного жидкостью от точки впуска. Но такой режим осуществляется только при соотношении общей длины аэротенка к ширине более 30 — 40. Гидродинамический режим движения жидкости приближается к

режиму вытеснения в резервуаре, разделенном перегородками на 6 – 8 последовательно работающих секций.

Особенностью А-В является то, что микроорганизмы активного ила в процессе очистки сточной воды находятся в разных физиологических стадиях своего развития. На начальной стадии процесса наблюдается избыток питательных веществ, на конечной — их недостаток. В связи с этим кислород подают в большом количестве в начало аэротенка с постепенным снижением к концу его. Поскольку загрязнения со сточными водами подаются неравномерно, то задача распределения кислорода по длине А-В становится сложной. При залповом поступлении токсичных для активного ила компонентов сточных вод (что характерно для многих стоков) применение А-В нецелесообразно, поскольку нарушается работа биоценоза активного ила. Он теряет свою активность, вспухает и вследствие этого выносятся из вторичного отстойника. В результате этого А-В на продолжительный период выходит из нормального режима.

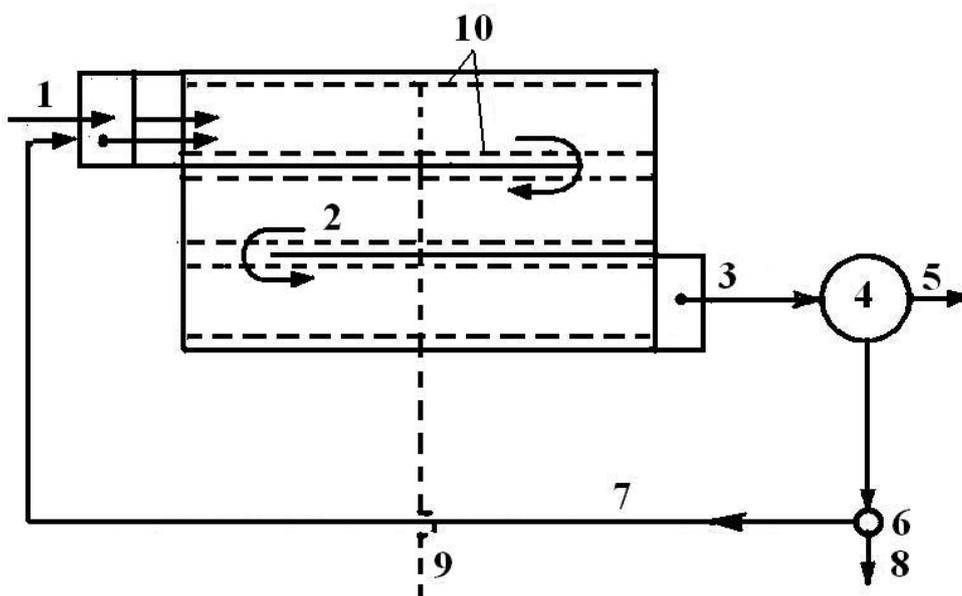


Рис. 9.7. Аэротенк-вытеснитель: 1 — сточная вода после первичных отстойников, 2 — аэротенк, 3 — иловая смесь из аэротенка, 4 — вторичный отстойник, 5 — очищенная вода, 6 — иловая камера, 7 — циркуляционный активный ил, 8 — избыточный активный ил,

9 — воздух из воздуходувок, 10 — аэрационная система для подачи и распределения воздуха в аэротенке

Регенерацию активного ила следует предусматривать при  $BPK_{\text{полн}}$  свыше 150 мг/л, а также при наличии в воде вредных производственных примесей. На рис. 9.8 представлены схемы аэротенков-вытеснителей с регенерацией и без регенерации.

Один из возможных путей интенсификации работы аэрационных сооружений — повышение нагрузки на активный ил до величины, превосходящей 0,8 гБПК / г ила в сутки, но при этом падает эффективность очистки сточных вод.

Высоконагружаемые аэротенки целесообразно применять на первой ступени двухступенчатой очистки сточных вод, а также тогда, когда рациональна утилизация избыточного активного ила (кормовая добавка для животноводства, сырье для активированного угля и т. п.).

При очистке сточных вод химической, гидролизной и некоторых других отраслей промышленности высокие нагрузки на ил приводят к полному перерождению ила, образуется культура грибов, которая при большой скорости (~30 – 40 м/ч) хорошо отделяются микрофилтрованием.

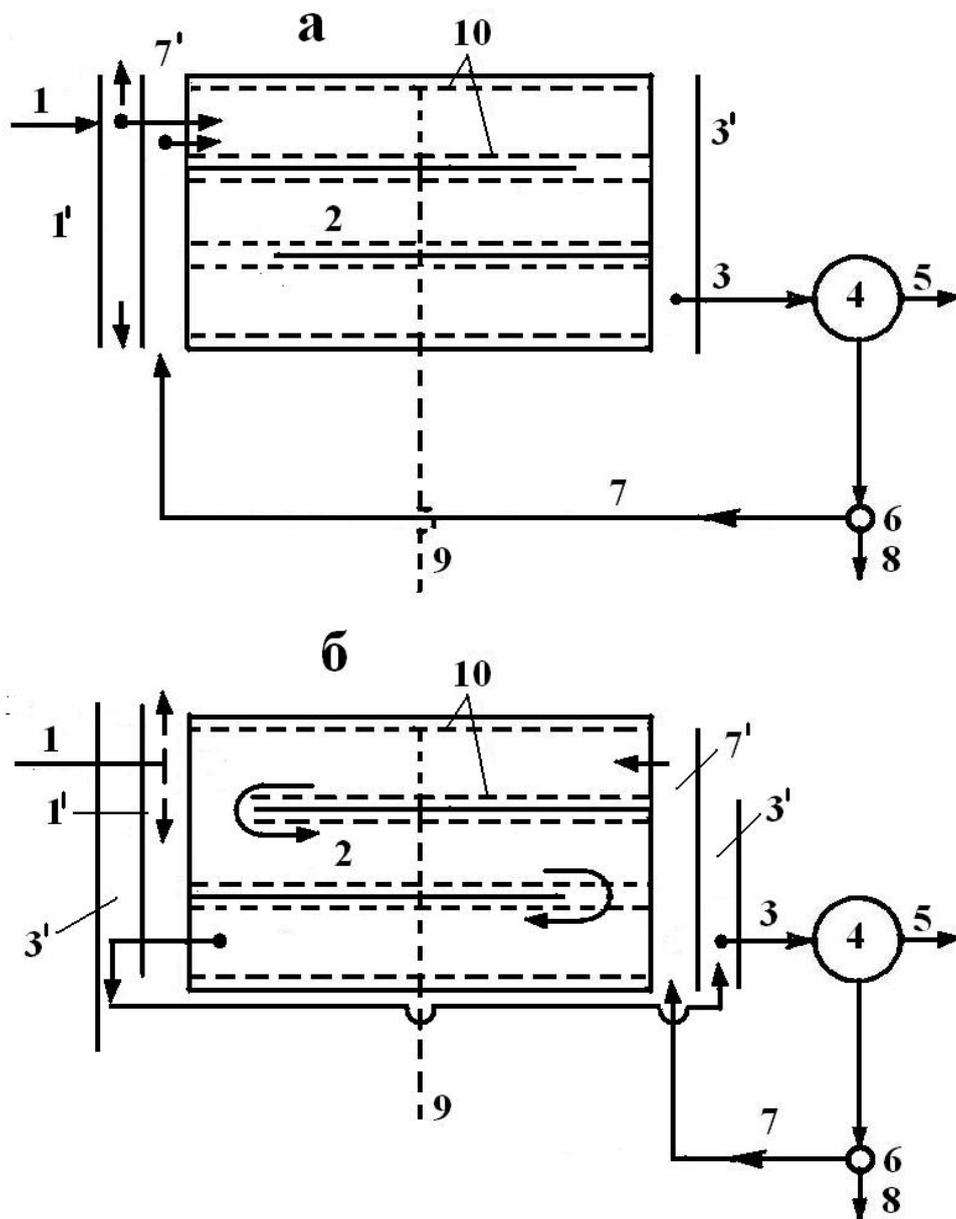


Рис. 9.8. Аэротенк-вытеснитель с регенерацией (а) и без регенерации (б):  
 1 — сточная вода после первичных отстойников, 1' — канал сточной воды на биологическую очистку, 2 — аэротенк, 3 — иловая смесь из аэротенка, 3' — канал иловой смеси, 4 — вторичный отстойник, 5 — очищенная вода, 6 — иловая камера, 7 — циркуляционный активный ил, 7' — канал циркуляционного активного ила, 8 — избыточный активный ил, 9 — воздух из воздуходувок, 10 — аэрационная система для подачи и распределения воздуха в аэротенке

Высоконагружаемый ил имеет плохие седиментационные свойства, вследствие этого разделение иловой смеси целесообразно проводить методами флотации.

Низконагружаемые (или так называемые аэротенки с продленной аэрацией) получили применение в основном для очистки малых количеств сточных вод (до 1000 м<sup>3</sup>/сут).

Процесс биоочистки можно интенсифицировать путем увеличения рабочей дозы активного ила при сохранении нагрузки на ил.

Основой для разработки методов двух- и многоступенчатой биологической очистки сточных вод является культивирование на очистных станциях активных илов. Приспособленных к окислению отдельных групп органических загрязнений. Чем полнее адаптация активного ила к данному виду загрязнений, тем эффективней процесс биоочистки.

Учитывая свойственную сточным водам промышленных предприятий большую неравномерность состава и расхода, в качестве первой ступени двухступенчатых сооружений целесообразно применять аэротенки-смесители (при этом также снижается концентрация токсичных для микроорганизмов веществ).

Поскольку после первой ступени неравномерность в составе воды значительно сглаживается, то для второй ступени целесообразно применение аэротенков-вытеснителей, которые позволяют полнее очистить сточные воды от оставшихся трудноокисляемых соединений.

При расчете аэротенков всех типов необходимо учитывать факторы, оказывающие влияние на скорость процесса: дозу ила, концентрацию загрязнений в исходной и очищенной воде, концентрацию растворенного кислорода, скорость окисления загрязнений, активность микроорганизмов ила. Кроме того, следует оценивать гидродинамическую структуру потоков в сооружениях.

***Расчет аэротенка-смесителя:***

Для аэротенков-смесителей сначала определяют удельную скорость окисления, мг БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества в 1 час

$$\rho = \rho_{max} \frac{L_{оч} \cdot C_{O_2}}{L_{оч} \cdot C_{O_2} + K_\ell \cdot C_{O_2} + K_{O_2} \cdot L_{оч}} \cdot \frac{1}{1 + \varphi \alpha_i}, \quad (9.7)$$

где  $\rho_{max}$  — максимальная скорость окисления, мг/(г·ч), (см. табл. 9.2);  $L_{оч}$  — БПК<sub>полн</sub> очищенной воды, мг/л;  $C_{O_2}$  — концентрация растворенного кислорода, мг/л;  $K_\ell$  — константа, характеризующая свойства органических загрязняющих веществ, мг БПК<sub>полн</sub>/л, (табл. 9.2);  $K_{O_2}$  — константа, характеризующая влияние кислорода, мг O<sub>2</sub>/л (табл. 9.2);  $\varphi$  — коэффициент ингибирования продуктами распада активного ила, л/г (табл. 9.2),  $\alpha_i$  — доза ила, г/л, определяемая технико-экономическим расчетом с учетом работы вторичного отстойника.

Далее рассчитывают период аэрации  $t_{atm}$ , ч

$$t_{atm} = \frac{L_{ст} - L_{оч}}{\alpha_i(1 - S)\rho}, \quad (9.8)$$

где  $L_{ст}$  — БПК<sub>полн</sub> поступающей в аэротенк сточной воды, мг/л (с учетом снижения БПК при первичном отстаивании);  $S$  — зольность ила (табл. 9.2).;

Формула (9.8) справедлива при  $T = 15$  °С. При других значениях температуры ( $T' \neq 15$ °С) вводится поправка. Период аэрации с учетом поправки ( $t'$ ) равен

$$t' = t \cdot \frac{15}{T'} \quad (9.9)$$

Следует учитывать, что продолжительность аэрирования не должна быть менее двух часов.

Рабочий объем аэротенка-смесителя  $W'$ , м<sup>3</sup>, находят по формуле

$$W' = Q \cdot t \quad (9.10)$$

Таблица 9.2

**Параметры процесса аэробной очистки сточных вод при расчете аэротенка-смесителя**

Сточные воды	$\rho_{\max}$ , мгБПК <sub>полн</sub> / / (Г·ч)	$K_{\ell}$ мгБПК <sub>полн</sub> / / л	$K_{O_2}$ мг O <sub>2</sub> / л	$\varphi$ л / г	S
Городские	85	33	0,625	0,07	0,3
Производственные:					
а) нефтеперерабатывающих заводов:					
I система	33	3	1,81	0,17	-
II система	59	24	1,66	0,158	-
б) азотной промышленности	140	6	2,4	1,11	-
в) заводов синтетического каучука	80	30	0,6	0,06	0,15
г) ЦБП:					
сульфатно-целлюлозное про-во,	650	100	1,5	2	0,16
сульфитно-целлюлозное про-во	700	90	1,6	2	0,17
д) заводов искусственного волокна (вискозы)	90	35	0,7	0,27	-
е) фабрик первичной обработки шерсти:					
I ступень	32	156	-	0,23	-
II ступень	6	33	-	0,2	-
ж) дрожжевых заводов	232	90	1,66	0,16	0,35
з) заводов орг. синтеза	83	200	1,7	0,27	-
и) микробиопром:					
производство лизина	280	28	1,67	0,17	0,15
про-во биовита и витаминина	1720	167	1,5	0,98	0,12
к) свинооткормочных комплексов:					
I ступень	454	55	1,65	0,176	0,25
II ступень	15	72	1,68	0,171	0,3

Примечания: для других производств указанные параметры следует принимать по данным научно-исследовательских организаций.

### Расчет аэротенка-вытеснителя

Период аэрации  $t_{atv}$ , ч, в аэротенках-вытеснителях следует рассчитывать по формуле:

$$t_{atv} = \frac{1 + \varphi\alpha_i}{\rho_{\max} \cdot C_{O_2} \cdot \alpha_i \cdot (1-s)} \times \left[ (C_{O_2} + K_{O_2})(L_{mix} - L_{Oч}) + K_\ell \cdot C_{O_2} \cdot \ln \frac{L_{ст}}{L_{Oч}} \right] \cdot K_p, \quad (9.11)$$

где  $K_p$  — коэффициент, учитывающий влияние продольного перемешивания:  $K_p = 1,5$  при биологической очистке до  $L_{Oч} = 15$  мг/л;  $K_p = 1,25$  при  $L_{Oч} > 30$  мг/л;  $L_{mix}$  — БПК<sub>полн</sub>, определяемая с учетом разбавления рециркуляционным расходом:

$$L_{mix} = \frac{L_{ст} + L_{Oч} \cdot R_i}{1 + R_i}, \quad (9.12)$$

где  $R_i$  — степень рециркуляции активного ила, определяемая по формуле:

$$R_i = \frac{\alpha_i}{\frac{1000}{J_i} - \alpha_i}, \quad (9.13)$$

где  $\alpha_i$  — доза ила в эротенке, г/л;  $J_i$  — иловый индекс, см<sup>3</sup>/г.

Примечания: а) формула справедлива при  $J_i < 175$  см<sup>3</sup>/г и  $\alpha_i$  до 5 г/л; б) величина  $R_i$  должна быть не менее 0,3 для отстойников с илососами, 0,4 — с илоскребами, 0,6 — при самотечном удалении ила.

Величину илового индекса необходимо определять экспериментально при разбавлении иловой смеси до 1 г/л в зависимости от нагрузки на ил. Для городских и основных видов производственных вод допускается определять величину  $J_i$  по табл. 9.3.

Нагрузку на ил  $q_i$ , мг БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества в сутки, надлежит рассчитывать по формуле

$$q_i = \frac{24(L_{ст} - L_{Oч})}{\alpha_i(1-s) \cdot t_{at}}, \quad (9.14)$$

где  $t_{at}$  — период аэрации, ч.

Вместимость аэротенка-вытеснителя определяется как

$$W_{atv} = t_{atv} \cdot (1 + R_i) q_w, \quad (9.15)$$

где  $q_w$  — расчетный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/ч.

Таблица 9.3

**Параметры процесса аэробной очистки сточных вод для расчета аэротенка-вытеснителя**

Сточные воды	Иловый индекс $J_i$ , см <sup>3</sup> /г, при нагрузке на ил $q_i$ , мг/(г·сут)					
	100	200	300	400	500	600
Городские	130	100	70	80	95	130
Производственные:						
а) нефтеперерабатывающих заводов	-	120	70	80	120	160
в) заводов синтетического каучука	-	100	40	70	100	130
г) комбинатов искусственного волокна	-	300	200	250	280	400
д) целлюлозно-бумажных комбинатов	-	220	150	170	200	220
е) химкомбинатов азотной промышленности	-	90	60	75	90	120

Примечание: для окситенков величина  $J_i$  должна быть снижена в 1,3 – 1,5 раза.

**9.2.2. Биологическая очистка сточных вод с одновременным удалением углерода, азота и фосфора**

В настоящее время остро стоит проблема удаления из сточных вод избыточного количества азот- и фосфоросодержащих соединений. Она возникла в связи с ухудшением качества воды рек и водохранилищ, вызванным эвтрофикацией, которая обуславливается наличием избыточного количества питательных элементов в поверхностных слоях воды. Повышенное содержание биогенов вызывает усиленный рост водорослей и макрофитов, что мешает прохождению света

вглубь водоема, приводит к потреблению растворенного кислорода и созданию условий, несовместимых с жизнью теплокровных организмов.

Для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота и фосфора используют различные методы: механические, биологические (или биохимические), химические и физико-химические, электрохимические, глубокая очистка (доочистка после полной биологической очистки), термического обезвреживания, обеззараживания и обработка осадка.

В последние десятилетия предложены и реализуются методы биохимической очистки сточных вод с одновременным удалением углерода, азота и фосфора.

Среди наиболее известных за рубежом схем сооружений с активным илом, удаляющих одновременно соединения углерода, азота и фосфора, можно выделить  $A^2/O$  процесс (анаэробно–аноксидно–оксидная обработка), пятисекционный процесс Барденфо, и УСТ процесс (схема Кейптаунского университета) (рис. 9.9). Типичные характеристики и сравнение этих процессов даны в табл. 9.4. Преимущества и недостатки сооружений биологической очистки с одновременным удалением соединений углерода, азота и фосфора приведены в табл. 9.5.

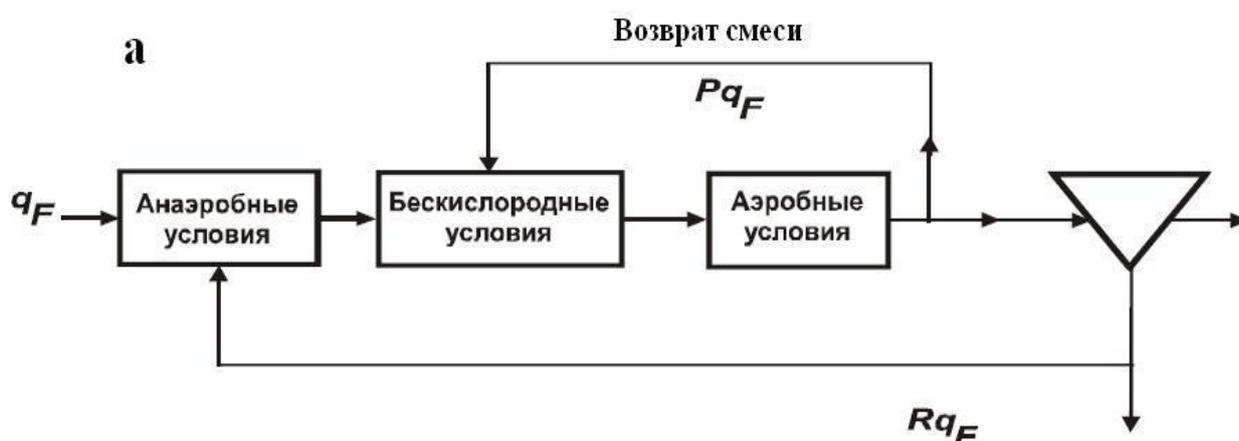


Рис. 9.9, а. Наиболее известные схемы для одновременного биологического удаления соединений азота, фосфора и углерода: а —  $A^2/O$  процесс

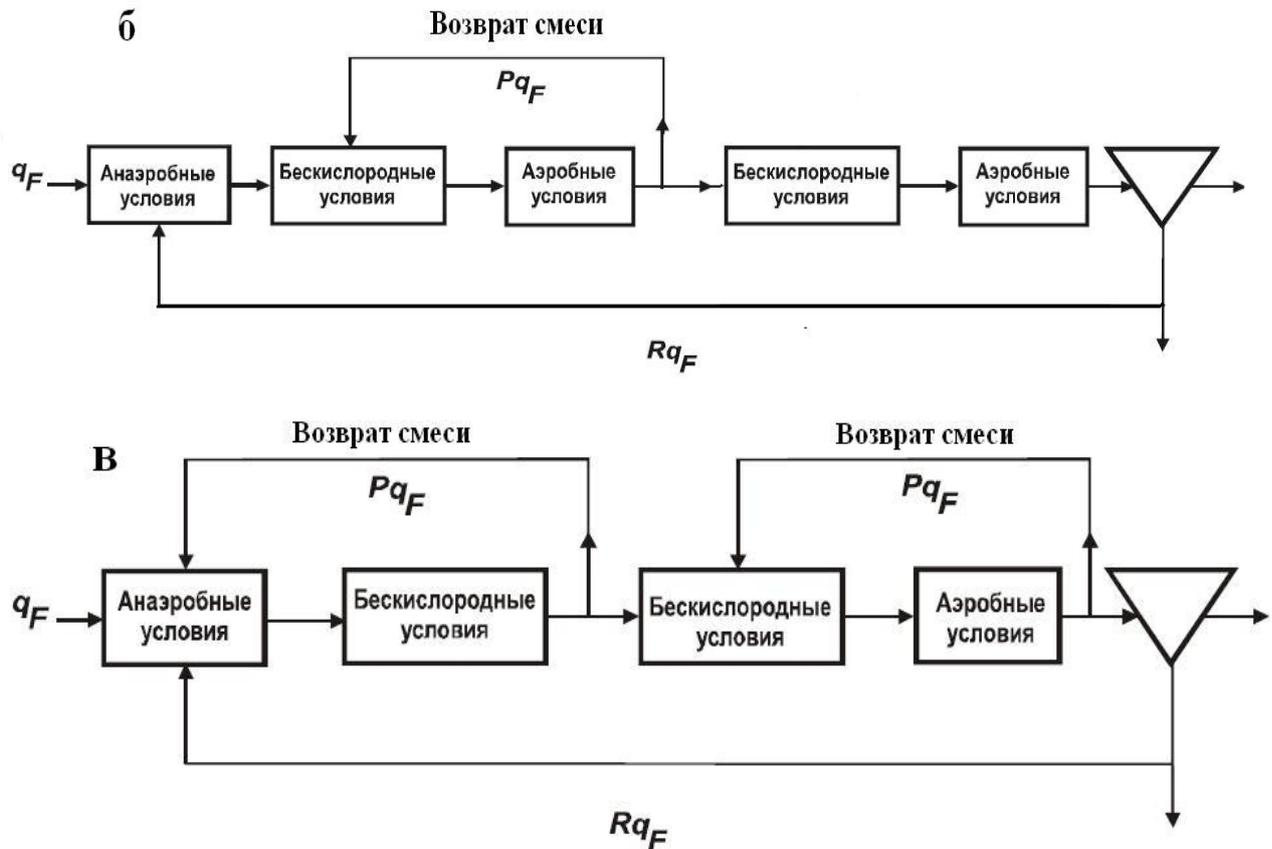


Рис. 9.9, б, в. Наиболее известные схемы для одновременного биологического удаления соединений азота, фосфора и углерода: б — пятисекционный процесс Барденфо, в — UCT процесс  $A^2/O$  процесс

Содержание фосфора в обычном активном иле в традиционных схемах биологической очистки составляет 0,01 – 0,015 г/г, вследствие чего снижение концентрации фосфора составляет 25 – 30 % от исходной концентрации в осветленной воде. Более глубокое удаление фосфора можно было бы осуществить за счет увеличения прироста ила, однако это вступает в противоречие с условиями нитрификации, требующими снижения прироста для существования нитробактерий. Остается единственная возможность — увеличить содержание фосфора в иле. Реализовать эту возможность удастся за счет создания попеременных анаэробно–аэробных условий в ходе биологической очистки.

В анаэробных условиях, предусматривающих отсутствие растворенного и химически связанного кислорода (в составе нитратов,



эффект биологического удаления фосфора возрастет до 60 – 70 %. Такой прием часто используется в современных схемах биологической очистки

Таблица 9.5

**Преимущества и недостатки сооружений биологической очистки с одновременным удалением соединений углерода, азота и фосфора**

Процесс	Преимущества	Недостатки
A <sup>2</sup> /O	Избыточный ил имеет высокое содержание фосфора (3–5 %) и может использоваться как удобрение.	При низких температурах очистка идет плохо
Пятисекционный Барденфо	Количество избыточного ила минимально. Ил имеет высокое содержание фосфора и может использоваться как удобрение. Общий азот снижается до минимального уровня.	Требует большие объемы сооружений и затраты электроэнергии чем A <sup>2</sup> /O. Первичный отстойник сокращает удаление азота и фосфора. Идет при высоких БПК/Р.
УСТ	Имеет несколько меньшие объемы сооружений, чем Барденфо.	Идет при высоких БПК/Р. Требует больших затрат электроэнергии на внутренние рециклы.

***Процесс Барденфо (Bardenpho)***

Пятисекционная схема включает анаэробную, две аноксидные и две аэробные стадии. Вторая аноксидная зона обеспечивает дополнительную денитрификацию с потреблением нитрата в качестве акцептора электронов, продуцированного в аэробной секции и органический углерод в качестве донора для электронов в ходе окислительно-восстановительной реакции. В конечной аэробной стадии газообразный азот уходит в атмосферу. Эта же стадия обеспечивает минимальный выход фосфора во вторичный отстойник. Смесь ила и сточной воды рециркулирует из первой аэробной зоны в аноксидную зону.

### ***УСТ процесс***

Возвратный ил сначала направляется в аноксидную зону для денитрификации, далее подается в анаэробную зону биоблока, где происходит вытеснение фосфатов в иловую смесь, затем потребление фосфора илом в аноксидных и аэробных зонах. Для данной схемы очистки характерно наличие маневренной зоны с мешалками и аэраторами, которая может служить продолжением денитрификатора, либо началом аэробной зоны в зависимости от условий протекания процесса (усиления денитрификации или для глубокой нитрификации).

Таким образом, не осуществляется подача нитратов в анаэробную зону, улучшая выделение фосфора в анаэробной зоне. Внутренний рецикл улучшает утилизацию органики в анаэробной стадии. Рецикл из аноксидной зоны обеспечивает оптимальные условия для ферментации.

Исследования показали, что приведенные схемы и их сравнительные характеристики, полученные за рубежом, не могут быть использованы без адаптации на очистных сооружениях городов России. Основной причиной является недостаточное количество биоразлагаемых веществ для реализации одновременно и процесса денитрификации и дефосфотизации.

### ***Задание 9***

1. Определите полезный объем аэротенка-смесителя и аэротенка-вытеснителя при следующих исходных данных: расход бытовых сточных вод равен  $100000 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; коэффициент неравномерности поступления стоков  $1,25$ ; степень рециркуляции ила  $Ri = 0,5$ ; БПК<sub>полн</sub> сточных вод  $L_{\text{ст}} = 300 \text{ мг/л}$ ; БПК<sub>полн</sub> очищенных вод  $L_{\text{оч}} = 15 \text{ мг/л}$ ;  $\rho_{\text{max}} = 85 \text{ БПК}_{\text{полн}} / (\text{г} \cdot \text{ч})$ ;  $K_{\ell} = 33 \text{ мг БПК}_{\text{полн}} / \text{л}$ ;  $K_{\text{O}_2} = 0,5 \text{ мг O}_2 / \text{л}$ ;  $\varphi = 0,07 \text{ л/г}$ .

## 10. ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Термические методы очистки сточных вод принято подразделять на высокотемпературные и низкотемпературные, а также на методы термического концентрирования и методы термического окисления.

В первой классификации интервалы температур, по которым происходит разделение методов, не определены. В одних случаях к низкотемпературным относят методы, основанные на вымораживании, а к высокотемпературным — основанные на выпаривании. В других случаях, низкотемпературным считают методы, проводимые при температуре около 100 °С, а к высокотемпературным — при 1000 °С.

### 10.1. ТЕРМИЧЕСКОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ

Методы термического концентрирования в основном применяются при очистке сточных вод от минеральных веществ.

Методы концентрирования включают две стадии: 1) собственно концентрирования; 2) выделение из концентрированного раствора твердых веществ. Следует отметить, что вторая стадия зачастую отсутствует, ее заменяют захоронением концентрированных отходов.

Для термического концентрирования применяют испарение (выпаривание), вымораживание и кристаллогидратные методы.

#### *Выпаривание*

Выпариванием называют процесс концентрирования жидких растворов практически нелетучих веществ путем частичного удаления растворителя испарением при кипении жидкости. В процессе выпаривания растворитель удаляется из всего объема раствора (при температуре ниже  $T_{\text{кип}}$  испарение происходит только с поверхности жидкости).

Принципиальная схема испарительной установки представлена на рис. 10.1.

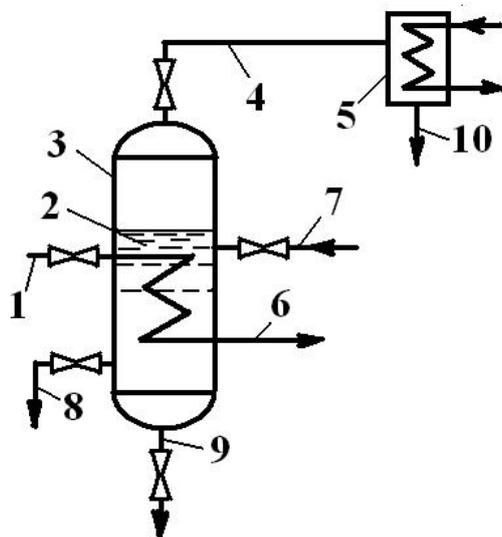


Рис. 10.1. Принципиальная схема испарительной установки:  
1 — линия подвода первичного пара, 2 — греющая секция, 3 — корпус испарителя, 4 — линия отвода образующегося (вторичного) пара, 5 — конденсатор, 6 — линия отвода конденсата первичного пара, 7 — линия подвода питательной воды, 8 — линия продувки, 9 — линия опорожнения, 10 — линия отвода дистиллята

В качестве греющего агента чаще всего используют водяной пар. Его называют греющим, или первичным. Первичный пар получают из парогенератора, а также используют отработанный пар, или пар промежуточного отбора паровых турбин.

Вторичным называют пар, образующийся при выпаривании кипящего раствора.

На рис. 10.1 показано, что образующийся вторичный пар поступает в конденсатор, где он и конденсируется. Вещества, загрязняющие воду, остаются в объеме испаряемой воды и удаляются из испарителя с отводимой (продувочной) водой. Дистиллят (конденсат вторичного пара) содержит очень незначительное количество нелетучих примесей, которые поступают в него за счет капельного уноса испаряемой воды.

Если выпаривание проводят под вакуумом, то процесс можно проводить при более низких температурах. Это важно при концентрировании растворов веществ, разлагающихся при повышенных температурах.

Выпаривание при атмосферном давлении (иногда и в вакууме) проводят в одноступенчатых и многоступенчатых установках. Расход тепла по пару составляет примерно 600 кДж на 1 кг влаги.

### ***Вымораживание***

Концентрирование сточных вод можно проводить путем вымораживания. При температуре ниже температуры замерзания чистая вода образует кристаллы льда, а между ними размещается концентрированный рассол. Вымораживание проводят либо в вакууме, либо с применением хладагента (аммиака, диоксида углерода, бутана, пропана, изобутана, хладонов —  $CCl_2F_2$ ,  $CCl_3F$ ,  $CClF_3$  и их оксидов)

### ***Кристаллогидратные процессы***

В кристаллогидратных процессах очистки сточных вод применяют гидратообразующие агенты (хлор, пропан, хладоны, диоксид углерода и др.). При образовании кристаллогидратов часть молекул воды переходит в их состав, поэтому концентрация растворенных веществ в оставшейся воде повышается. Сконцентрированную воду отделяют от кристаллогидратов, которые затем разрушают термическим методом. В результате образуется чистая вода и гидратообразующий агент, который вновь используют в процессе очистки.

Несмотря на достоинства процессов вымораживания и кристаллогидратного, (такие как низкий расход энергии, отсутствие накипеобразования, возможность обезвреживания вод различного состава), они не нашли широкого применения. Это связано с применением дорогостоящих теплоносителей, конструктивными сложностями установок, невысокой степенью концентрирования сточных вод.

## 10.2. ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ

Методы термического окисления применяют для очистки сточных вод от органических примесей. К методам термического окисления относят методы парофазного каталитического окисления, жидкофазного окисления, («мокрое» сжигание) и «огневой» метод (парофазное окисление).

### *Парофазное каталитическое окисление*

В методе парофазного каталитического окисления сточные воды, содержащие летучие органические вещества, подают в выпарной аппарат, где образуются пары воды и органических веществ. Эти пары вместе с горячим воздухом подают в аппарат, загруженный катализатором, в котором происходит процесс гетерогенного каталитического окисления паров органических веществ кислородом воздуха. Применяют медно-хромовый, медно-марганцевый, цинк-хромовый и другие катализаторы. Степень обезвреживания достигает 99,8 %. К недостаткам метода относится возможность отравления катализаторов соединениями фосфора, фтора и серы, поэтому их надо предварительно удалять из сточных вод.

### *Жидкофазное окисление*

В методе жидкофазного окисления органические примеси сточных вод окисляют кислородом при давлении 2 – 28 МПа и температуре 100 – 350 °С. Высокое давление необходимо для увеличения растворимости кислорода в воде (растворимость газов растет с ростом давления). Принципиальная схема установки для реализации метода жидкофазного окисления представлена на рис. 10.2.

Сточная вода смешивается с воздухом от компрессора, подается насосом в теплообменник, откуда поступает в печь, затем в реактор, в котором протекает высокотемпературного окисление. Вода и продукты окисления (газы, зола) направляются в сепаратор, где жидкость и газы разделяются. При высоких концентрациях органических веществ

в сточной воде подогрев воды в теплообменнике и печи необходим только на пусковой период.

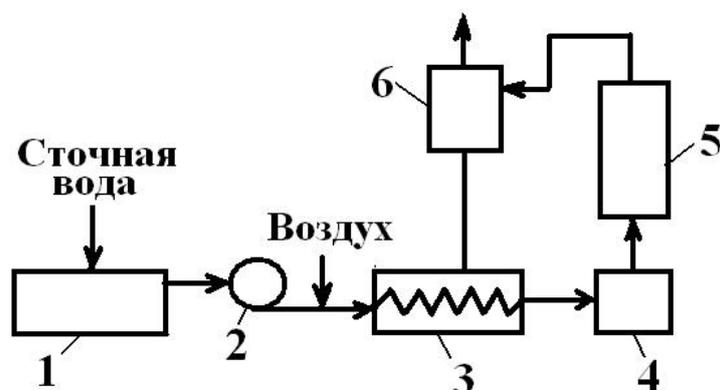


Рис. 10.2. Принципиальная схема аппарата для жидкофазного окисления: 1 — сборник, 2 — насос, 3 — теплообменник, 4 — печь, 5 — реактор, 6 — сепаратор

В результате окисления органических загрязнений образуются нетоксичные вещества. Метод пригоден для обработки больших объемов вод и достаточно безопасен. К недостаткам метода относится высокая стоимость оборудования, неполное окисление некоторых органических веществ, а также значительный коррозионный износ оборудования.

### ***Огневого метод***

При использовании огневого метода распыленную сточную воду вводят в нагретые до 900 – 1000 °С продукты сгорания топлива. Органические примеси сгорают, а минеральные выводятся из печи в твердом или расплавленном состоянии или уносятся с дымовыми газами.

В огневом методе используют циклонные и шахтные печи, а также с псевдоожиженным слоем. Наиболее эффективны циклонные печи. Принципиальная схема установки с циклонной печью представлена на рис. 10.3.

В циклонную печь воздух вводится тангенциально, поэтому он перемещается вдоль оси печи по спирали. Сточную воду подают через форсунку.

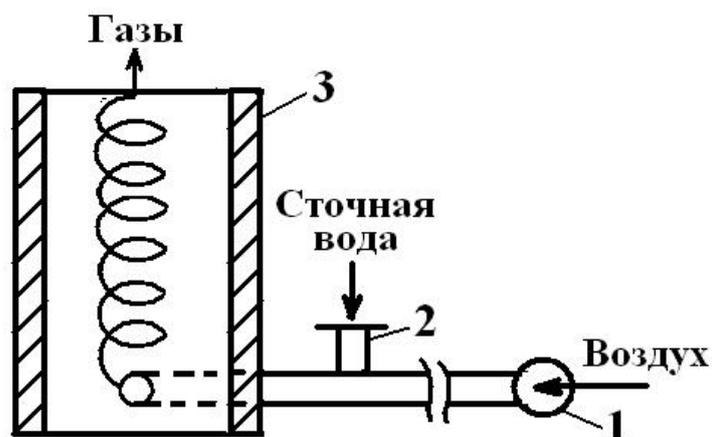


Рис. 10.3. Принципиальная схема установки для реализации огневого метода с циклонной печью: 1 — воздуходувка, 2 — питающее устройство, 3 — печь

### ***Задание 10***

Ответьте на вопросы:

1. Каким образом классифицируют термические методы очистки сточных вод?
2. Какие термические методы применяют для очистки сточных вод от минеральных веществ? От органических веществ?
3. При каких давлениях осуществляют жидкофазное термоокисление?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гудков А.Г. Механическая очистка сточных вод: Учеб. пособие, Вологда: ВоГТУ, 2003. 152 с.
2. Инженерная защита поверхностных вод от промышленных стоков: Учеб. пособие / Д.А. Кривошеин, П.П. Кукин, В.Л. Лапин и др. М.: Высшая школа, 2003. 344 с.
3. Колесников В.П., Вильсон Е.В. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях / Под ред. Акад. В.К. Гордеева-Гаврикова. Ростов-на-Дону: Юг, 2005. 212 с.
4. Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии. М.: Академия, 2006. 240 с.
5. СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения. М. 1986. 72 с.
6. Физико-химические основы технологии очистки сточных вод / А.К. Запольский, Н.А. Мишкова-Клименко, I.M. Астерлин и др.: Учеб. пособие. Киев.: Либра, 2000. 552 с.
7. Шкоропад Д. Е., Новиков О. П. Центрифуги и сепараторы для химических производств, М., 1987. 256 с.
8. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов: М.: АСВ, 2002. 704 с.

Автор

**Молодкина Людмила Михайловна** — профессор, доктор физико-математических наук, профессор кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета;

Молодкина Людмила Михайловна

# **МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ПИТЬЕВЫХ, ПРИРОДНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД**

**Учебное пособие**

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2 95 3005 – учебная литература

---

Подписано в печать \_\_\_\_\_ 2010. Формат 60x84/16 Печать  
цифровая

Усл. печ. п. \_\_\_\_ Уч. –изд. л. \_\_\_\_ Тираж \_\_\_\_ Заказ

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, представленного автором в  
цифровом типографском центре Издательства Политехнического  
университета:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Тел.: (812) 540-44-14

Тел./факс: (812) 927-57-76