

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования*  
**«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И.И. ПОЛЗУНОВА» (АлтГТУ)**

**Л. Ф. Комарова, В. А. Сомин**

**ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ГИДРОСФЕРЫ**

ISBN 978-5-7568-1319-7



**Учебное пособие**

*рекомендовано Алтайским государственным техническим университетом им. И. И. Ползунова в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению подготовки 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» (профиль «Инженерная экология»)*

**Издательство АлтГТУ**

**Барнаул**

**2019**

УДК 502.51:62(075.8)

Комарова Л. Ф. Инженерные методы защиты гидросферы [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л. Ф. Комарова, В. А. Сомин. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 16 МБ). – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2019. – Режим доступа : [http://elib.altstu.ru/uploads/open\\_mat/2020/Komarova\\_InzMetZashGidrosf\\_up.pdf](http://elib.altstu.ru/uploads/open_mat/2020/Komarova_InzMetZashGidrosf_up.pdf). – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7568-1319-7

В учебном пособии приведены характеристика водных ресурсов и возможности их использования. Рассмотрены шесть групп методов очистки загрязненных вод – гидромеханические, физико-химические, химические, электрохимические, термические и биохимические. В каждой из них даны физико-химические основы процессов, которые входят в указанные группы, приводятся варианты их проведения, используемое оборудование, технологические схемы очистки.

Учебное пособие предназначено для бакалавров по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие технологии в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» (профиль «Инженерная экология»).

Рецензенты: Винокуров Ю. И., д.г.н., профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН;  
Кормаков В. И., заместитель руководителя Верхне-Обского бассейнового водного управления, начальник отдела водных ресурсов по Алтайскому краю

© Комарова Л. Ф., Сомин В. А., 2019

© Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ</b> .....	<b>7</b>
1.1 Свойства и классификация водных ресурсов .....	7
1.2 Потребление воды .....	11
1.3 Характеристика сточных вод .....	16
1.4 Пути уменьшения количества сточных вод и их загрязненности .....	20
1.5 Классификация примесей в сточных водах .....	23
1.6 Качество воды водных объектов .....	27
1.7 Системы водоснабжения и водоотведения .....	33
1.8 Схемы использования воды на предприятиях .....	38
1.9 Методы очистки сточных вод .....	43
<b>ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД</b> .....	<b>48</b>
2.1 Сооружения первичной обработки вод .....	48
2.2 Процеживание .....	52
2.2.1 Процеживание через решетки .....	52
2.2.2 Процеживание на ситах .....	56
2.3 Отстаивание .....	58
2.3.1 Закономерности осаждения взвесей в воде .....	58
2.3.2 Осаждение частиц в песколовках .....	61
2.3.3 Осаждение примесей в отстойниках .....	66
2.3.4 Удаление осадков из песколовок и отстойников .....	81
2.3.5 Осветлители и отстойники с аэрацией .....	88
2.3.6 Удаление всплывающих примесей .....	93
2.4 Фильтрование .....	98
2.4.1 Механизм процесса фильтрования .....	98
2.4.2 Классификация фильтров и фильтровальных материалов .....	100
2.4.3 Основные конструкции фильтров .....	101
2.5 Центрифугирование .....	113
2.5.1 Гидроциклоны .....	113
2.5.2 Центрифуги .....	117
2.6 Схема механической очистки производственных сточных вод .....	119

<b>ГЛАВА 3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ .....</b>	<b>122</b>
3.1 Коагуляция и флокуляция .....	122
3.1.1 Физико-химические основы процессов .....	122
3.1.2 Сооружения коагуляции и флокуляции .....	126
3.2 Флотация .....	131
3.2.1 Физико-химические основы и способы флотации .....	131
3.2.2 Флотационные установки .....	134
3.3 Адсорбция .....	142
3.3.1 Физико-химические основы процесса .....	142
3.3.2 Статическая адсорбция .....	146
3.3.3 Динамическая адсорбция .....	148
3.3.4 Адсорбционные аппараты и схемы адсорбционных установок .....	150
3.3.5 Методы регенерации адсорбентов .....	154
3.4 Ионный обмен .....	157
3.4.1 Физико-химические основы процесса .....	157
3.4.2 Установки ионного обмена .....	160
3.5 Экстракция .....	163
3.5.1 Физико-химические основы процесса .....	163
3.5.2 Методы экстрагирования .....	165
3.5.3 Технологические схемы и аппаратура для процессов экстракции .....	167
3.6 Мембранные методы .....	171
3.6.1 Физико-химические основы процессов .....	171
3.6.2 Микрофльтрация и ультрафльтрация .....	176
3.6.3 Обратный осмос и нанофльтрация .....	179
3.6.4 Установки обратного осмоса и нанофльтрации .....	182
3.7 Перегонка и ректификация .....	188
3.7.1 Перегонка и азеотропная отгонка .....	188
3.7.2 Ректификация и эвапорация .....	191
3.8 Обработка воды ультрафиолетом .....	195
<b>ГЛАВА 4. ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ .....</b>	<b>200</b>
4.1 Нейтрализация .....	200
4.1.1 Нейтрализация смешиванием .....	201
4.2.2 Нейтрализация добавлением реагентов .....	200
4.2.3 Нейтрализация фильтрованием кислых вод через нейтрализующие материалы .....	200
4.2.4 Нейтрализация дымовыми газами .....	200
4.2 Окисление .....	204
4.2.1 Окисление газообразным хлором и хлорсодержащими агентами .....	204

4.2.2 Окисление кислородом воздуха.....	207
4.2.3 Озонирование сточных вод.....	207
4.2.4 Радиационное окисление .....	213
4.3 Восстановление.....	215
<b>ГЛАВА 5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ</b>	
<b>СТОЧНЫХ ВОД.....</b>	<b>217</b>
5.1 Физико-химические основы методов .....	217
5.2 Электрокоагуляция и электрофлотация .....	219
5.3 Электрохимическое окисление и восстановление .....	223
5.4 Электродиализ .....	225
<b>ГЛАВА 6. ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ</b>	
<b>ВОД.....</b>	<b>228</b>
6.1 Концентрирование минерализованных сточных вод .....	228
6.2 Термоокислительные методы обезвреживания жидких	
отходов .....	234
<b>ГЛАВА 7. БИОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ</b>	
<b>ВОД.....</b>	<b>240</b>
7.1 Сущность метода биохимической очистки .....	240
7.2 Активный ил и биопленка .....	242
7.3 Закономерности распада органических веществ.....	243
7.4 Влияние различных факторов на процесс	
биохимической очистки.....	246
7.5 Аэробные методы очистки в естественных условиях .....	248
7.6 Аэробные методы очистки в искусственных условиях.....	252
7.6.1 Биофильтры.....	252
7.6.2 Аэротенки.....	256
7.6.2.1 Технологические схемы аэротенков.....	256
7.6.2.2 Система аэрации в аэротенках.....	261
7.6.2.3 Конструкции аэротенков .....	263
7.6.3 Технологические схемы биохимической очистки.....	270
7.7 Анаэробные методы очистки.....	273
7.8 Нитрификация и денитрификация.....	275
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>279</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Возрастающее антропогенное воздействие на природную среду привело к существенному изменению состояния водных объектов. Происходит их истощение и загрязнение в процессе использования воды человеком как в производственной деятельности, так и в быту. Вода изменяет свои природные свойства, загрязняется веществами минерального и органического происхождения, в т.ч. токсичными и возбудителями инфекционных заболеваний. Такую воду нельзя направлять в промышленное производство или сбрасывать в водные объекты без очистки.

В целях сокращения поступления загрязнений в биосферу и поддержания качества окружающей среды на должном уровне сформулирована концепция сначала безотходной (малоотходной), а затем и ресурсосберегающей технологии. Она подразумевает разработку и внедрение технологических процессов с комплексной переработкой исходного сырья и замкнутой системой водооборота, что отражается в создании наилучших доступных технологий (НДТ) в различных отраслях промышленного производства.

Охрана и рациональное использование водных ресурсов представляют собой важную проблему в современной промышленной экологии. Прекращение сброса сточных вод в водоемы, увеличение объема оборотного водоснабжения и мощности очистных сооружений с обеспечением полной очистки загрязненных вод возможно только на основе знаний инженерных методов обезвреживания и переработки жидких промышленных отходов и бытовых сточных вод.

# ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

## 1.1 Свойства и классификация водных ресурсов

*Водные ресурсы* являются одним из самых востребованных и жизненно необходимых видов природных ресурсов. Вода нужна не только всем живым организмам, она участвует в разнообразных процессах неживой природы и используется в различных сферах производственной деятельности.

Примерно 70 % поверхности Земли покрыты водой, объем которой оценивается в 1400 млн. км<sup>3</sup>. При этом 98 % представлено солеными водами Мирового океана и лишь около 2 % приходится на пресные воды, большая часть из которых сосредоточена в ледниках на южном и северном полюсах планеты, в горных районах и практически не используется человеком. Доступной пресной воды в виде поверхностных и подземных источников весьма мало – это количество оценивается в 0,015 % от общих запасов вод.

Запасы подземных вод составляют примерно 38 млн. км<sup>3</sup>, это около 1,7 % от мирового объема, однако их использование связано с серьезными ограничениями при добыче.

*Общее потребление* пресной воды ежегодно растет во всех регионах мира: если в начале XX столетия человечество использовало 400 км<sup>3</sup> воды в год, то в настоящее время уже около 5000 км<sup>3</sup>, что составляет около 10 % объема мирового речного стока. В результате постоянно растущего водопотребления происходит истощение ресурсов пресных вод, которое сопровождается их загрязнением.

По данным ЮНЕСКО, обеспеченность водой на континентах Земли сильно отличается (таблица 1.1). Наименее обеспеченным водными ресурсами регионом является Африка, в то время как наиболее остро нехватка воды ощущается в Азии в связи с большим количеством проживающего населения. В России запасы доступной воды примерно в 5 раз выше, чем в среднем по миру.

Таблица 1.1 – Обеспеченность водой регионов мира

Континент	Территория, млн. км <sup>2</sup>	Население млн. чел.	Возобновляемые водные ресурсы км <sup>3</sup> /год	Обеспеченность	
				в пересчете на 1 км <sup>2</sup> тер- ритории тыс.м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup>	в пересчете на 1 человека м <sup>3</sup> /(чел.*год)
Южная Америка	17,9	315	12030	672	38190
Северная Америка	24,3	453	7890	324	174417
Азия	43,5	3445	13510	311	3922
Европа	10,5	685	2900	277	4234
Австралия и Океания	9,0	29	2404	269	83763
Африка	30,1	708	4050	134	5720
<b>Россия</b>	<b>17,1</b>	<b>147</b>	<b>4275</b>	<b>250</b>	<b>29082</b>
Мир	135,3	7600	42785	316	5630

Мировое потребление воды в конце XX, начале XXI века значительно увеличилось (рисунок 1.1) во всех областях: сельском хозяйстве, промышленности, бытовом использовании.

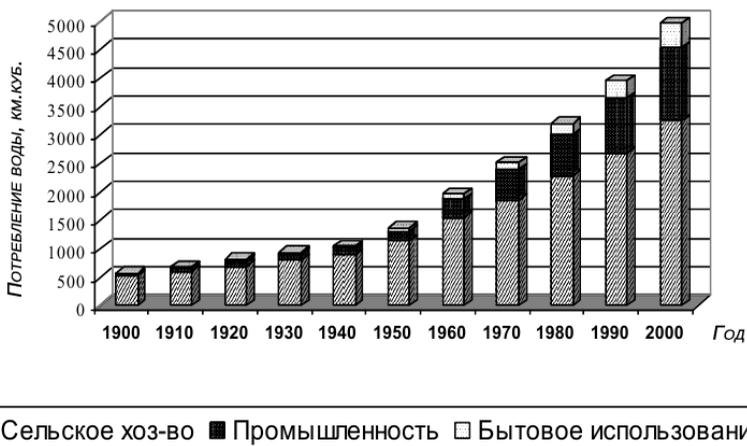


Рисунок 1.1 – Изменение водопотребления в мире

Качественный и количественный состав природных вод формируется под влиянием естественных процессов. В зависимости от степени минерализованности воды делятся на категории от пресных до рассолов (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация вод по минерализации

Категория вод	Минерализация, г/дм <sup>3</sup>
Рассолы	50
Соленые	25-50
Солоноватые	1-25
Пресные	< 1

Как правило, к пресной относят воду с минерализацией до 1,0 г/дм<sup>3</sup>.

Морская вода в океанах характеризуется примерным постоянством качественного солевого состава, в котором основную массу составляют ионы натрия, магния, калия, кальция, хлора, сульфата, карбоната, серы, преобладающим из которых является хлор.

В морях вода имеет различное содержание солей: так, наименее солёной является вода Финского залива, входящего в акваторию Балтийского моря, а наиболее – вода Красного моря, восточной части Средиземного моря, Черного моря.

В воде растворяются вещества, с которыми она контактирует. Содержание ионов кальция и магния обуславливает *общую жесткость* воды, которая выражается в мг-экв/л или ммоль-экв/л. Источником этих ионов являются природные залежи известняков, гипса и доломитов, они поступают в воду в результате взаимодействия растворенного диоксида углерода с минералами, при других процессах растворения и химического выветривания горных пород, а также в результате микробиологических процессов, протекающих в почвах. Обычно в поверхностных водоемах преобладает жесткость, обусловленная ионами кальция (до 70 %). Общая жесткость воды подразделяется на карбонатную и некарбонатную. *Карбонатная* связана с наличием в воде карбонатов и бикарбонатов кальция и магния, а *некарбонатная* – остальных солей этих катионов (сульфатов, нитратов, хлоридов и др.).

При использовании воды для питьевых нужд порог вкуса для иона кальция находится в диапазоне от 2 до 6 мг-экв/л, в зависимости от соответствующего аниона, для ионов магния этот порог значительно ниже. Высокое значение жесткости (более 10 мг-экв/л) ухудшает органолептические свойства воды, придавая ей горьковатый вкус и оказывая отрицательное действие на органы пищеварения.

Природные воды по преобладающему аниону делятся на три класса: *гидрокарбонатные*, *сульфатные* и *хлоридные* (классификация

Алёкина О.А.). Внутри каждого класса выделяют три группы по преобладанию одного из катионов: кальций, магний или натрий.

Природные воды традиционно делятся на три вида, сильно различающиеся по наличию примесей. *Атмосферная* – вода, находящаяся в атмосфере в виде водяного пара или взвешенных продуктов его конденсации (капель, ледяных кристаллов), характеризуется сравнительно небольшим количеством примесей, главным образом, растворенными газами, и почти не содержит растворенных солей (мягкая вода).

*Поверхностные* воды – речные, озерные, морские, ледниковые – имеют значительно более широкую гамму примесей, в том числе различные соли кальция, магния, натрия, калия, присутствующие в виде хлоридов, сульфатов, карбонатов от следовых количеств до полного насыщения.

*Подземные воды* находятся в толще горных пород верхней части земной коры и поступают на поверхность суши из скважин, колодцев, ключей, гейзеров. Характеризуются разнообразием состава растворенных солей, которые в свою очередь, зависят от химического состава почв и горных пород, с которыми вода контактирует. Фильтрующая способность последних обуславливает высокую прозрачность вод и отсутствие в них примесей органического происхождения.

Полярная асимметричная *структура молекулы воды* обуславливают ее удивительные аномальные физические свойства, что выделяет ее из других веществ. Вода остается жидкостью в температурном интервале, наиболее подходящем для жизни. Вместе с тем, на Земле вода может находиться одновременно в *трех агрегатных состояниях* – твердом, жидком и газообразном, что делает нашу планету уникальной. При этом вода в твердой фазе (лед) легче, чем в жидкой, так как наибольшей плотности она достигает при охлаждении до 4 °С. Из-за этого свойства водоемы редко промерзают до дна, так как покрывающий их лед предохраняет от быстрого промерзания и тем самым сохраняет жизнь в зимнее время.

Физические свойства воды в большинстве своем уникальны и резко выражены по сравнению с такими же свойствами других веществ. Вода имеет самую высокую по сравнению с другими жидкостями *теплоемкость, удельную теплоту парообразования, теплопроводность*. Следствием этих свойств является медленное нагревание и охлаждение воды, что в значительной мере и определяет ее воздействие на климат нашей планеты.

В силу особенностей строения молекулы воды, для которой характерна значительная полярность, она имеет высокую *диэлектрическую проницаемость*, что делает ее очень хорошим *растворителем*. Из-за этого она в природных условиях практически никогда не бывает чистой, а содержит различные растворенные примеси. Поэтому она является главным участником глобального круговорота веществ в био-

сфере и играет важнейшую роль в формировании состава природных вод.

По химическим свойствам вода представляет собой *реакционно-способное вещество*, вступающее в реакции с соединениями различных классов – галогенами, щелочными металлами, атомарным кислородом и др.

Вода также обладает исключительно большим *поверхностным натяжением*. Молекулы на ее поверхности испытывают действие межмолекулярного притяжения с одной стороны. Так как у воды силы межмолекулярного взаимодействия аномально велики, то каждая «плавающая» на поверхности воды молекула как бы втягивается внутрь слоя воды. В частности, этим свойством объясняется поднятие воды в почве и в капиллярах растений.

В отличие от других естественных богатств вода находится в непрерывном движении, совершая *круговорот*, который связывает все воды Земли и делает их ресурсы практически неисчерпаемыми. Началом круговорота является ее испарение с поверхности морей, океанов и континентов, происходящее под действием солнечной энергии и создающее атмосферную влагу. Часть испарившейся воды переносится воздушными течениями на большие расстояния и выпадает в виде дождя или снега, питая реки, озера, подземные воды, поглощаясь почвой, в итоге вода возвращается в моря и океаны. В процессе круговорота воды в природе происходит постоянное обновление вод во всех частях Земли, различающееся скоростью: от нескольких миллионов лет (ледники Антарктиды) до несколько суток (реки).

## 1.2 Потребление воды

*Водопотребление* и *водоотведение* являются важнейшими показателями, характеризующими уровень развития водохозяйственного комплекса страны и его структуру. Большие запасы пресных вод в России позволяют надежно обеспечивать различные нужды потребителей. Ежегодный забор пресных вод в РФ составляет около 58 млн. м<sup>3</sup>, при этом порядка 15 % из них приходится на подземные воды, остальное – поверхностные (рисунок 1.2).

В мировой практике для оценки эффективности забора воды используется индекс эксплуатации водных ресурсов: отношение общего объема ежегодного забора поверхностных и подземных пресных вод к общему объему возобновляемых пресноводных ресурсов (в процентах). Для регионов с допустимым уровнем изъятия водных ресурсов этот порог составляет 20 %, значение в 40 % характеризует высокую степень напряженности водного режима. В России указанный индекс составляет менее 2 %.

### Забор воды, млн. м<sup>3</sup>



Рисунок 1.2 – Забор пресных вод в РФ

В целом в РФ с 2010 года отмечается снижение валового забора пресных вод, что связано, главным образом, с изменениями в экономике страны.

В Алтайском крае наблюдается аналогичная динамика забора воды из поверхностных источников, доля которых в обеспечении водой региона составляет 78 %.

Основными категориями потребителей вода расходуется:

- 1) на хозяйственно-питьевые нужды населения (для приготовления пищи, санитарно-гигиенических, бытовых и др. нужд);
- 2) в сельском хозяйстве (в животноводстве, для орошения и др.);
- 3) для нужд промышленности, где она применяется в качестве технологических растворов, теплоносителя, как агент в гидротранспорте и т. п.

Кроме того, вода используется для целей гидроэнергетики, здравоохранения, транспорта, рекреации, лесного хозяйства, пожарной безопасности и др.

Классификация вод по основному целевому назначению приведена на рисунке 1.3.

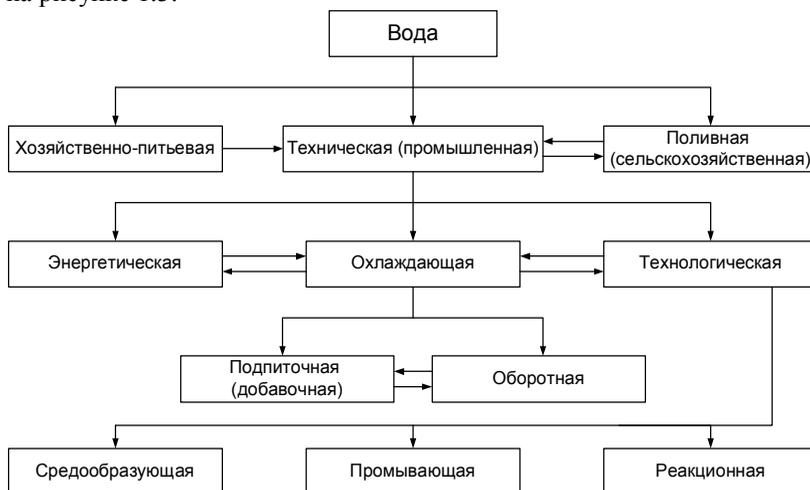


Рисунок 1.3 – Классификация вод по целевому назначению

*Хозяйственно-питьевая вода* должна быть безвредна для здоровья человека, иметь хорошие органолептические показатели и быть пригодной для использования в быту. Качество такой воды регламентировано СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества», в котором нормируется ряд показателей. Среди них мутность, цветность, запахи, привкусы, pH, общая жесткость, микробиологические показатели, содержание различных катионов (железо, марганец, медь, цинк, алюминий, мышьяк, молибден и др.), анионов (нитраты, фториды, сульфаты, хлориды).

Требования к воде для *сельскохозяйственных нужд* обусловлены целями, для которых она предназначена (орошения, в животноводстве, переработки сельхозпродукции и др.). Качество воды на орошение определяется содержанием веществ, которые необходимы для агроэкосистем и их возможным негативным влиянием на компоненты окружающей среды. В частности, для предотвращения засоления почв необходимо использовать воду с общей минерализацией до  $2 \text{ г/дм}^3$ .

В промышленности *техническая* вода служит для технологических и энергетических целей, а также для охлаждения.

*Энергетическая* вода используется при получении пара (для питания парогенераторов) и как рабочее тело при передаче тепла от источника к потребителю (горячая вода – теплоноситель), для этого она обязательно подвергается специальной обработке. Такая вода не

должна содержать примесей, вызывающих: образование накипи, вспенивание котловой воды, унос солей с паром и коррозию металла. Требования к ее качеству самые строгие: общая жесткость должна составлять не более 0,12 мг/л, количество растворенного кислорода до 0,1 мг/л, вода должна иметь минимальное солесодержание, практически отсутствие взвешенных веществ и соединений кремния.

*Охлаждающая* вода служит для охлаждения жидких и газообразных продуктов в теплообменных аппаратах, при этом она не соприкасается с материальными потоками, а лишь нагревается. Для целей охлаждения используется до 80 % всей воды промышленности. Качество этой воды должно оставаться стабильным в течение длительного времени, она должна иметь малую карбонатную жесткость, предельно низкие концентрации ионов железа, нефтепродуктов, иметь минимальное количество биологических загрязнений и взвешенных частиц.

Качество *подпиточной* и *оборотной* воды должно удовлетворять требованиям, предъявляемым к системам, в которых она используется.

*Технологическая* вода подразделяется на средообразующую, промывающую и реакционную. В каждом случае требования к воде определяются технологией производства. Технологическая вода непосредственно контактирует с продуктами процесса и может подвергаться нагреву (например, при улавливании и очистке газа).

Вода может служить в качестве *химического реагента* или промышленного сырья, т. е. среды, в которой протекают те или иные химические реакции

*Средообразующую* воду используют для растворения и образования пульпы, при флотационном обогащении руд, гидротранспорте продуктов и отходов производства.

*Промывающая* вода применяется для промывки газообразных, жидких и твердых продуктов и изделий в таких процессах, как абсорбция и экстракция.

Количество воды, подаваемой на производственные нужды, должно соответствовать технологическим требованиям с учетом качества выпускаемой продукции и обеспечения надлежащих санитарно-гигиенических условий для обслуживающего персонала.

Характер расходования воды на производственные нужды определяется режимом работы промышленного предприятия. В некоторых случаях (в частности, при использовании воды для охлаждения) потребление воды идет почти равномерно в течение суток. Иногда вода используется периодически для наполнения в заданное время различных баков, емкостей и т. п. В ряде случаев для производственного водоснабжения необходимо учитывать сезонные колебания водопотребления.

Определение количества воды, необходимой потребителю, осуществляется по удельным нормам водопотребления.

*Нормой водопотребления* считается целесообразное количество воды, необходимое для производственного процесса, установленное (или рекомендуемое) на основании передового опыта или научно-обоснованного расчета.

В *укрупненную норму водопотребления* входят все расходы воды на предприятии: производственные, хозяйственно-питьевые, бытовые, для пожаротушения и т. п. Укрупненные нормы позволяют дать оценку рациональности использования воды на любом действующем предприятии и колеблются в очень широких пределах.

Средние удельные расходы воды на производство некоторых видов продукции приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Удельные расходы воды на производство различных видов продукции

Вид продукции или технологический процесс	Расход воды, м <sup>3</sup> /т продукта
Переработка нефти	15-25
<b>Производство:</b> стали	150-245
чугуна	250-300
никеля	4000
<b>Получение:</b> синтетического волокна	2000-3000
пластмассы	500-1000
целлюлозы	64-167
цемента	2-13

Промышленные предприятия потребляют воду исходя из характера и объема производства, состава исходного сырья и получаемого продукта, роли воды в технологических процессах и условий ее использования, физико-химических показателей, схемы водоснабжения.

Наиболее крупными производственными потребителями воды являются металлургические и нефтеперерабатывающие заводы, теплоэлектростанции, предприятия химической и целлюлозно-бумажной промышленности.

Для получения исходной воды с заданными потребителями свойствами необходима предварительная очистка или обработка воды.

Обработка воды с целью сделать ее пригодной для питья, хозяйственных или производственных целей представляет собой комплекс физических, химических и биологических методов изменения ее первоначального состава. Под обработкой воды понимают не только ее очистку от ряда нежелательных и вредных примесей, но и улучшение природных свойств путем обогащения ее недостающими ингредиентами.

Все многообразие *методов обработки воды* можно подразделить на следующие основные группы:

1) улучшение органолептических свойств воды – осветление, обесцвечивание, дезодорация и др.;

2) обеспечение эпидемиологической безопасности – обеззараживание хлорированием, озонированием, обработка ультрафиолетом и т. п.;

3) кондиционирование минерального состава – доведение состава воды до заданных параметров, которое включает фторирование, обесфторивание, обезжелезивание и деманганацию, умягчение, обессоливание и др.

Метод обработки воды выбирают на основе предварительного изучения состава и свойств воды и их сопоставления с требованиями потребителя. Выбор метода производят по данным технико-экономического анализа, руководствуясь минимальными затратами и требуемой степенью очистки.

### 1.3 Характеристика сточных вод

Под *сточной* понимается вода, бывшая в бытовом, сельскохозяйственном или производственном употреблении, а также прошедшая через какую-либо территорию, когда загрязнения изменяют ее первоначальный химический состав или физические свойства.

Сточные воды чрезвычайно разнообразны по составу и экологической опасности, их *классифицируют* в зависимости от условий образования:

*производственные* – образуются в результате использования воды в различных технологических процессах;

*хозяйственно-бытовые* – от санитарных узлов производственных зданий, сооружений и объектов жилого и общественного назначения: душевых, прачечных, предприятий медицинского обслуживания и общественного питания, культурно-массовых учреждений и т. п.;

*поверхностные* – формируется за счёт дождевых, талых и поливочных вод, их отличает эпизодичность и значительная неравномерность образования.

*Хозяйственно-бытовые стоки* достаточно однообразны по составу, содержание в них органических примесей около 58 %, минеральных 42 %, в том числе биогенные элементы (азот, фосфор, калий). При этом следует отметить, что в настоящее время состав бытовых сточных вод несколько изменился, что обусловлено активным и повсеместным использованием различных химических средств: моющих, чистящих и др.

Степень и характер загрязнения *поверхностного стока* различен и зависит от характера поверхности водосбора, состава приземной атмосферы, а также гидрометеорологических параметров выпадающих осадков: интенсивности и продолжительности дождей, длительности

предшествующего периода сухой погоды, интенсивности процесса весеннего снеготаяния. Количество загрязняющих веществ, выносимых с селитебных территорий поверхностным стоком, определяется плотностью населения, уровнем благоустройства территорий, видом поверхностного покрова, интенсивностью движения транспорта, частотой уборки улиц. Среди загрязнителей поверхностных сточных вод преобладают взвешенные вещества органического и минерального происхождения, нефтепродукты, биогенные вещества. Специфические загрязнения выносятся, как правило, с территорий промышленных зон или попадают в него из приземной атмосферы.

Количество и состав *производственных сточных вод* определяются типом предприятия, его мощностью, спецификой используемых технологических процессов, а также существующей системой очистки стоков.

Производственные стоки делятся на две категории: загрязненные и незагрязненные. *Незагрязненные* (нормативно чистые) при поступлении в водоемы без очистки не ухудшают качества воды в них. В основном эти сточные воды имеют только тепловое загрязнение и поступают от холодильных, компрессорных, теплообменных аппаратов или образуются при охлаждении основного производственного оборудования и продуктов производства.

*Загрязненные* содержат различные примеси в количествах, превышающих допустимые значения и подразделяются на три основные группы:

1) загрязненные преимущественно *минеральными* примесями (предприятия металлургической, машиностроительной, рудо- и угледобывающей промышленности; заводы по производству минеральных удобрений, кислот, строительных изделий и материалов и др.);

2) загрязненные преимущественно *органическими* примесями (предприятия мясного, рыбного, молочного, целлюлозно-бумажного, химического, микробиологического, кожевенного производства; заводы по производству пластмасс, каучука и др.);

3) загрязненные *минеральными* и *органическими* примесями (предприятия нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, нефтехимической, текстильной, легкой, фармацевтической промышленности; заводы по производству консервов, сахара, продуктов органического синтеза, бумаги, витаминов и др.).

По *концентрации загрязняющих веществ* производственные сточные воды разделяются на четыре группы (таблица 1.4), по степени агрессивности могут быть слабоагрессивные ( $pH=6-6,5$  и  $pH=8-9$ ), сильноагрессивные ( $pH<6$  и  $pH>9$ ) и неагрессивные ( $pH=6,5-8$ ).

Таблица 1.4 – Классификация сточных вод по концентрации содержащихся в них примесей

Группа	Концентрация загрязнений, мг/л
I	1–500
II	500–5000
III	5000–30000
IV	> 30 000

На различных предприятиях, даже при одинаковых технологических процессах, состав производственных сточных вод, режим водоотведения и удельный расход на единицу выпускаемой продукции весьма разнообразны. Большое значение в формировании состава производственных сточных вод имеет вид перерабатываемого сырья.

Физико-химические показатели производственных сточных вод колеблются в широком диапазоне, что вызывает необходимость тщательного обоснования выбора оптимального метода очистки для каждого из них.

В технологических процессах образуются следующие основные виды сточных вод.

*Реакционные* – воды, получающиеся при протекании химических реакций, они загрязнены исходными веществами и продуктами реакции.

*Воды, содержащиеся в сырье* и исходных продуктах в виде свободной или связанной влаги и выделяющиеся в процессах переработки.

*Промывные воды* – образуются при промывке сырья и продуктов, получаемых в технологических процессах, а также оборудования.

*Маточные водные растворы*, получающиеся при проведении процессов в водных средах.

*Водные экстракты и абсорбционные жидкости* – образуются при использовании воды в качестве экстрагента или абсорбента, наибольшие объемы образуются при мокрой очистке газов.

*Охлаждающие воды* – от охлаждения продуктов и аппаратов; вода, не соприкасающаяся с технологическими потоками, применяется в системах оборотного водоснабжения.

Другие воды сточных вод образуются от вакуум-насосов, конденсаторов смешения, при гидрозолоудалении, от мойки оборудования, тары, помещений.

Отведение производственных сточных вод по общей или отдельным сетям, а также смешение этих вод с бытовыми сточными водами во многом зависит от того, будет ли в дальнейшем принята их совместная или раздельная очистка. Условия отведения сточных вод опре-

деляются также характером загрязняющих веществ. Следует напомнить, что водным законодательством РФ запрещается сбрасывать в водные объекты неочищенные до установленных нормативов стоки.

Количество сточных вод, отводимых от производства в водоём, зависит от мощности и характера технологического процесса предприятия. Это количество определяется нормами водопотребления и водоотведения для разных отраслей промышленности. Скорректированная норма водопотребления учитывает все затраты воды на предприятии – производственные, хозяйственно-питьевые, хозяйственно-бытовые и пр.

*Нормой водоотведения* является установленное среднее количество сточных вод, отводимое от производства в водоем, при целесообразной норме водопотребления. Укрупненная норма водоотведения включает количество выпускаемых в водоем сточных вод – очищенных производственных и бытовых; производственных, не требующих очистки, фильтрационных из прудов-осветлителей, хвостохранилищ и шламонакопителей.

Укрупненные нормы водоотведения в различных отраслях промышленности колеблются в широких пределах (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Укрупненные нормы водоотведения для производства некоторых видов продукции

Производство (добыча)	Единица измерения	Норма водоотведения, м <sup>3</sup>
Нефть	1 т	0,2
Природный газ	1000 м <sup>3</sup>	2,8
Уголь (в шахтах)	1 т	0,13
Чугун, сталь	1 т	4
Алюминий	1 т	9
Титан	1 т	30
Бумага	1 т	83,6
Стекло	1000 м <sup>2</sup>	40
Шерстяная ткань	1000 м	325

При отсутствии норм водоотведения количество сточных вод определяется по технологическим расчетам в соответствии с регламентом производства. От крупных промышленных предприятий количество стоков может достигать 200-400 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

Для разработки рациональной схемы водоотведения и оценки возможности повторного использования производственных сточных вод изучается их состав и режим водоотведения. При этом анализируются физико-химические показатели сточных вод и режим поступления в канализационную сеть не только общего стока промышленного

предприятия, но и сточных вод от отдельных цехов, а при необходимости от отдельных аппаратов.

При проектировании водоочистных сооружений необходимо знать не только суточное количество сточных вод, но и режим их поступления по часам суток, то есть *часовой график* их притока. Производственные сточные воды могут поступать в течение смены равномерно и неравномерно. На ряде производств химической, легкой, текстильной, пищевой, фармацевтической и других отраслей промышленности происходят залповые поступления высококонцентрированных и высокотоксичных стоков.

Специфика технологии различных производств требует в ряде случаев учитывать режим притока сточных вод не только в течение суток, но и по месяцам или сезонам года.

Для учета неравномерности водоотведения за различные промежутки времени существуют *коэффициенты неравномерности водоотведения*.

*Коэффициент часовой неравномерности водоотведения*  $K_{ч}$  представляет собой отношение максимального часового расхода  $Q_{ч,max}$  к среднему часовому  $Q_{ч,ср}$  в сутки наибольшего водоотведения:

$$K_{ч} = Q_{ч,max} / Q_{ч,ср}$$

Коэффициенты часовой неравномерности водоотведения общего стока для различных отраслей промышленности колеблются от 1 до 2.

*Коэффициент суточной неравномерности*  $K_{сут}$  – отношение максимального суточного расхода  $Q_{сут,max}$  к среднему суточному  $Q_{сут,ср}$ .

$$K_{сут} = Q_{сут,max} / Q_{сут,ср}$$

*Общий коэффициент неравномерности водоотведения*  $K_{общ}$ , применяемый при расчете канализационной сети, получают перемножением коэффициентов суточной и часовой неравномерности:

$$K_{общ} = K_{ч} \cdot K_{сут}$$

Для усреднения расхода и концентрации сточных вод применяют специальные сооружения – усреднители.

#### **1.4 Пути уменьшения количества сточных вод и их загрязненности**

Решением проблемы негативного влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду, в том числе водные ресурсы, является создание и внедрение малоотходных и безводных технологических процессов. Как известно, под *малоотходной* понимают технологию,

позволяющую сократить до технически возможного в настоящее время минимума количества твердых отходов, сбросов воды, газообразных и тепловых выбросов при получении какой-либо продукции. Такая технология представляет собой сочетание организационно-технических мероприятий, а также способов подготовки сырья и материалов, обеспечивающих комплексное использование сырья и энергии.

Загрязненные воды можно отнести к основным отходам большинства предприятий. Действующие на предприятиях системы канализования включают сбор, транспортирование, а затем соответствующую очистку воды. Требования к эффективности процесса очистки определяются в первую очередь предельно допустимыми концентрациями загрязнений, которые необходимо обеспечить на выходе из очистных сооружений.

Развитие систем оборотного и последовательного использования воды способствует резкому (примерно в 20-25 раз) уменьшению объемов водопотребления и водоотведения, однако не исключает сброса в водные объекты засоленных, так называемых продувочных вод.

Чтобы добиться максимального исключения сброса в водоемы загрязняющих веществ в сравнительно короткий срок, необходимо разработать и поэтапно внедрить замкнутые системы водопользования отдельных производств. Создание таких систем позволит снизить удельные расходы свежей воды и, следовательно, количество сточных вод.

Свежая вода из водных источников должна использоваться только для подпитки замкнутых систем, питьевых и хозяйственно-бытовых целей, а также для специальных технологических операций, где не могут быть использованы очищенные сточные воды.

Современные технологии и техника очистки обеспечивает получение воды по существу любой заданной степени чистоты из любой сточной воды, т. е. создание замкнутых водооборотных систем может тормозиться только причинами экономического характера. В этой связи сокращение поступления загрязненных вод может осуществляться по двум направлениям: качественными изменениями в технологическом процессе (в частности, при использовании наилучших доступных технологий (НДТ)) и более тщательной очисткой сточных вод (что является по сути мерой воздействия «на конце трубы») (рисунок 1.4).

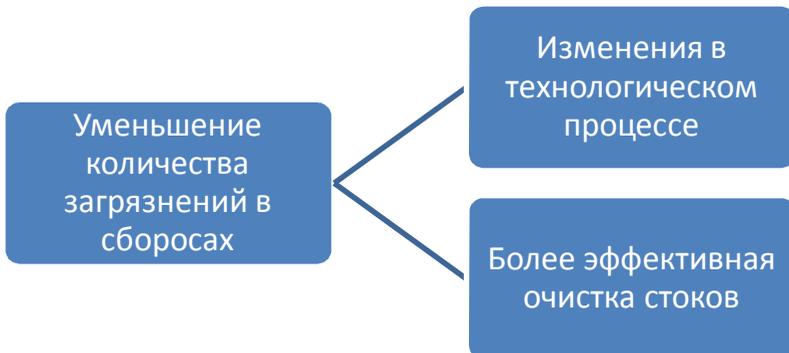


Рисунок 1.4 – Пути снижения поступления загрязнений в водные объекты

В основу современных технологических систем с многократным использованием воды и минимальным воздействием на окружающую среду положены *принципы совершенствования как основных технологических процессов, так и систем использования и очистки воды. К первым относятся:*

- разработка новых технологических процессов с сокращением или полным исключением воды из технологических операций;
- комплексная переработка исходного сырья и продуктов;
- совершенствование технологических процессов и аппаратов;
- внедрение аппаратов воздушного охлаждения;
- применение безводного сырья или его предварительное обезвоживание.

*Вторые включают:*

- очистку всех производственных, хозяйственно-бытовых и поверхностных сточных вод на локальных и общих очистных сооружениях с получением воды, пригодной для использования в замкнутых водооборотных системах;
- внедрение современных интенсивных методов и аппаратов для очистки воды;
- утилизацию ценных компонентов сточных вод;
- организацию систем оборотного, повторного и многократного использования воды.

Все перечисленные мероприятия являются составными частями организации производства, реализованного по принципу наилучших доступных технологий (НДТ), которые разрабатываются с учетом экономических, экологических факторов, технологических особенностей предприятий, имеющих источники исходной воды и ее качества,

наличия других источников загрязнения (кроме производственных) и возможных потребителей отходов, а также особенностей промышленного региона в целом.

*Затраты на создание бессточных производств* определяются в значительной степени технологией этих производств и эффективностью методов локальной очистки сточных вод. Организация таких производств экономически оправдана вследствие получения дополнительной продукции (извлекаемой из воды), отсутствия необходимости строительства крупных сооружений для транспортировки и очистки природной воды, строительства сооружений для очистки сточных вод до требуемого качества, в случае спуска их в природные водоемы, предотвращения возможности их загрязнения в случае аварий и других непредвиденных причин и т. д.

В Российской Федерации осуществляется разработка *информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям*, в том числе в области водоочистки и водоснабжения. Эксперты анализируют экологическую результативность отечественных предприятий и определяют технические и технологические решения, которые позволят идентифицировать технологии как наилучшие доступные. Одним из итогов этих процедур является введение в действие с 1 июля 2016 г. информационно-технического справочника ИТС 8-2015 «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях». Данный справочник является межотраслевым («горизонтальным») и содержит обобщенную информацию и общие подходы к межотраслевым технологиям, техническим и управленческим решениям по очистке сточных вод. В нем приводятся характеристика сточных вод различных производств, общие подходы к водопользованию и обращению со сточными водами на предприятиях, а также описание технологических процессов и методов, используемых в настоящее время для очистки сточных вод.

## 1.5 Классификация примесей в сточных водах

Загрязнения производственных сточных вод чрезвычайно разнообразны, дать какую-либо типовую характеристику этих вод не представляется возможным, поэтому в каждом отдельном случае необходимо изучение их состава и свойств, которые зависят от вида производства.

По своей *природе* загрязнения делятся на минеральные, органические, бактериальные и биологические.

К *минеральным* загрязнениям относятся песок, глина, глинистые частицы, частицы руды, шлака, растворы минеральных солей, кислот и

щелочей, минеральные масла, железо, кальций, магний, кремний и другие вещества.

*Органические* загрязнения различаются по классам органических соединений (углеводороды, спирты, органические кислоты, ароматические и высокомолекулярные соединения и др.), они могут быть растительного и животного происхождения. К *растительным* относятся остатки растений, плодоовощей, злаков, бумага, растительные масла и пр., основным химическим элементом их является углерод. Загрязнениями *животного* происхождения представлены физиологические выделения людей и животных, остатки мускульных и жировых тканей животных, клеевые вещества и т. п. Они характеризуются довольно значительным содержанием азота, кроме того в них имеются фосфор, сера и водород.

*Биологические* и *бактериальные* загрязнения представляют собой различные микроорганизмы – дрожжевые и плесневые грибки, мелкие водоросли и бактерии, в том числе и болезнетворные, они свойственны в основном бытовым водам и некоторым видам производственных сточных вод (консервных заводов, кожевенно-обрабатывающих предприятий, мясокомбинатов, биофабрик и т. п.). По своему химическому составу они относятся к органическим загрязнениям, но выделяются в отдельную группу ввиду особого взаимодействия с другими примесями сточных вод.

По *степени растворимости* примеси делятся на растворимые и нерастворимые. К нерастворимым (взвешенным и коллоидным) относятся частицы песка, глины, ила. Растворимые могут быть в виде истинно растворимых молекул и ионов.

По *фазовому (агрегатному)* состоянию находящиеся в воде вещества можно разделить на твердые (частицы глины, водоросли), жидкие (эмульсии, нефтепродукты, жиры) и газообразные (газы в растворенном состоянии).

Примеси можно также классифицировать по их *происхождению* (природные и искусственные), по плотности относительно воды (плавающие, тонущие, зависающие).

Особый вид загрязнений представляет *тепловое*, характеризующее повышенной температурой после отвода от охлаждаемого оборудования.

Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) рекомендована следующая классификация *химических* загрязнителей воды:

- 1) бактериальные и биологически нестойкие органические загрязнение (бактерии, вирусы, микроорганизмы, в том числе болезнетворные);
- 2) биохимически окисляемые органические соединения, которые вызывают запахи и привкусы воды;
- 3) малотоксичные неорганические соли;

4) неорганические соединения, являющиеся питательными веществами для растений (нитраты, фосфаты, калийные соли);

5) нефтепродукты;

6) токсичные соединения (соли тяжелых металлов, окислители, биологически жесткие неразлагающиеся органические соединения).

Практический интерес представляет *фазово-дисперсная классификация примесей с учетом физико-химических свойств*, разработанная Л.А. Кульским (таблица 1.6).

Исходя из анализа закономерностей, которым подчиняются процессы очистки воды, он сгруппировал загрязнения по признаку их физико-химического состояния в воде, которое в известной степени определяется дисперсностью вещества. Указанный принцип позволил объединить в небольшое количество групп самые разнообразные по химической и физической характеристике примеси природных и сточных вод.

Для задач, связанных с очисткой воды, эта классификация полезна тем, что, определив фазово-дисперсное состояние примесей в воде и установив их принадлежность к какой-то группе, можно предварительно выбрать технологические приемы и методы очистки воды. При этом фазово-дисперсное состояние примесей должно устанавливаться после каждой стадии обработки воды и учитываться при проектировании всей схемы водоподготовки.

По этой классификации все вещества делятся на четыре группы: две гетерогенные, в которых частицы не полностью смешиваются с водой (взвеси и коллоидные растворы), и две гомогенные, дающие с водой истинные растворы (органические молекулы, растворенные газы, электролиты).

*Первая группа* примесей имеет размеры частиц больше  $10^{-6}$  м, которые образуют с водой взвеси. Это частицы песка, глины, нерастворимые соли, некоторые органические вещества. Взвеси обуславливают мутность воды, а в некоторых случаях ее цветность.

*Вторая группа* включает вещества с размерами частиц от  $10^{-8}$  м до  $10^{-6}$  м. Эти загрязнения образуют с водой коллоидные системы. В коллоидном состоянии могут находиться вещества как минерального происхождения  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , так и органического, например, гумусовые. Примеси, входящие во вторую группу, характеризуются особыми молекулярно-кинетическими свойствами, а вследствие более мелких размеров их самопроизвольное оседание крайне затруднительно.

Таблица 1.6 – Классификация примесей по Л.А. Кульскому

Класс примесей	ГЕТЕРОГЕННЫЕ (разнородные)		ГОМОГЕННЫЕ (однородные)	
Группа примесей	I	II	III	IV
Наименование группы	ВЗВЕСИ	КОЛЛОИДЫ	МОЛЕКУЛЯРНЫЕ РАСТВОРЫ	ИОННЫЕ РАСТВОРЫ
Крупность частиц, м	$10^{-3}$ — $10^{-5}$	$10^{-7}$ — $10^{-9}$	$10^{-8}$ — $10^{-10}$	$10^{-9}$ — $10^{-10}$
Характерные представители	КРУПНАЯ ВЗВЕСЬ ПЛАНКТОН ТОНКАЯ ВЗВЕСЬ БАКТЕРИИ	ОРГАНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ НЕРАСТВОРИМЫЙ ВИРУСЫ	ОРГАНИКА АНИСНЫ РАСТВОРИМЫЙ РАСТВОРЕННЫЕ ГАЗЫ	КАТИОНЫ
	Показатели качества воды, соответственно примесям	Мутность Коли-титр Коли-индекс	Окисляемость Цветность Бакпоказатели	Окисляемость Запахи, привкусы БПК, ХПК

*Третью и четвертую* группы составляют полностью растворяющиеся в воде вещества, имеющие размер частиц менее  $10^{-8}$  м. К *третьей группе* относятся различные органические молекулы (углеводороды, органические кислоты, спирты, кетоны, альдегиды, ароматические соединения, нефть и продукты ее переработки и т. п.), растворенные в воде газы ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  и др.). *Четвертую группу* представляют неорганические вещества, диссоциирующие на ионы – электролиты (минеральные кислоты, щелочи, соли всевозможных металлов).

*Исходными принципами классификации* послужила фазово-дисперсная характеристика веществ с учетом их химических особенностей, которая определяет поведение этих соединений в водной среде по отношению к вводимым в воду реагентам. Каждому такому состоянию примесей соответствуют определенные технологические приемы и методы их удаления. Способность многих веществ в водной среде изменять свое фазово-дисперсное состояние под влиянием физико-химических факторов, таких как солевой состав, pH, температура и другие, открывает возможность варьировать технологические приемы и методы регулирования процессов обработки воды. Систематизация веществ по этим признакам позволяет все загрязнения природных и сточных вод свести к нескольким группам, принадлежность к которым уже предопределяет технологию водоочистки.

Таким образом, учитывая особенности всех четырех групп, можно для каждой из них находить совокупность эффективных мер воздействия, приводящих к изменению фазово-дисперсного состояния примесей воды в желаемом направлении. Такие превращения являются целью большинства технологических процессов по удалению загрязнений. Между фазово-дисперсным состоянием веществ, загрязняющих воду, и выбором совокупности методов их удаления существует вполне определенная связь. При этом химическая природа примесей определяет конкретные способы наиболее целесообразного ведения процесса очистки из числа рекомендованных для данной группы.

Описанная классификация дает возможность выбрать рациональную компоновку очистных сооружений и эффективное управление технологическими процессами водообработки, а также оптимизировать работу сооружений.

## **1.6 Качество воды водных объектов**

При отведении сточных вод в водные объекты необходимо исходить из степени их водности и загрязненности, что зависит от гидрохимических показателей самого водоема и качества очистки загрязненных вод. Для оценки допустимой степени снижения качества поверхностных вод разработаны требования к составу и свойствам воды

и предельно допустимые концентрации (ПДК) веществ в воде водных объектов.

В России существует *две системы классификации* водных объектов в соответствии с видами их использования:

– для водных объектов *хозяйственно-питьевого и культурно-бытового* водопользования (применяется система для источников питьевого, хозяйственно-бытового и рекреационного водопользования, а также для водоснабжения предприятий пищевой промышленности);

– для водных объектов *рыбохозяйственного назначения* двух категорий.

В каждом виде водопользования существуют нормативы качества воды по двум категориям водопользования. В *первую* категорию хозяйственно-питьевых объектов входят источники централизованного и нецентрализованного хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для водоснабжения пищевой промышленности. Во *вторую* – водные объекты, используемые для рекреационных целей, а также расположенные в черте населенных пунктов.

Для водоемов рыбохозяйственного назначения требования к качеству воды подразделяются на *высшую* и *первую* категории, а также *вторую*. Первая и высшая категория предназначена для сохранения и воспроизводства ценных видов рыб, вторая – для всех других рыбохозяйственных целей.

Водные объекты следует считать *загрязненными*, если в расчетном пункте (контрольном створе) не соблюдаются установленные для данного вида водопользования требования к составу и свойствам воды и нормативы ПДК.

*Контрольный створ* – это поперечное сечение водного потока, в котором контролируется качество воды. На водном объекте рыбохозяйственного назначения контрольный створ устанавливается в каждом конкретном случае, но не далее 500 м от места сброса сточных вод. При отсутствии у водного объекта особого водоохранного статуса контрольный створ назначается в 1 км от пункта водопользования, на непроточных водоемах – в радиусе 1 км от пункта водопользования.

Для водных объектов *хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования* эти требования отражены в СанПиН 2.1.5.980-00 «Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод» и гигиенических нормативах ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования». В санитарных Правилах устанавливаются гигиенические требования к качеству воды водных объектов в пунктах питьевого, хозяйственно-бытового и рекреационного водопользования, к условиям отведения сточных вод, к размещению, проектированию, реконструкции пред-

приятий и эксплуатации объектов, способных оказать влияние на состояние поверхностных вод. Гигиеническими нормативами предусматривается нормирование для 1356 химических веществ с учетом классов их опасности (1 – чрезвычайно опасные, 2 – высокоопасные, 3 – умеренноопасные и 4 – малоопасные) и лимитирующих показателей вредности. Отнесение водоема к хозяйственно-питьевому или культурно-бытовому водопользованию находится в компетенции Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).

К водным объектам *рыбохозяйственного значения* относятся те, которые используются или могут быть использованы для добычи (вылова) водных биоресурсов. Для них применяются нормативы, утвержденные приказом Министерства сельского хозяйства РФ №552 от 13.12.2016 г., которые включают сведения о предельно допустимых концентрациях для 1116 веществ. Вид рыбохозяйственного использования водного объекта по этому признаку определяется Федеральным агентством по рыболовству.

В соответствии с указанными системами классификации приняты соответствующие определения предельно-допустимой концентрации вредных веществ.

*ПДК вещества в воде водоема хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования* – концентрация вредного вещества в воде, которая не должна оказывать прямого или косвенного влияния на организм человека в течение всей его жизни и на здоровье последующих поколений и не должна ухудшать гигиенические условия водопользования. Эти концентрации устанавливаются с учетом трех показателей вредности: органолептического, общесанитарного и санитарно-токсикологического.

*ПДК вещества в воде водоема, используемого для рыбохозяйственных целей* – концентрация вредного вещества в воде, которая не должна оказывать вредного влияния на популяции рыб, в первую очередь, промысловых. Она устанавливается с учетом четырех показателей вредности: токсикологического, санитарного, санитарно-токсикологического и органолептического.

*Органолептический* показатель вредности характеризует способность вещества изменять органолептические свойства воды.

*Общесанитарный* определяет влияние вещества на процессы естественного самоочищения вод за счет биохимических и химических реакций с участием естественной микрофлоры.

*Санитарно-токсикологический* характеризует вредное воздействие на организм человека.

*Токсикологический* показатель показывает токсичность вещества для живых организмов, населяющих водный объект.

Кроме того, рыбохозяйственные ПДК должны удовлетворять ряду условий, при которых не должны наблюдаться:

- гибель рыб и кормовых организмов для рыб;
- постепенное исчезновение видов рыб и кормовых организмов;
- ухудшение товарных качеств обитающей в водном объекте рыбы;
- замена ценных видов рыб на малоценные.

В случае одновременного использования воды водного объекта для различных нужд, т. е. принадлежности его к различным категориям, необходимо исходить из более жестких требований в ряду одновременных нормативов качества воды.

Запрещается сбрасывать в водные объекты возбудителей инфекционных заболеваний, вещества, для которых не установлены нормативы ПДК и отсутствуют методы их определения, а также чрезвычайно опасные вещества, для которых нормативы установлены с пометкой «отсутствие». Не допускается сбрасывать в водные объекты, на поверхность ледяного покрова и водосборную территорию пульпу, снег, кубовые остатки и мусор с территорий населенных мест и производственных площадок, а также осуществлять молевой сплав леса и производить мойку автотранспорта и других механизмов на берегах.

Разработка и определение нормативов предельно допустимых концентраций для любого химического вещества, потенциально опасного для водных биоресурсов, сопряжены с длительными дорогостоящими процедурами, и, по своей сути, являются серьезными научными химико-биологическими исследованиями, которые выполняют специализированные научно-исследовательские институты с аттестованными лабораториями и профильными специалистами.

Основные требования к качеству воды водоемов, используемых для различных целей, приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Требования к качеству воды водоемов

Показатели	Категории водопользования		Категории водного объекта рыбохозяйственного значения		
	1	2	3	4	5
	питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также для пищевых предприятий	рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест	высшая и первая	вторая	

Продолжение таблицы 1.7

1	2	3	4	5
Взвешенные вещества	не должно увеличиваться по сравнению с естественными условиями более чем на:			
	0,25 мг/дм <sup>3</sup>	0,75 мг/дм <sup>3</sup>	0,25 мг/дм <sup>3</sup>	0,75 мг/дм <sup>3</sup>
Плавающие примеси	на поверхности воды не должны обнаруживаться пленки нефтепродуктов, масел, жиров и скопления других примесей			
Окраска	не должна обнаруживаться в столбике		не нормируется	
	20 см	10 см		
Запахи	Вода не должна приобретать запахи интенсивностью более 2 баллов, обнаруживаемые		не нормируется	
	непосредственно или при последующем хлорировании или др. способах обработки	непосредственно		
Температура	летняя температура воды в результате спуска сточных вод не должна повышаться более чем на 3 °С по сравнению со среднемесячной температурой самого жаркого месяца за последние 10 лет		не должна повышаться по сравнению с естественной температурой водного объекта более чем на 5°С с общим повышением температуры не более чем до 20°С летом и 5°С зимой для водных объектов, где обитают холодолюбивые рыбы (лососевые и сиговые) и не более чем до 28°С летом и 8 °С зимой в остальных случаях	
Водородный показатель (рН)	не должен выходить за пределы 6,5-8,5		должен соответствовать фоновому значению показателя для воды водного объекта	
Минерализация воды	не более 1000 мг/дм <sup>3</sup> , в т.ч.: хлоридов – 350 мг/дм <sup>3</sup> , сульфатов – 500 мг/дм <sup>3</sup>		не нормируется	
Растворенный кислород	не должен быть менее 4,0 мг/дм <sup>3</sup> в любой период года в пробе, отобранной до 12 ч дня		не должно опускаться ниже	
			6,0 мг/дм <sup>3</sup> в летний период	4,0 мг/дм <sup>3</sup> в зимний период

Продолжение таблицы 1.7

1	2	3	4	5
Биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК <sub>5</sub> )	не должно превышать при температуре 20 °С		не должно превышать при температуре 20 °С	
	2 мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	4 мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	2,1 мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	2,1 мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Биохимическое потребление кислорода БПК <sub>полн</sub>	не нормируется		не должно превышать при температуре 20 °С	
			3,0 мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	3,0 мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>
Химическое потребление кислорода (ХПК)	не должно превышать		не нормируется	
	15,0 мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	30 мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>		
Нефть	0,3 мг/дм <sup>3</sup>		0,05 мг/ дм <sup>3</sup> (нефтепродукты)	
Фенол	0,001 мг/дм <sup>3</sup>		0,001 мг/дм <sup>3</sup>	
Хлор (Cl <sub>2</sub> )	отсутствие		0,00001 мг/дм <sup>3</sup>	
Хлорид-анион Cl-	350 мг/дм <sup>3</sup>		300 мг/дм <sup>3</sup>	
Медь	1,0 мг/дм <sup>3</sup>		0,001 мг/дм <sup>3</sup>	
Хром (Cr <sup>6+</sup> )	0,05 мг/дм <sup>3</sup>		0,02 мг/дм <sup>3</sup>	
Ртуть	0,0005 мг/дм <sup>3</sup>		0,00001 мг/дм <sup>3</sup>	

В случае присутствия в воде нескольких веществ 1-2 классов опасности сумма отношений фактических концентраций каждого из них к их ПДК не должна превышать единицы:

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ПДК_n} \leq 1,$$

где  $C_1, C_2, C_n, ПДК_1, ПДК_2, ПДК_n$  – соответственно концентрации и ПДК вредных веществ в водоеме.

При спуске в водный объект сточных вод, содержащих загрязняющие вещества, качество воды в нем ухудшается. Концентрация этих веществ не остается постоянной, она изменяется вследствие разбавления, а также биологических, физико-химических и химических процессов, происходящих в водоеме.

Большое значение имеет правильная организация выпуска сточных вод в водоемы, которая определяет процесс разбавления и дальнейшее самоочищение, связанное со способностью водоемов к ликвидации загрязняющих примесей и к восстановлению природных качеств воды.

Условия отведения сточных вод в водные объекты определяются с учетом:

- степени возможного смешения и разбавления сточных вод водой водного объекта;
- фоновое качество воды водного объекта выше места рассматриваемого выпуска сточных вод;
- нормативов качества воды водных объектов применительно к виду водопользования.

При расчете качества воды водных объектов исходные данные можно подразделить на три группы: 1) гидрологические и гидравлические характеристики водного объекта; 2) характеристика источника загрязнения; 3) требования к качеству воды водного объекта в *расчетных (или контрольных) пунктах* водопользования.

На основании расчетов для каждого выпуска сточных вод и каждого загрязняющего вещества устанавливаются нормативы допустимых сбросов (НДС) веществ в водные объекты, соблюдение которых должно обеспечить нормативное качество воды в расчетном створе в соответствии с требованиями.

Следует отметить, что норматив ПДК как универсальный показатель качества воды водного объекта применяется для всей территории страны, в то время как действие загрязняющих веществ зависит от специфических фоновых, климатических, хозяйственных и многих других характеристик конкретного региона. Этот факт не учитывается при разработке и установлении нормативов ПДК. Более того, зачастую фоновое состояние водного объекта по некоторым веществам приближается или даже значительно превышает предельно допустимые концентрации. В этой связи при установлении нормативов допустимого воздействия от деятельности предприятий необходимо ориентироваться на достижение показателей, которые включают как характеристики самого водного объекта, так и существующие технические возможности удаления различных примесей из воды.

## **1.7 Системы водоснабжения и водоотведения**

*Системы водоснабжения* представляют собой комплекс сооружений, предназначенных для снабжения потребителей водой в требуемом количестве и заданного качества. Они включают в себя устройства и сооружения для забора воды из источника, ее транспортирования, обработки, регулирования подачи и распределения между потребителями.

Все многообразие встречающихся на практике систем водоснабжения можно классифицировать по следующим основным признакам:

- *по виду использования природных источников*: водопроводы, получающие воду из поверхностных источников (реки, озера, водохранилища и т. д.), подземных (артезианские, грунтовые и т. д.) и смешанного питания;

- по назначению: хозяйственно-питьевые, производственные, сельскохозяйственные, противопожарные; такие типы могут быть как самостоятельными, так и объединенными;
- по территориальному признаку: локальные (одного объекта) и групповые (районные), обслуживающие группу объектов;
- по способу подачи воды: самотечные и напорные (с подачей воды с помощью насосов);
- по кратности использования потребляемой воды: прямоточные, последовательные, с оборотом воды.
- по видам обслуживаемых объектов: городские, поселковые, промышленные, железнодорожные и т. д.

В зависимости от назначения объекта и требований, предъявляемых к воде, а также по экономическим соображениям для всех указанных целей вода может подаваться одним водопроводом (*централизованная система*) с приемом воды из источника, ее очисткой (при необходимости), транспортированием и подачей ко всем потребителям под необходимым давлением. Обычно в городах предусматривают единый хозяйственно-противопожарный водопровод, который подает воду для хозяйственно-питьевых нужд промышленных предприятий, а иногда и технических нужд, где требуется вода питьевого качества. В остальных случаях на предприятиях целесообразно устраивать самостоятельные производственные водопроводы с подачей технической воды.

*Децентрализованные (местные или локальные)* системы водоснабжения обслуживают удаленных локальных потребителей, которыми могут быть группы зданий, отдельно расположенные промышленные предприятия, животноводческие фермы и комплексы и др. Основными отличительными особенностями локальных систем водоснабжения являются:

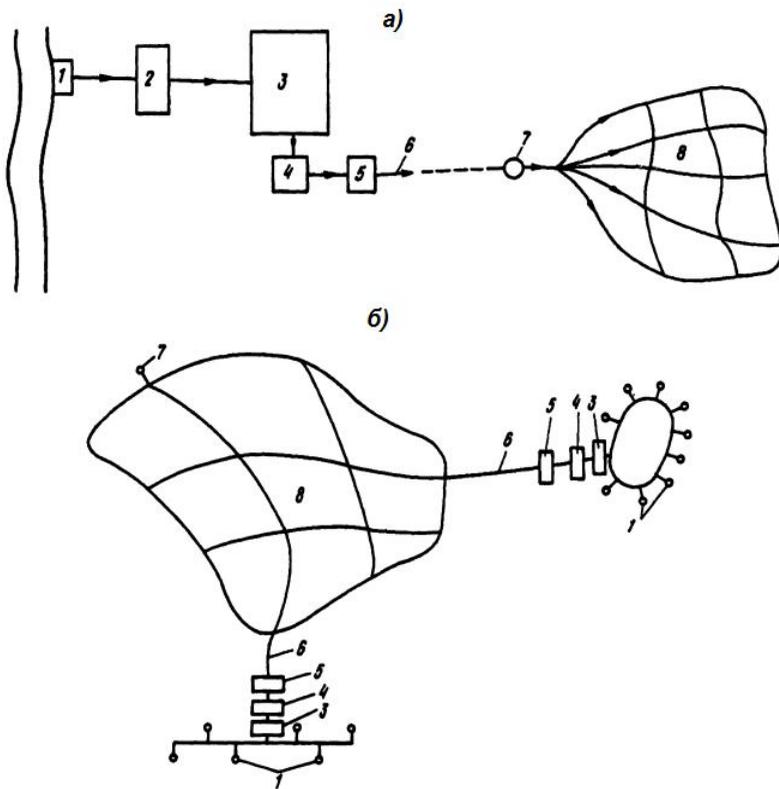
- наличие индивидуальных источников водоснабжения и весьма небольшая суточная производительность;
- незначительное насыщение оборудованием, которое преимущественно состоит из автоматизированных блоков забора, очистки и подачи воды;
- резко выраженная неравномерность водопотребления в течение суток ввиду незначительного количества потребителей. В целом для таких систем характерно отсутствие громоздких сооружений по обработке воды и хранению ее запасов.

*Основными элементами* систем водоснабжения являются:

- *водозаборные сооружения*, предназначенные для забора воды из природного источника;
- *водоподъемные сооружения* (насосные станции), подающие под необходимым напором воду к местам ее очистки, хранения или потребления;

- сооружения для очистки или кондиционирования природной воды;
- водоводы и водопроводные сети, служащие для транспортирования и подачи воды потребителям;
- регулирующие и запасные емкости, предназначенные для хранения и аккумуляции воды.

Вид водозаборного сооружения зависит от характера источника водоснабжения. Из поверхностных источников водоснабжения (рисунок 1.5, а) забор воды осуществляется береговыми и русловыми водозаборами различных конструкций, из подземных (рисунок 1.5, б) – водозаборными скважинами, шахтными колодцами, сооружениями для каптажа подземных вод.



1 – водозаборное сооружение; 2, 5 – насосные станции соответственно I и II подъема; 3 – очистные сооружения; 4 – резервуар чистой воды; 6 – водоводы; 7 – напорно-регулирующая емкость; 8 – водопроводная сеть

Рисунок 1.5 – Общая схема водоснабжения из поверхностного (а) и подземного (б) источников

*Последовательность расположения* отдельных объектов системы водоснабжения и их состав могут быть различными в зависимости от назначения, местных природных условий, требований водопотребителя, экономических соображений. Например, в случае соответствия качества воды в источнике требуемому очистные сооружения могут отсутствовать. Такая схема возможна, например, при использовании артезианских вод, для которых характерно высокое санитарно-гигиеническое качество.

Система водоснабжения в процессе работы должна удовлетворять *требованиям надежности и экономичности*. Под этим следует понимать подачу воды в заданных количествах, необходимого качества и под требуемым напором с наименьшими затратами без нарушений работы систем водоснабжения.

*Водоотводящие системы (системы канализования)* представляют собой комплекс инженерных сооружений для приема, транспортирования, очистки сточных вод и выпуска их в водоемы или для последующего использования в каких-либо целях. Канализационная сеть состоит из следующих *основных элементов*:

- *приемников сточных вод* (санитарные приборы,ждеприемники);
- *наружная внутриквартальная* или *дворовая* канализационная сеть;
- *наружная уличная* канализационная сеть;
- насосные станции и напорные водоводы;
- *сооружения для очистки* сточной воды;
- *устройство для выпуска* воды в водоем.

В зависимости от условий поступления сточных вод в сеть и транспортирования по ней вод различных категорий принимают общесплавную, раздельную и комбинированную системы канализации.

В *общесплавной* системе сточные воды всех категорий (хозяйственно-бытовые, производственные и атмосферные) поступают в одну сеть. Такие системы применяют при наличии рядом мощных проточных водоемов, обладающих значительной самоочищающей способностью. Эксплуатация общесплавных систем значительно усложняется из-за неравномерного притока поверхностных вод.

Если все перечисленные воды отводят по самостоятельным сетям или устраивают две сети (бытовую и производственно-дождевую либо производственно-бытовую и дождевую), то система носит название *раздельной*.

Раздельные системы, в свою очередь, подразделяются на полные, неполные и полураздельные. Если одновременно строят все указанные сети, то система называется *полной раздельной*; если строят одну из них – сеть бытовых вод, а атмосферные воды неорганизованно поступают в водоем, то система называется *неполной раздельной*. При полу-

раздельной системе обязательно строят две сети: одну – для отведения бытовых и производственных вод; другую – для атмосферных. *Комбинированная* система канализации представляет собой сочетание общесплавной и раздельной систем.

*Система и схема канализации* промышленного предприятия зависят от расхода и состава сточных вод, специфики предприятия, а также от геологических и других условий. Выбор рациональной схемы водоотведения промышленного предприятия является важной и ответственной задачей, ее решают с учетом местных условий, определяющих эффективность применения в санитарном и экономическом отношении. Система должна предусматривать повторное или последовательное использование технической воды в технологических операциях с предварительной очисткой или без нее, а также оборот охлаждающей воды.

Большинство промышленных предприятий имеет самостоятельные сети производственных, бытовых и атмосферных вод, т.е. водоотведение осуществляется по полной раздельной схеме. В этом случае производственные и бытовые воды направляются в водоем или возвращаются в производство после специальной очистки.

Производственные сточные воды, в зависимости от вида загрязняющих веществ и их концентрации, а также от количества сточных вод и мест их образования, отводятся несколькими самостоятельными потоками.

*Очистные сооружения* промышленных предприятий размещаются, как правило, на их территории. *При выборе системы и схемы водоотведения* предприятий необходимо учитывать:

- *требования к качеству и количеству воды* для различных технологических процессов;
- *количество, состав и свойства* сточных вод и режим их отведения;
- *возможность сокращения сточных вод* предприятия путем совершенствования технологических процессов и оборудования;
- *возможность использования воздушных методов* охлаждения;
- *возможность повторного использования* очищенных сточных вод;
- *целесообразность извлечения и использования ценных веществ*, содержащихся в сточных водах;
- *самоочищающую способность* водоема, условия спуска сточных вод в него и *необходимую степень очистки* этих вод;
- *целесообразность применения конкретного метода* очистки.

Кроме того, необходимо учитывать гидрологические характеристики водоема, в который предполагается сброс очищенных сточных вод и вид водопользования.

## 1.8 Схемы использования воды на предприятиях

В практике производственного водоснабжения нашли применение следующие системы:

*Прямоточные*, в которых воду после однократного использования очищают и сбрасывают в водоем (рисунок 1.6, а). В этом случае источник должен быть достаточно мощным, способным покрыть не только максимальные нагрузки потребителя, но и позволить сбрасывать стоки без нарушения экологического состояния водоема. Такие схемы применяются для хозяйственно-питьевого и противопожарного водоснабжения, т. к. повторное использование воды для этих целей исключается, а также – в пищевой и фармацевтической промышленности.

*С последовательным (повторным) использованием воды*, в них воду, отработавшую в одном технологическом процессе, направляют для вторичного использования в другом производстве, после чего сбрасывают в водоем (рисунок 1.6 б). Для создания таких схем необходимо, чтобы качество воды после использования в одном процессе удовлетворяло требованиям другого технологического процесса, иначе требуется корректировка ее состава. Применение такой схемы позволяет сократить суммарный расход свежей воды.

*Оборотные*, когда загрязненную воду очищают и (или охлаждают), а затем многократно потребляют на том же объекте (рисунок 1.6, в).

Обычно на промышленных предприятиях имеется много производственных водопотребителей различных категорий. Для их водоснабжения создаются *комбинированные* системы, включающие несколько различных систем водоснабжения.

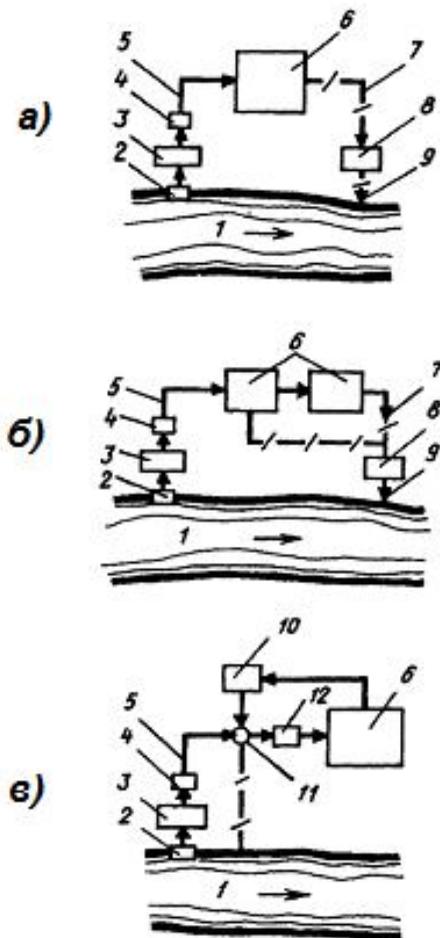
На любом предприятии могут использоваться локальные системы оборотного водоснабжения каждого отдельного потребителя либо централизованные, обеспечивающие водой несколько водопотребителей. Объединение (централизация) систем водоснабжения технически возможно только при одинаковых требованиях к качеству воды. Кроме того, должна быть учтена и экономическая целесообразность создания таких систем.

В целом *выбор схемы водоснабжения* осуществляют исходя из ряда критериев:

- мощности источника, его гидрологических или гидрогеологических характеристик, а также климатических условий местности;
- требований, предъявляемым к качеству потребляемой воды;
- удаленности источника от предприятия;
- характера загрязнения воды после использования и требований к выпускаемой воде.

При *прямоточном и последовательном* водоснабжении количество сточных вод ( $Q_{ст}$ ), отводимых в водоем, определяется объемом воды, подаваемым предприятию  $Q_{п}$ , за исключением безвозвратного расхода и потерь ее в одном или нескольких производствах  $Q_{пп}$  и при очистке  $Q_{оч}$ :

$$Q_{ст} = Q_{п} - (Q_{пп} + Q_{оч}).$$

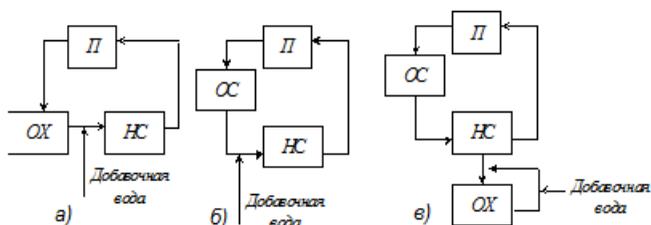


*а* – прямоточная; *б* – с повторным использованием воды; *в* – обратная  
 1 – река; 2 – водозаборное сооружение; 3 – сооружения водоподготовки;  
 4 – насосная станция; 5 – водовод; 6 – предприятие; 7 – сброс отработанной  
 воды; 8 – водоочистные сооружения; 9 – сброс воды; 10 – водоохлаждающее  
 устройство; 11 – сборник; 12 – насосная станция обратной воды

Рисунок 1.6 – Схемы производственного водоснабжения

Создание *оборотных систем* водоснабжения открывает большие возможности в сокращении расходов на эксплуатацию и позволяет снижать негативное влияние на водные объекты. В таких системах вода в основном нагревается, поэтому после охлаждения (или очистки) ее можно использовать повторно, что практически исключает сброс сточных вод. Тем не менее, часть воды в оборотной системе теряется с уносом, испарением, продувкой, с утечками через неплотности. Для компенсации этих потерь соответствующее количество воды забирается из природного источника.

На промышленных предприятиях применяют три основные *схемы оборотного водоснабжения* (рисунок 1.7).



*а* – с охлаждением воды; *б* – с очисткой воды;  
*в* – с очисткой и охлаждением воды

*П* – производство; *НС* – насосная станция;  
*ОХ* – охлаждение воды; *ОС* – очистка сточной воды

Рисунок 1.7 – Схемы оборотного водоснабжения

В *схеме с охлаждением воды* она является теплоносителем и в процессе не загрязняется, а только нагревается; перед повторным использованием ее охлаждают. В качестве охлаждающих устройств систем оборотного водоснабжения применяют пруды-охладители, брызгальные бассейны, башенные и вентиляторные градирни. Во всех устройствах предусматривают большую площадь охлаждения воды, за счет чего возрастает эффект охлаждения. В прудах это достигается распределением потока теплой воды по зеркалу большого водоема, в брызгальных установках – созданием мелких капель, в градирнях – с помощью оросительных устройств. Пруды-охладители и брызгальные бассейны применяются при невысоких требованиях к эффекту охлаждения воды.

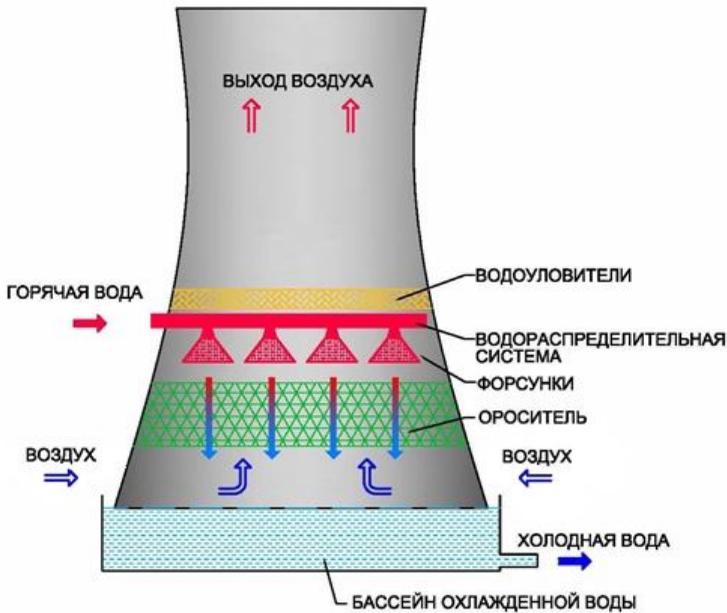


Рисунок 1.8 – Принцип работы башенной градирни

Градирни используются при необходимости получения устойчивого и глубокого охлаждения воды. Башенные градирни (рисунок 1.8) выполняются в виде прямого усеченного или гиперболической формы конуса, открытого сверху и оборудованного внутри оросительными устройствами. Конус играет роль вытяжной башни, создающей естественную тягу за счет разности плотностей холодного наружного воздуха, поступающего в градирню, и нагретого увлажненного воздуха на выходе из градирни.

В настоящее время наиболее значимыми аспектами при выборе систем охлаждения технологического оборудования является минимальное потребление энергии, ресурсов и воздействия на окружающую среду.

Потери воды от испарения  $Q_{исп}$  в среднем составляют 2,5 %, от капельного уноса на градирнях  $Q_{ун}$  (0,3-0,5) % от объема оборотной воды  $Q_{об}$ .

В схеме с очисткой вода в производстве не нагревается, но загрязняется, потери воды  $Q_{оч}$  при этом колеблются в больших пределах в зависимости от способа очистки.

В третьей схеме воду *очищают и охлаждают*. Для предотвращения накопления солей в оборотной воде часть ее сбрасывается в водоем (продувка или сброс  $Q_{\text{сбр}}$ ). Во всех случаях свежая вода добавляется лишь на восполнение потерь. Количество воды, сбрасываемой в водоем, составляет (5-10) %.

При создании замкнутых систем водного хозяйства на промышленных предприятиях резко уменьшается потребление свежей воды и расходы на строительство объектов водоснабжения и водоочистки, появляется возможность получения дополнительной товарной продукции, сокращения расходов сырья и вспомогательных материалов. Применение оборотного водоснабжения позволяет в 10-50 раз уменьшить потребление свежей воды.

Эффективность использования воды в производстве оценивается рядом показателей.

Техническое совершенство системы водообеспечения определяется *коэффициентом использования оборотной воды*  $K_{\text{об}}$ , %:

$$K_{\text{об}} = \frac{Q_{\text{об}}}{Q_{\text{об}} + Q_{\text{ист}}} \cdot 100.$$

Рациональность использования воды, забираемой из источника  $Q_{\text{ист}}$ , оценивается *коэффициентом использования свежей воды*  $K_{\text{св}}$ :

$$K_{\text{св}} = \frac{Q_{\text{ист}} - Q_{\text{сбр}}}{Q_{\text{ист}}} \leq 1.$$

Безвозвратное потребление воды и ее потери в производстве  $K_{\text{п}}$ , %:

$$K_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{ист}} - Q_{\text{сбр}}}{Q_{\text{об}} + Q_{\text{ист}}} \cdot 100.$$

Кратность использования воды,  $n$ :

$$n = \frac{Q_{\text{сбр}} + Q_{\text{ист}}}{Q_{\text{ист}}} > 1.$$

В приведенных выражениях,  $Q_{\text{об}}$ ,  $Q_{\text{ист}}$ ,  $Q_{\text{сбр}}$  – количество воды, используемой соответственно в обороте, забираемой из источника и сбрасываемой в водоем.

Информация о проектировании систем промышленного водоснабжения с организацией водооборотных циклов с различными охлаждающими устройствами приводится в информационно-техническом справочнике по наилучшим доступным технологиям ИТС 20-2016 «Промышленные системы охлаждения».

## 1.9 Методы очистки сточных вод

Существующие методы очистки воды весьма различны как по достижимой эффективности, так и по капитальным и эксплуатационным затратам, требующимся для их осуществления. Выбор рационального способа очистки должен осуществляться с учетом этих обстоятельств при обязательном условии детального ознакомления с основным производством.

Производственные сточные воды в зависимости от вида загрязняющих веществ и их концентрации, а также от количества сточных вод и мест их образования отводятся общим или несколькими самостоятельными потоками. Целесообразность разделения или объединения отдельных потоков является одним из наиболее актуальных вопросов, от правильного решения которого зависит сметная стоимость строительства и затраты на эксплуатацию очистных сооружений, надежность охраны водоемов от загрязнения и рентабельность основного производства.

Не всегда целесообразно совместное отведение даже сточных вод одинакового состава, но различных по концентрации в них загрязняющих веществ. Если эти вещества представляют товарную ценность, то экономичнее извлекать их из наиболее концентрированных сточных вод и уже потом смешивать слабоконцентрированные потоки для их последующей очистки.

Раздельная очистка сточных вод предпочтительнее и в том случае, если загрязняющие вещества легко удаляются из воды.

Нецелесообразно объединение стоков, содержащих значительное количество механических примесей минерального происхождения, а также нефть и масла, с бытовыми сточными водами. Такое объединение усложняет технологию очистки, препятствует возможности повторного использования производственных сточных вод и извлечению из них ценных примесей.

Все методы очистки сточных вод могут быть разделены на деструктивные и регенеративные.

Под *деструктивными* понимают такие методы, при которых загрязняющие воду вещества подвергаются разрушению. Образующиеся продукты распада удаляются из воды в виде газов или осадков или остаются в растворе, но уже в обезвреженном виде. Чаще всего это происходит при использовании естественных или искусственных окислительных процессов.

*Регенеративные* методы решают две задачи: очистку сточных вод и утилизацию ценных веществ. Практически нередко приходится

совмещать обе группы методов, а также проводить стадии предварительной очистки и доочистки.

Методы очистки сточных вод можно подразделить на гидромеханические, химические, физико-химические, термические, электрохимические, биохимические в зависимости от фазово-дисперсного состояния примесей и их физико-химических свойств. Наиболее полная классификация методов очистки от различных веществ с учетом указанных свойств предложена А.И. Родионовым (рисунок 1.9).

Во всех случаях очистки стоков первой стадией являются *механические методы*, предназначенные для удаления взвесей и дисперсно-коллоидных частиц. К ним относятся: процеживание на решетках и ситах; отстаивание в песколовках, отстойниках, нефтеловушках, илоуплотнителях; осветление в осветлителях со слоем взвешенного осадка, отстойниках-осветлителях; центрифугирование в гидроциклонах; фильтрование через фильтрующие перегородки или зернистые материалы.

Значительно более сложные методы приходится применять для очистки воды от коллоидных и, тем более, от растворенных частиц. Выбор метода зависит от того, в каком состоянии находится вещество: коллоидном, молекулярном или диссоциированном на ионы.

Для удаления коллоидных частиц используют *физико-химические методы* – флотацию, коагуляцию и флокуляцию, нарушающие кинетическую устойчивость этих частиц, а также электрофлотацию и электрокоагуляцию.

*Физико-химические методы* применяются также для удаления растворенных примесей. Для веществ, находящихся в молекулярном состоянии, используются сорбционные методы, десорбция аэрированием, экстракция, дистилляция, эвапорация и мембранные методы. Для извлечения веществ, диссоциированных на ионы, применимы ионный обмен, обратный осмос, магнитная обработка воды, кристаллизация.

*Химические методы* очистки являются деструктивными, но наиболее изученными и до сих пор широко применяемыми из-за высокой степени очистки. К ним можно отнести использование реакций химического взаимодействия при объединении различных стоков (чаще всего в целях нейтрализации кислых и щелочных сточных вод, а в некоторых случаях с целью удаления содержащихся в стоках компонентов в виде малорастворимых соединений), окислительно-восстановительные процессы (хлорирование, озонирование, окисление кислородом воздуха и др.).

*Электрохимические* методы основаны на пропускании через сточную воду постоянного электрического тока; они позволяют очищать воду от веществ, находящихся в молекулярном, ионном и коллоидном состоянии. К ним относятся анодное окисление и катодное восстановление, электрокоагуляция, электрофлотация, электродиализ. Все эти процессы протекают на электродах. Они позволяют извлекать из сточных вод ценные продукты при относительно простой автоматизированной технологической схеме очистки. Недостатком электрохимических методов является их высокая энергоемкость.

*Термические методы* являются по сути деструктивными и требуют больших затрат энергии в виде подводимого тепла или холода. Термоокислительные процессы применяются для обезвреживания органических примесей сточных вод. Для очистки минерализованных стоков можно использовать выпаривание, адиабатное испарение, вымораживание и др.

*Биохимические методы* основаны на жизнедеятельности микроорганизмов, которые способствуют окислению или восстановлению органических веществ, находящихся в сточных водах в виде тонких суспензий, коллоидов или в растворенном состоянии и являющихся для микроорганизмов источником питания и дыхания, в результате чего и происходит удаление указанных загрязнений. Биохимическая очистка может осуществляться в естественных и искусственных, в аэробных и анаэробных условиях, применяется для глубокой очистки сточных вод.

Методы очистки в каждом конкретном случае зависят от состава исходной воды и необходимой степени ее очистки. При этом должны соблюдаться требования к технологиям и сооружениям, а окончательное решение производится на основании технико-экономических показателей. На практике приходится обычно применять комбинацию различных методов.

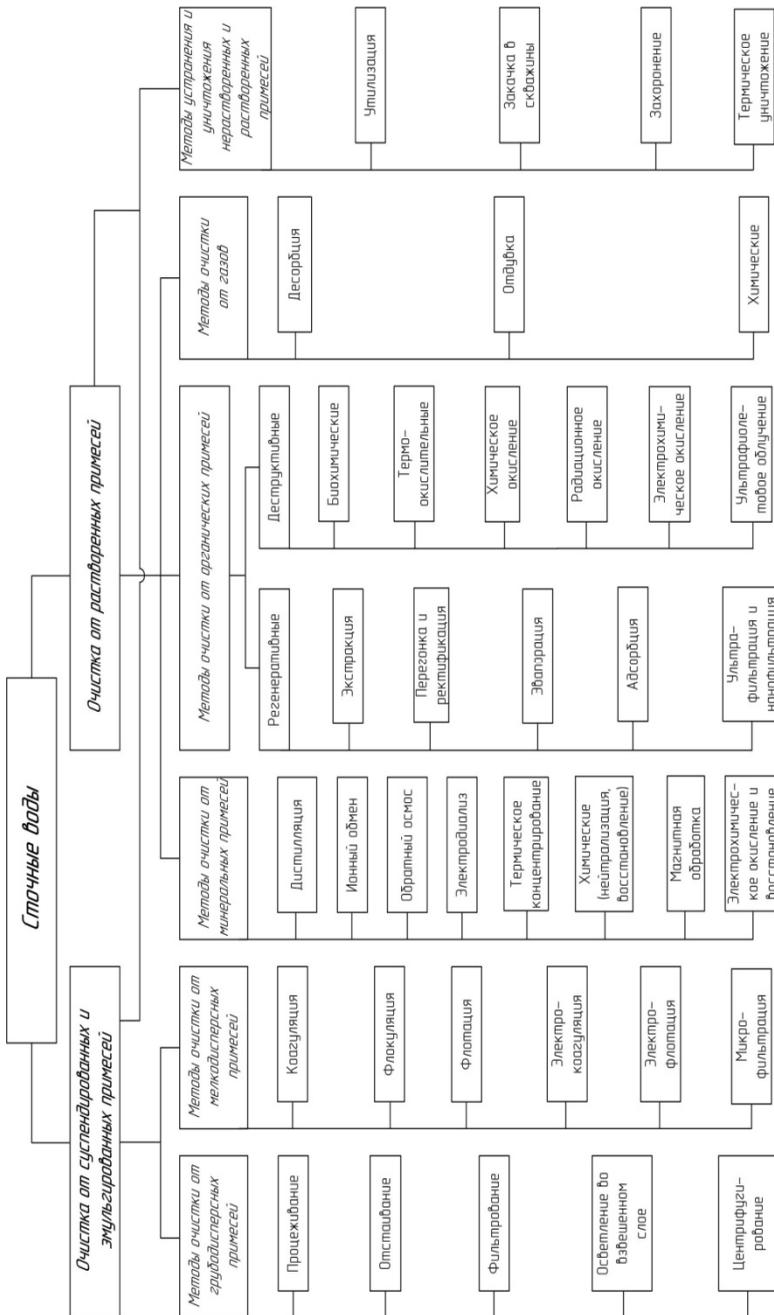


Рисунок 1.9 – Классификация методов очистки сточных вод

## Контрольные вопросы

1. Классификация природных вод по минерализации
2. Общая, карбонатная, некарбонатная жесткость
3. Виды природных вод
4. Структура и физические свойства воды
5. Категории потребления воды
6. Классификация вод по целевому назначению, их характеристика
7. Норма водопотребления
8. Основные методы обработки исходной воды
9. Сточные воды и их классификация по условиям образования
10. Классификация сточных вод по концентрации примесей
11. Основные виды сточных вод в технологических процессах
12. Норма водоотведения
13. Коэффициенты неравномерности водоотведения
14. Пути снижения загрязнений в водных объектах
15. Принципы совершенствования основных технологических процессов с целью минимизации воздействия на водные объекты
16. Принципы совершенствования методов очистки воды
17. Классификация примесей воды: по природе, фазовому состоянию, ВОЗ
18. Фазово-дисперсная классификация примесей с учетом физико-химических свойств (Л.А. Кульского)
19. Исходные принципы классификации Л.А. Кульского
20. Классификация водных объектов в соответствии с видами их использования
21. Характеристика объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования
22. Характеристика объектов рыбохозяйственного значения
23. Основные требования к качеству воды водоемов
24. Условия отведения сточных вод в водные объекты
25. Характеристика систем водоснабжения и их классификация
26. Основные элементы систем водоснабжения
27. Водоотводящие системы и их основные элементы
28. Системы канализации в зависимости от условий поступления сточных вод
29. Требования при выборе системы и схемы водоотведения предприятия
30. Схемы использования воды на предприятиях и их характеристика
31. Схемы оборотного водоснабжения
32. Показатели технического совершенства систем водообеспечения
33. Деструктивные и регенеративные методы очистки воды
34. Основные группы методов очистки воды и их характеристика

## ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

### 2.1 Сооружения первичной обработки вод

*Смесители и усреднители* служат для усреднения расхода и концентраций загрязнений сточных вод, а также для смешения их с реагентами. Используют контактные и проточные сооружения, последние выполняют в виде многокоридорных резервуаров или резервуаров с перемешивающими устройствами. Их устанавливают на входе в очистные сооружения, они позволяют также исключить пиковые расходы воды, поступающей на очистку.

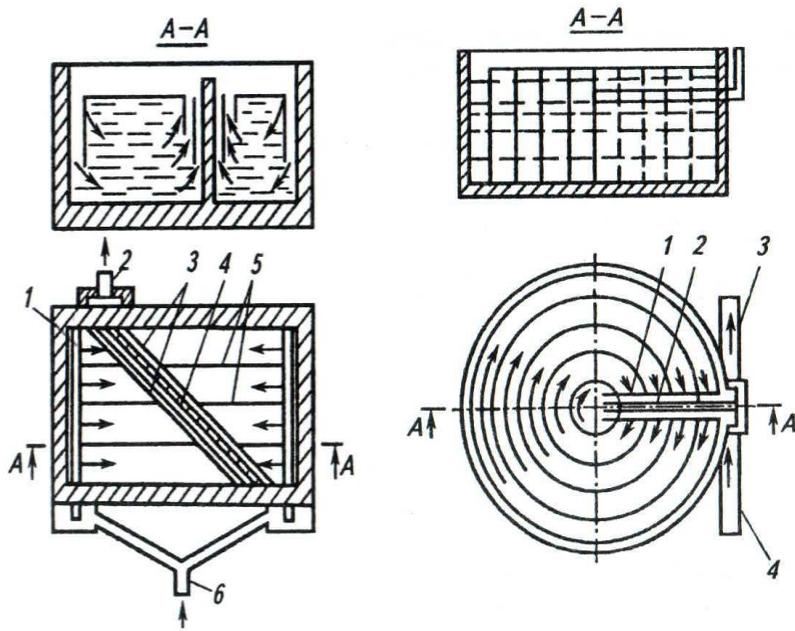
Усреднение в контактных условиях используют при небольших расходах сточных вод, в периодических процессах и для обеспечения высоких степеней выравнивания концентраций.

*Контактные усреднители* используют при небольших расходах сточной воды, в периодических процессах и для обеспечения высоких степеней выравнивания концентраций.

Тип усреднителя необходимо выбирать в зависимости от характера и количества нерастворенных компонентов загрязнений, а также динамики поступления сточных вод. При гашении залповых сбросов предпочтительнее конструкции многоканального типа, при произвольных колебаниях – практически равноценны любые типы усреднителей.

В большинстве случаев применяют *проточные усреднители*, которые выполняют в виде многокоридорных (многоходовых) резервуаров или емкостей с перемешивающими устройствами.

К многоканальным конструкциям относятся прямоугольные и круглые (рисунок 2.1) с неравномерным распределением расхода и объемов по каналам. Усреднение в них достигается за счет *дифференцирования потока*, который, поступая через распределительный лоток, делится на ряд струй, протекающих по коридорам различной длины. В результате в сборном лотке смешиваются струи воды различной концентрации, поступившие в усреднитель в разное время. Количество коридоров в каждой половине усреднителя должно быть не менее 5-6.

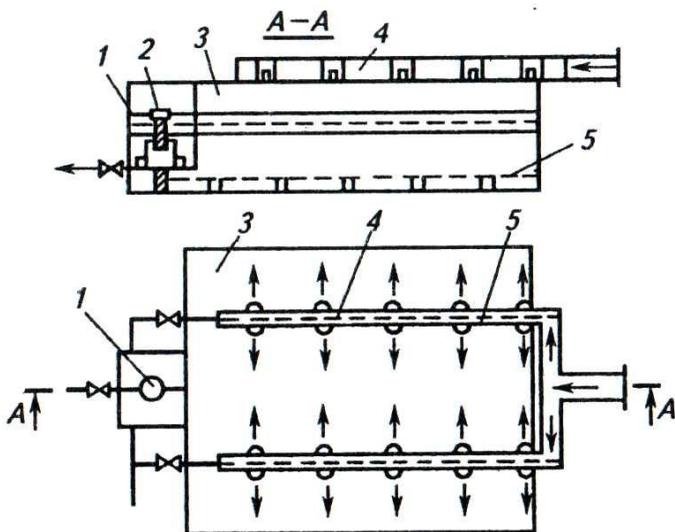


- а – прямоугольный  
 1 – распределительный лоток;  
 2 – водоотводной канал; 3 – сборные лотки; 4 – глухая перегородка;  
 5 – вертикальные перегородки;  
 6 – подвод воды
- б – круглый  
 1 – распределительный лоток;  
 2 – перегородка; 3 – сборный лоток;  
 4 – подвод воды

Рисунок 2.1 – Конструкции многокоридорных усреднителей

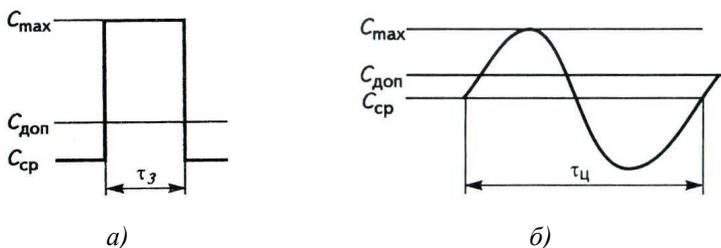
Перемешивание жидкости может быть обеспечено *механическими мешалками или барботажем воздухом*. Усреднитель-смеситель барботажного типа (рисунок 2.2) применяют для усреднения стоков независимо от режима их поступления при содержании взвесей до 500 мг/л, с механическим перемешиванием – свыше 500 мг/л.

Изменение концентрации загрязнений в сточных водах может произойти в результате *залпового сброса* или вследствие *циклических колебаний* состава вод (рисунок 2.3), а также произвольно.



1 – выпускная камера; 2 – выпускное устройство; 3 – корпус;  
4 – лоток; 5 – барботер

Рисунок 2.2 – Усреднитель с перемешивающим устройством



а) залповый сброс; б) циклические колебания

$C_{ср}$ ,  $C_{доп}$  и  $C_{max}$  – средняя, допустимая и максимальная концентрации загрязнений;  $\tau_з$  – продолжительность залпового сброса;  $\tau_ц$  – период циклических колебаний

Рисунок 2.3 – Изменение состава сточных вод

Объем многокоридорного усреднителя при залповых сбросах высококонцентрированных сточных вод следует определять по формуле:

$$V = \frac{Q \cdot t_3 \cdot K}{2},$$

где  $Q$  – расход сточных вод,  $m^3/ч$ ;

$t_3$  – длительность залпового сброса, ч;

$K$  – коэффициент усреднения:

$$K = \frac{(C_{\max} - C_{cp})}{(C_{дон} - C_{cp})},$$

Объем усреднителя с *перемешивающим устройством при залповом сбросе* надлежит определять по формулам:

при  $K < 5$ :

$$V_3 = \frac{Q \cdot t_3}{\ln K / (K - 1)},$$

при  $K \geq 5$ :

$$V_3 = Q \cdot t_3 \cdot K.$$

При *циклическом изменении* концентрации сточных вод объем усреднителя находят по уравнению:

$$V_u = \sum_{i=1}^{t_u} q_i,$$

где  $t_u$  – период цикла колебания, ч;

$q_i$  – расход сточных вод за каждый час периода усреднения, м<sup>3</sup>/ч.

Объем усреднителя с *перемешивающим устройством при циклических колебаниях* вычисляют по формулам:

$$\text{при } K < 5: \quad V_n = 0,21 \cdot Q \cdot t_u \cdot \sqrt{K^2 - 1},$$

$$\text{при } K \geq 5: \quad V_n = 0,21 \cdot Q \cdot t_u \cdot K.$$

При *произвольном характере* колебаний концентрации загрязнений сточных вод объем усреднителя с перемешивающим устройством определяется методом подбора. Сначала объем усреднителя принимают примерно равным суммарному притоку сточных вод в часы с концентрацией загрязнений, превышающей допустимую. Затем проверяют правильность принятого объема путем расчета концентрации загрязнения на выходе из сооружения по часам суток, которая в любой период времени не должна превышать допустимую концентрацию:

$$C_{уср} = \sum_{i=1}^t \frac{q_i \cdot C_i}{V_3},$$

где  $C_i$  – концентрация загрязнений в  $i$ -ый час усреднения;

$V$  – объем усреднителя.

### Контрольные вопросы

1. Функции смесителей и усреднителей сточных вод
2. Конструкции усреднителей, принцип действия
3. Залповые сбросы и циклические колебания состава вод
4. Какие параметры используются для определения объемов усреднителей?

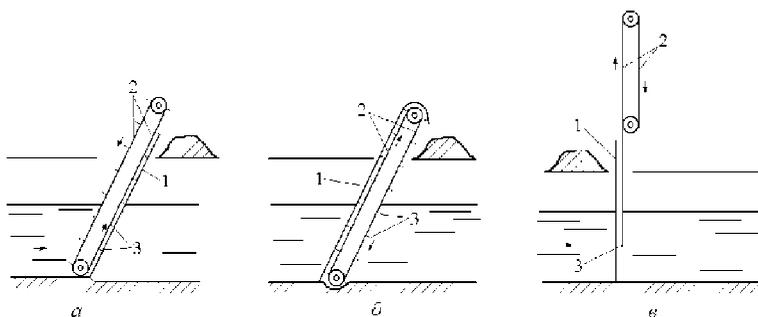
## 2.2 Процеживание

### 2.2.1 Процеживание через решетки

*Процеживание* – первичная стадия очистки сточных вод – предназначено для выделения крупных нерастворимых примесей размером до 25 мм, а также более мелких волокнистых загрязнений, которые в процессе дальнейшей обработки воды препятствуют нормальной работе очистного оборудования.

Для удаления из воды наиболее крупных загрязнений используются *решетки*. Они являются первым элементом всех технологических схем очистки сточных вод и устанавливаются в уширенных каналах перед песколовками. Решетки обычно выполняют роль защитных сооружений и служат, в основном, для извлечения крупных отходов производства (мезда, бумага, тряпье, обломки древесины, камни, мусор), попадание которых в последующие очистные сооружения может вызвать засорение труб и каналов, а также нарушение нормальной работы или поломку движущихся частей оборудования.

Решетки подразделяются на *неподвижные*, *подвижные* или *совмещенные с дробилками* (комминаторы). Они могут быть с механической или ручной очисткой, устанавливаться вертикально или наклонно, под углом 60°. Решетки изготовляют из металлических стержней различной формы, чаще всего круглой или прямоугольной, закрепленных в раме для обеспечения жесткости. Ширину зазоров (прозоров) между ними принимают от 1 до 50 мм, стандартные прозоры равны 16 мм. В последнее время устанавливают механизированные решетки с прозорами 3-6 мм с непрерывно движущимися скребковыми механизмами.



а – московского типа; б – ленинградского типа; в – вертикальная решетка

1 – решетка; 2 – бесконечная цепь; 3 – грабли

Рисунок 2.4 – Схемы неподвижных решеток

Очистку решеток от задержанных загрязнений можно производить вручную, если количество уловленных загрязнений не превышает  $0,1 \text{ м}^3/\text{сут}$ , и механическими граблями. Грабли устанавливаются перед решеткой и после нее. Задержанные на решетках загрязнения измельчают в специальных дробилках и возвращают в поток воды перед решеткой.

Для улавливания различных по размерам примесей можно установить две решетки последовательно под углом к направлению потока, первая решетка с большим размером прозоров, вторая – с меньшим.

Наибольшее применение получили *неподвижные* решетки следующих типов: решетки механические унифицированные РМУ, грабельные механизированные решетки типа МГ, малогабаритные вертикальные – РМВ и РМН. Схемы решеток простейшего типа показаны на рисунке 2.4. Схема установки решетки на рисунке 2.5.

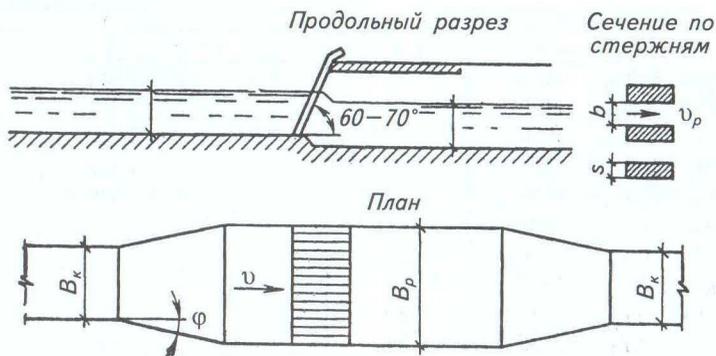


Рисунок 2.5 – Схема установки решетки

Расчет решеток производится на максимальный приток сточных вод и скорость движения жидкости в прозорах решеток, которую принимают  $0,8-1,0 \text{ м/с}$ .

Суммарная площадь живого сечения решеток  $F_c$  определяется:

$$F_c = \frac{Q_{\max}}{v_p},$$

где  $Q_{\max}$  – максимальный расход сточных вод;

$v_p$  – скорость движения воды в прозорах решетки.

Общая ширина решеток:

$$B_p = S(n-1) + bn,$$

где  $S$  – толщина стержня решетки;

$b$  – ширина прозора между стержнями;

$n$  – число прозоров в решетке:

$$n = \frac{Q_{\max}}{b \cdot h \cdot v_p} \cdot k,$$

здесь  $h$  – глубина воды перед решеткой;

$k=1,05$  – коэффициент, учитывающий стеснение прозоров граблями и задержанными загрязнениями.

Размеры стандартных неподвижных решеток составляют: ширина канала, где устанавливаются решетка от 600 до 2500 мм, высота решетки 800-3000 мм, число прозоров 21-107.

Потери напора в решетке можно определить по формуле:

$$h_n = p \xi \frac{v^2}{2g},$$

где  $p$  – коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора из-за засорения решетки,  $k=3$ ;

$\xi$  – коэффициент сопротивления, зависящий от формы стержней:

$$\xi = \beta \left( \frac{S}{b} \right)^{4/3} \sin \alpha,$$

здесь  $\beta$  – коэффициент, равный 2,42 для прямоугольных и 1,72 для круглых стержней;

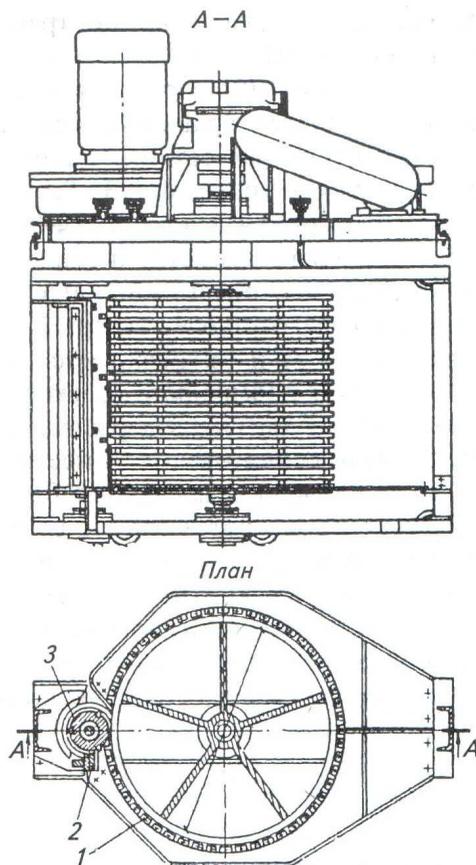
$\alpha$  – угол наклона решетки к горизонту;

$v$  – скорость движения воды перед решеткой, (0,7 – 0,8 м/с).

Решетки размещают в отдельных отапливаемых и вентилируемых помещениях, снабженных грузоподъемными приспособлениями.

Для задержания и измельчения загрязнений, непосредственно в потоке сточной воды без извлечения их на поверхность, применяют комбинированные решетки-дробилки (типа РД), круглые решетки-дробилки КРД (рисунк 2.6), радиальные РРД, вертикальные ВРД.

*Решетка-дробилка* состоит из щелевого барабана с режущими пластинами и резцами, корпуса с трепальными гребнями и приводного механизма. Сточная вода поступает на вращающийся барабан 1 с щелевидными отверстиями, проходит внутрь барабана со скоростью 1,2 м/с и движется далее вниз к выходу из решетки-дробилки. Крупные фракции загрязнений задерживаются на перемычках между щелевыми отверстиями барабана и транспортируются при вращении барабана к трепальным гребням 2, закрепленным на неподвижном корпусе. Измельчение отходов при взаимодействии поочередно подходящих резцов, закрепленных на барабане 3, с режущими кромками неподвижных трепальных гребней происходит по принципу работы гильотинных ножниц. Такая конструкция является компактной, а процесс можно полностью автоматизировать. Решетки-дробилки задерживают и дробят отбросы в потоке воды, в результате чего отпадают процессы транспортирования их к дробилке и улучшаются санитарные условия.



1 – решетка; 2 – трепальный гребень; 3 – дробильный барабан

Рисунок 2.6 – Круглая решетка-дробилка КРД

С целью повышения технологической эффективности создаются новые конструкции решеток с прозорами 6-10 мм. В зарубежной практике широко применяются *самоочищающиеся решетки ступенчатого принципа действия «РОТОСКРИН»*. Процеживающая часть этих решеток состоит из двух чередующихся пакетов из параллельных пластин – стационарного и подвижного. Подвижные пластины перемещают собранные продукты на одну ступень вверх, в результате последовательных движений уловленные примеси поднимаются до точки выгрузки и попадают на транспортер. Вода проходит не только через прозоры размером 3-6 мм, но и через слой уловленных загрязнений, что позволяет удерживать примеси размером меньше прозоров.

## 2.2.2 Процеживание на ситах

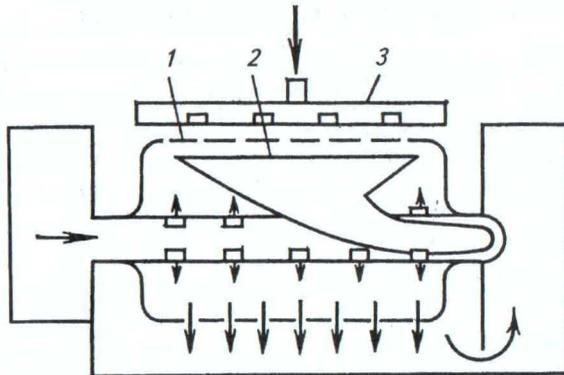
Для удаления более мелких взвешенных веществ  $d_v=1-3$  мм, при концентрации  $C_n < 300$  мг/л применяются *сетки (сита)* и *микрофильтры*. В практике используются вращающиеся сита трех типов: барабанные, дисковые и ленточные, а также плоские (подъемные) сита.

*Барабанные сетки* представляют собой непрерывно действующий механизм в виде вращающегося барабана, на который натянута тонкая металлическая сетка. Размеры ячеек барабанных сеток составляют 0,3-0,8 мм, а микрофильтров – 0,04-0,07 мм. Рабочая сетка располагается между поддерживающими, имеющими ячейки размером 10×10 мм. Барабан погружен в воду на глубину 0,6-0,85 от диаметра и вращается в камере со скоростью 0,1-0,5 м/с. Сточная вода может фильтроваться как через внутреннюю, так и через наружную поверхность барабана в зависимости от ее подвода. Скорость процеживания 0,8-1,0 м/с. Задержанные сеткой примеси смываются промывной водой с давлением 0,15-0,2 МПа и удаляются вместе с ней. Расход промывной воды составляет (1-2) % от количества очищенной воды. Эффективность очистки воды на барабанных сетках (40-45) %, а на микрофильтрах (40-60) %.

Производительность сита зависит от диаметра барабана ( $D_6=1,5-3,0$  м) и его длины ( $L_6=1,0-4,5$  м) и составляет от 4 до 45 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

Такие сита устанавливают для очистки сточных вод текстильной, целлюлозно-бумажной, кожевенной промышленности; на них задерживаются такие примеси как древесное волокно, шерсть, мездра.

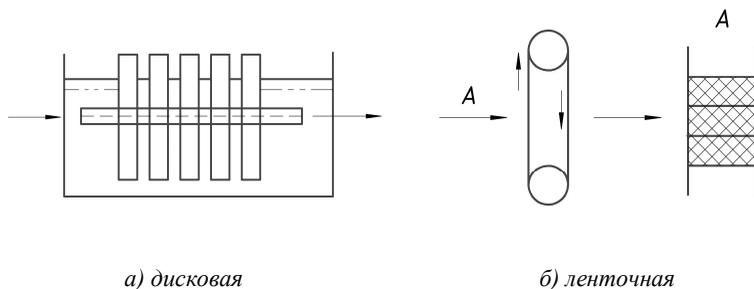
Схема барабанной сетки показана на рисунке 2.7.



1 – вращающийся барабан; 2 – лоток для сбора промывных вод;  
3 – устройство для промывки

Рисунок 2.7 – Схема барабанной сетки

*Дисковые сита* – это сетки, натянутые на диск (рисунок 2.8, а), в них осуществляется лобовая подача воды, параллельно оси вращения дисков. Сита имеют диаметр  $D=1,2-3,0$  м, пропускная способность изменяется от 2,4 до 48 тыс.м<sup>3</sup>/сут.



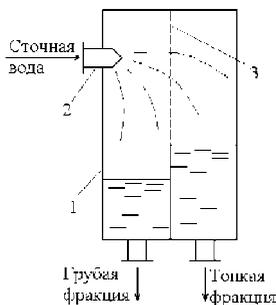
а) дисковая

б) ленточная

Рисунок 2.8 – Сетки

*Ленточная сетка* (рисунок 2.8, б) представляет собой непрерывное проволочное полотно, перекинутое через расположенные один над другим два горизонтальных барабана. Полотно состоит из отдельных секций (металлических рамок), шарнирно соединенных между собой. Сетка изготавливается из тонкой проволоки (латунной, медной или нержавеющей стали) диаметром 0,2-0,4 мм с ячейками от 0,3×0,3 до 2×2 мм.

*Плоская подъемная сетка* представляет собой проволочное полотно, натянутое на стальную раму. Рабочая сетка изготавливается из проволоки диаметром 1,0-1,5 мм с ячейками от 2×2 до 5×5 мм, поддерживающая из более толстой проволоки диаметром 2-5 мм с ячейками 20×20 мм. Размеры таких сеток 0,8×2,0 м. Скорость прохождения воды в них 0,2-0,4 м/с.



1 – корпус; 2 – сопло; 3 – сетка

Рисунок 2.9 – Схема фракционатора

Для разделения взвешенных веществ на фракции могут быть использованы *фракционаторы*, основной частью которых является вертикальная сетка, разделяющая емкость на две части (рисунок 2.9). Сточная вода через сопло поступает внутрь фракционатора и делится на грубую и тонкую фракции.

Диаметр отверстий сетки 0,06-0,10 мм. При разделении (50-80) % взвешенных частиц остается в грубой фракции.

### Контрольные вопросы

1. Какие примеси удаляют из воды процеживанием?
2. Виды решеток, их конструктивные особенности
3. Расчет неподвижных решеток
4. Конструкции сеток
5. Характеристика барабанной сетки
6. Дисковые, ленточные и плоские подъемные сетки
7. Принцип действия фракционатора

## 2.3 Отстаивание

### 2.3.1 Закономерности осаждения взвесей в воде

*Отстаивание* применяют для выделения из сточных вод твердых или жидких примесей под действием гравитационных сил. Для этого используют различные аппараты и сооружения: песколовки, первичные и вторичные отстойники, нефтеловушки, илоуплотнители, смоло-, жиरो- и маслоуловители.

Современные конструкции сооружений по отстаиванию являются, как правило, проточными и осаждение взвесей в них происходит при непрерывном движении воды от входа к выходу. Скорости движения воды при этом должны быть малы, а поток почти полностью лишен, так называемой, транспортирующей способности. Осаждение взвеси в таком потоке подчиняется с известным приближением законам осаждения в неподвижном объеме жидкости. Эти законы хорошо изучены только применительно к осаждению зернистой агрегативно устойчивой взвеси.

Основным параметром, на основании которого рассчитывают размеры отстойной аппаратуры, является скорость осаждения взвешенных частиц в непроточной воде при постоянной температуре (*гидравлическая крупность*  $U_0$ ).

Как правило, сточные воды, содержащие взвешенные примеси, имеют частицы различной формы и размера. На характер осаждения частиц влияют их размеры, форма, плотность, степень шероховатости

их поверхности, режим движения воды и ее вязкость, условия обтекания и сопротивления среды и др.

Для ламинарного, переходного и турбулентного режимов осаждения шарообразных частиц скорость свободного осаждения вычисляют из формулы:

$$Re_o = \frac{Ar}{18 + 0,6\sqrt{Ar}},$$

где  $Re_o = U_o d \rho / \mu_e$  – число Рейнольдса;

$Ar = d^3 \rho_e^2 g (\rho_v - \rho_e) / \mu_e^2 \rho_e$  – число Архимеда.

При отстаивании *мелких частиц* или частиц малой плотности, осаждающихся с малой скоростью ( $Re < 1$ ), когда на сопротивление движению частицы влияет только сила гравитации; скорость падения шарообразной частицы описывается уравнением Стокса:

$$U_o = \frac{d^2 g (\rho_v - \rho_e) R}{18 \mu_e},$$

где  $R$  – коэффициент, учитывающий влияние концентрации взвешенных веществ и реологические свойства системы.

$$R = \xi \frac{\mu_o}{\mu_e}, \quad \xi = \frac{V_e}{V_e + V_v},$$

где  $d$  – диаметр частицы;

$\rho_v, \rho_e$  – плотность соответственно частицы и воды;

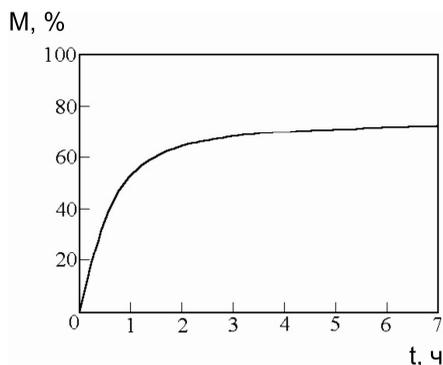
$V_e, V_v$  – объемная доля жидкой и твердой фазы;

$\mu_o, \mu_e$  – вязкость соответственно чистой и сточной воды.

Приведенное выражение для скорости выпадения взвеси может быть использовано только для монодисперсной системы.

В реальных условиях сточные воды представляют собой полидисперсные агрегативно-неустойчивые системы, в которых наблюдается стесненное осаждение, сопровождающееся столкновением частиц, трением между ними, изменением их формы, плотности и других физических свойств. *Скорость стесненного осаждения меньше скорости свободного осаждения* вследствие возникновения восходящего потока жидкости и большей вязкости среды.

Скорость осаждения полидисперсной системы непрерывно изменяется во времени. Для таких систем кинетика осаждения устанавливается экспериментально и характеризуется *кривой осаждения взвеси* (рисунок 2.10).



$M$  – масса выпавшей взвеси в % по отношению к первоначальной;  
 $t$  – время осаждения, ч

Рисунок 2.10 – Кинетика осаждения взвеси

Кривые выпадения взвеси характеризуют ее гранулометрический состав и поведение при отстаивании. Чем круче начальный участок кривой, тем больше крупность и неоднородность взвеси и тем скорее она осаждается.

Такая зависимость позволяет найти количество вещества, которое осаждается в течение любого промежутка времени.

Эффект отстаивания определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{C_n - C_k}{C_n} \cdot 100\%,$$

где  $C_n$ ,  $C_k$  – соответственно начальная и конечная концентрации взвешенных веществ в воде.

Расчетные параметры для отстойников (скорость осаждения взвеси и продолжительность пребывания воды в отстойнике) определяют путем технологического моделирования в лабораторных условиях.

Основной методики моделирования является подобие кривых выпадения взвесей, получаемых при различных высотах слоя воды:

$$T/t = H/h,$$

где  $t$ ,  $h$ ,  $T$ ,  $H$  – соответственно время осаждения взвеси и высота слоя воды при моделировании в лаборатории и в реальных условиях.

Для агломерирующихся взвесей указанная зависимость становится непрямолинейной и выражается соотношением:

$$T/t = (H/h)^n,$$

где  $n=0,2-0,5$  – показатель степени, отражающий влияние агломерации в процессе осаждения.

Гидравлическая крупность, соответствующая заданному эффекту осветления в цилиндре-отстойнике с высотой столба воды  $h$ , для про-

ектируемого отстойника высотой  $H$ , может быть найдена по соотношению:

$$U = \frac{1000 \cdot K \cdot H}{t(K \cdot H / h)^n},$$

где  $K$  – коэффициент использования объема сооружения.

При температуре реальной сточной воды:

$$U_o = U(\mu_l / \mu_n),$$

где  $\mu_l$ ,  $\mu_n$  – вязкость воды в лабораторных и производственных условиях.

### 2.3.2 Осаждение частиц в песколовках

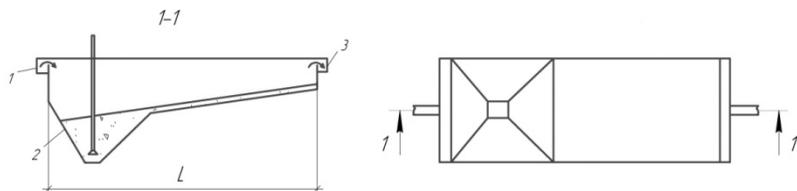
*Песколовки* – это сооружения, предназначенные для выделения из сточных вод тяжелых минеральных примесей, главным образом, песка, крупностью частиц свыше 0,15-0,25 мм с гидравлической крупностью 13-24 мм/с при расходах сточных вод более 100 м<sup>3</sup>/сут. Наряду с минеральными примесями в песколовках могут отстаиваться вещества органического происхождения с гидравлической крупностью близкой к песку.

Работа песколовки основана на действии гравитационных сил. В зависимости от направления основного потока сточной воды их подразделяют на горизонтальные – с прямолинейным или круговым движением воды, вертикальные – с движением воды снизу вверх и песколовки с винтовым (поступательно-вращательным) движением воды; последние, в зависимости от способа создания винтового движения, бывают тангенциальными и аэрируемыми.

Песколовки сооружают из сборных железобетонных элементов унифицированных размеров. Тип песколовки выбирают в зависимости от производительности очистной станции, схемы очистки сточных вод, обработки осадка, характеристики взвешенных веществ. Горизонтальные и аэрируемые песколовки используют при расходах более 10 тыс. м<sup>3</sup>/сут, с круговым движением воды – до 70 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Вертикальные песколовки работают неэффективно и применяются в исключительных случаях при соответствующем обосновании.

Число песколовки или их отделений принимают не менее двух, причем все они должны быть рабочими.

*Горизонтальные песколовки с прямолинейным движением воды* имеют прямоугольную форму в плане (рисунок 2.11).



1 – водоподводящий лоток; 2 – бункер для осадка; 3 – водоотводящий лоток

Рисунок 2.11 – Схема горизонтальной песколовки

Пропускная способность таких песколовок 70-280 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Скорость движения воды при максимальном притоке 0,3 м/с, при минимальном – 0,15 м/с. Продолжительность пребывания воды в них не менее 30 с. Для поддержания постоянной скорости потока в песколовке устраивают не менее двух отделений, включением или отключением одного из них добиваются оптимальной скорости. Расчетную (рабочую) глубину песколовок  $H_p$  принимают 0,25-1,0 м, строительную – 0,5-2,0 м. При объеме песка более 0,1 м<sup>3</sup>/сут обязательно механизированное удаление осадка. Песок сдвигается к приемку, расположенному в начале сооружения, скребками, при этом происходит частичная промывка осадка. Из приемка песок удаляют гидроэлеваторами или песковыми насосами.

Площадь живого сечения одного отделения горизонтальной песколовки определяют по формуле:

$$F = \frac{q}{v \cdot n},$$

где  $q$  – максимальный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с;

$v = 0,15-0,3$  м/с – средняя скорость движения воды;

$n$  – количество отделений.

Затем находят размеры отделения в поперечном сечении  $B$ :

$$B = \frac{q}{H_p v}.$$

Длину песколовки вычисляют по формуле:

$$L = k \frac{H_p \cdot v}{U_0},$$

где  $H_p = 0,25-1,0$  м – глубина проточной части песколовки;

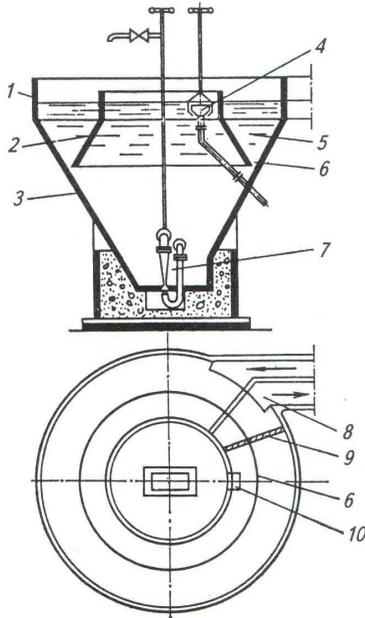
$U_0$  – гидравлическая крупность песка, м/с;

$k$  – коэффициент, учитывающий влияние турбулентности и других факторов на работу песколовки:

$$k = \frac{U_0}{\sqrt{U_0^2 - \omega^2}},$$

где  $\omega$  – вертикальная турбулентная составляющая:

$$\omega = 0,05v.$$



- 1 – круглый резервуар; 2 – цилиндр с усеченным конусом; 3 – коническое днище; 4 – погружная воронка для удаления всплывающих веществ; 5 – кольцевой лоток; 6 – щелевое отверстие для отвода осадка; 7 – гидроэлеватор для удаления песка; 8 – водослив для поддержания постоянного уровня воды; 9 – полупогружная перегородка для задержания всплывающих частиц; 10 – отверстия для отвода всплывших частиц в воронку

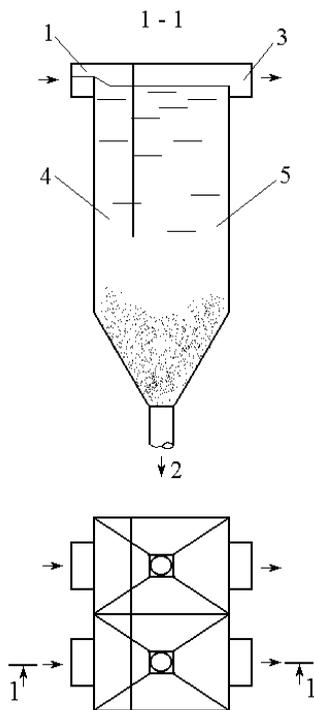
Рисунок 2.12 – Песколовка с круговым движением рабочего потока

Песколовки с круговым движением воды (рисунок 2.12) являются разновидностью горизонтальных песколовков и представляют собой круглый в плане резервуар 1 с кольцевым периферийным лотком 5 для протекания сточной воды. Осадок собирается в коническое днище 3, откуда его удаляют гидроэлеваторами 7. Сточные воды поступают в песколовку по открытому лотку и направляются затем в кольцевой лоток по тангенциальному вводу. Водослив 8 поддерживает постоянный уровень воды на выходе. Всплывшие частицы удаляются из пес-

коловки через погружную воронку 4. Такие песколовки диаметром 4 и 6 м рассчитаны на пропускную способность от 1,4 до 70 тыс.м<sup>3</sup>/сут при двух отделениях глубиной от 2 до 3 м. Они нашли применение на предприятиях нефтепереработки, т. к. совмещают функции песколовки и нефтеловушки.

В горизонтальных песколовках задерживается до (65-75) % всех минеральных загрязнений, содержащихся в воде.

*Вертикальные песколовки* рассчитаны на производительность от 100 до 5000 м<sup>3</sup>/сут и состоят из приемного 4 и отстойного 5 отделений, а также осадочной части (рисунок 2.13).



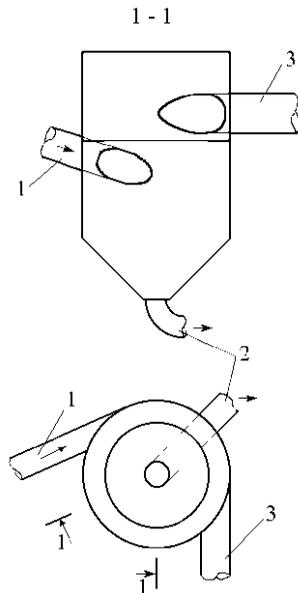
1 – подача сточной воды; 2 – удаление осадка; 3 – отвод очищенной воды;  
4 – приемное отделение; 5 – отстойное отделение

Рисунок 2.13 – Схема вертикальной песколовки

Скорость движения воды в приемном отделении 0,1 м/с, в отстойном 0,05 м/с. Высота рабочей (осадочной) части песколовки 0,3-1,0 м, общая высота до 3,2 м.

*Тангенциальные песколовки* имеют круглую в плане форму (рисунок 2.14). Вода в них подается по касательной к цилиндрической части

сооружения, что вызывает вращательное движение песка, способствует отмывке от песка органических веществ и предотвращает их выпадение в осадок.



*1 – подача сточной воды; 2 – удаление осадка; 3 – отвод очищающей воды*

Рисунок 2.14 – Схема тангенциальной песколовки

Песок, содержащийся в сточной воде, прижимается к стенкам сооружения за счет центробежной силы и отделяется от воды в результате образующегося нисходящего течения. Нагрузку на песколовку принимают 110-130 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) при максимальном притоке, ее диаметр не более 6 м. Глубина песколовки конструктивно принимается равной половине ее диаметра. При скорости движения в подающем лотке 0,6-0,8 м/с задерживается около 90 % минеральных примесей.

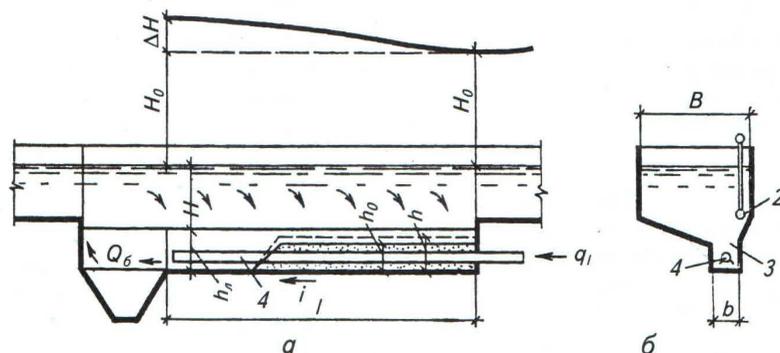
Площадь отделения песколовки в плане определяется по зависимости:

$$F = \frac{Q_{\max}}{q},$$

где  $Q_{\max}$  – максимальный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/ч;

$q$  – допустимая нагрузка песколовки по жидкости, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

Аэрируемые песколовки представляют собой прямоугольные или круглые в плане резервуары, в которые осуществляется подача воздуха (рисунок 2.15). Воздух способствует вращению воды и тем самым повышению эффекта осаждения. В горизонтальной аэрируемой песколовке вдоль одной из стенок на расстоянии 45-60 см от дна по всей длине сооружения устанавливают аэраторы 2 из дырчатых труб с отверстиями 3-5 мм, а под ними устраивают лоток для сбора песка 3.



*a* – продольный разрез; *б* – поперечный разрез;  
 1 – рабочая зона; 2 – аэратор; 3 – песковой лоток; 4 – смывной трубопровод

Рисунок 2.15 – Схема горизонтальной аэрируемой песколовки

Интенсивность аэрации 3-5 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч). Поступательная скорость движения воды в таких песколовках 0,05-0,12 м/с, вращательная 0,25-0,3 м/с, продолжительность пребывания воды в песколовке 2-3 мин. Общая глубина песколовки 0,7-3,5 м, отношение ширины отделения песколовки к глубине  $B:H = 1:1,5$ . Осадок из аэрируемых песколовок содержит до (90-95) % песка и при длительном хранении не загнивает. Такие песколовки имеют производительность от 70 до 280 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

### 2.3.3 Осаждение примесей в отстойниках

Отстойники являются основными сооружениями для механической очистки сточных вод, используются для удаления оседающих или всплывающих примесей сточных вод, главным образом, органических. Классификация отстойников приведена на рисунке 2.16.

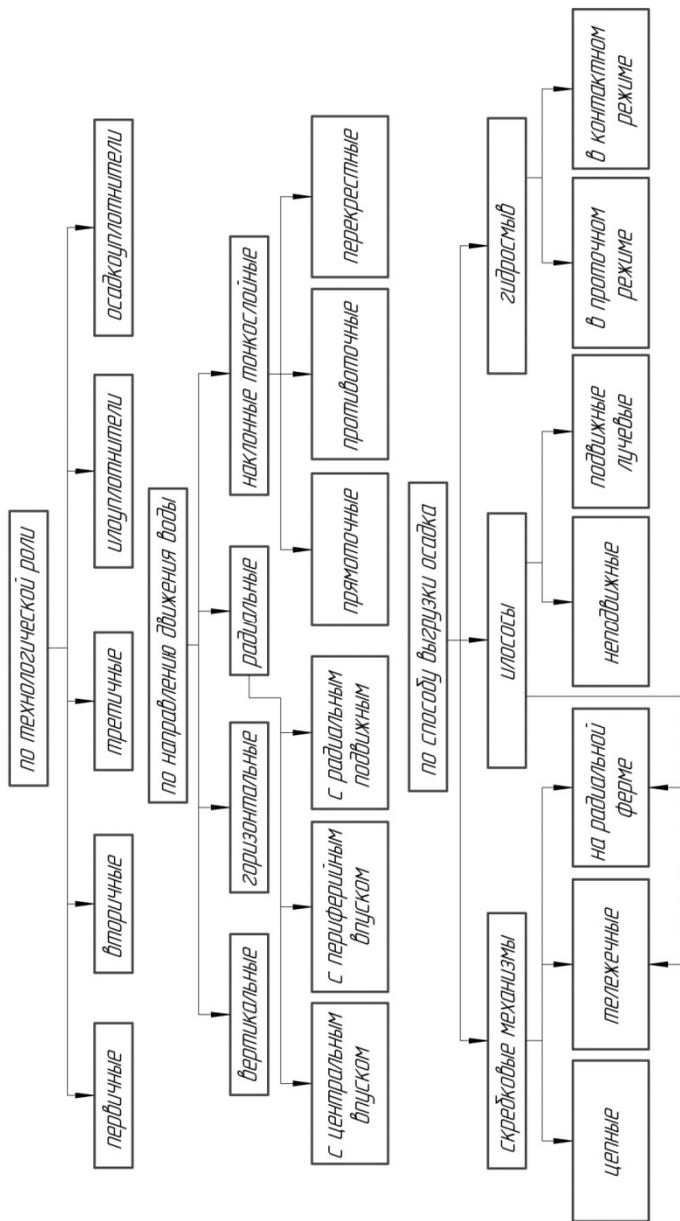


Рисунок 2.16 – Классификация отстойников

В зависимости от назначения отстойников в технологической схеме очистной станции они подразделяются на *первичные*, устанавливаемые в начале технологической схемы перед сооружениями биологической или физико-химической очистки, *вторичные* – в конце схемы после биологической очистки и *третичные*, а также *осадко- и илоуплотнители*.

По режиму работы различают отстойники периодического действия (контактные) и непрерывные (проточные). Первые применяются для очистки малых количеств сточных вод, вторые – для любых объемов загрязненных вод.

Отстойники разделяются на следующие основные конструктивные типы в зависимости от направления движения воды – *вертикальные, горизонтальные, радиальные, тонкослойные*. К отстойникам относят также *осветлители*, где одновременно с отстаиванием сточная вода фильтруется через слой взвешенного осадка, комбинированные сооружения – *осветлители-перегниватели* и *двухъярусные отстойники*, в которых наряду с осветлением воды осуществляется сбразивание и уплотнение выпавшего осадка.

Тип отстойника и его конструкцию следует выбирать в зависимости от производительности, концентрации и характера нерастворенных примесей в воде, способа обработки осадка, уровня стояния грунтовых вод, местных условий площадки строительства. В каждом конкретном случае выбор типа отстойников должен определяться в результате технико-экономического сравнения нескольких вариантов. Число первичных отстойников (или секций) надлежит принимать не менее двух, вторичных – не менее трех. Вертикальные отстойники применяют при производительности очистной станции до 20 тыс.м<sup>3</sup>/сут, горизонтальные – свыше 15 тыс.м<sup>3</sup>/сут, радиальные – свыше 20 тыс.м<sup>3</sup>/сут, осветлители-перегниватели – до 30 тыс.м<sup>3</sup>/сут, двухъярусные отстойники – до 10 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

В большинстве случаев *эффект очистки в отстойниках* составляет (50-70) % при продолжительности отстаивания 1-3 ч; эффективность работы осветлителей достигает 70 %.

Для расчета отстойника необходимы следующие данные.

1. Максимальный расход сточных вод  $Q_{\max}$ , м<sup>3</sup>/с.
2. Концентрация взвешенных веществ  $C_n$ , мг/л, в т. ч. легких (масла, нефтепродукты) и тяжелых.
3. Требуемая степень очистки или допустимое содержание взвешенных веществ в осветленной воде  $C_k$ , мг/л по санитарным нормам или технологическим требованиям. Эффективность очистки определяют:

$$\mathcal{E} = \frac{(C_n - C_k)}{C_n} \cdot 100, \%$$

4. Гидравлическая крупность частиц находится по кривым выпадения взвесей (кинетика отстаивания)  $\Theta = f(t)$ , полученным в лабораторных условиях:

$$U = \frac{1000 \cdot K \cdot H}{t \cdot (K \cdot H / h)^n}, \quad U_0 = U \cdot \mu_a / \mu_{np}.$$

Объем отстойной (проточной) части любого отстойника:

$$V_{om} = Q_{max} \cdot T,$$

поверхность осаждения:

$$S_{om} = \frac{Q_{max}}{U_0},$$

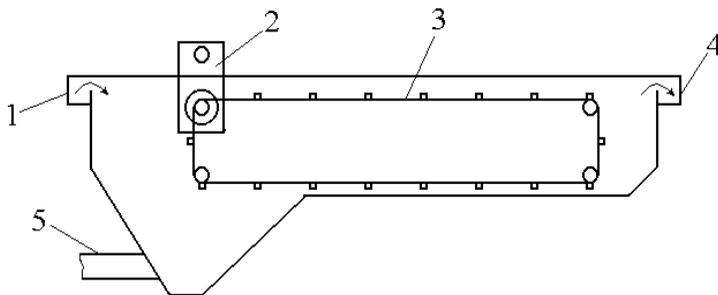
где  $Q_{max}$  – максимальный расход сточных вод;

$T$  – продолжительность отстаивания;

$U_0$  – гидравлическая крупность.

Эффективность осаждения повышается при введении в воду коагулянтов и флокулянтов, способствующих укрупнению частиц и увеличению скорости их осаждения.

*Горизонтальные отстойники* представляют собой прямоугольные в плане резервуары, выполненные из железобетона. Вода поступает в отстойник с торцевой стороны. Для более равномерного распределения воды по сечению отстойника устраивают водораспределительные и водосборные устройства в виде поперечных водосливов, дырчатых перегородок и желобов. Схема горизонтального отстойника приведена на рисунке 2.17.



1 – водоподводящий лоток; 2 – привод скребкового механизма;  
3 – скребковый механизм; 4 – водоотводящий лоток; 5 – отвод осадка

Рисунок 2.17 – Схема горизонтального отстойника

Вода через водоподводящий лоток 1 поступает в отстойник, а водоотводящим лотком 4 выводится из отстойника. Осадок с помощью скребкового механизма 3 собирается в приямок.

В отстойнике каждая частица движется с потоком воды в горизонтальном направлении со скоростью  $v$  и вниз под действием силы тяжести со скоростью  $U_o$ . Таким образом, скорость перемещения каждой частицы будет представлять равнодействующую двух этих скоростей. В отстойнике успеют осесть только те частицы, траектория которых пересекает дно отстойника в пределах его длины.

Рабочая глубина отстойника  $H_p = 1,5-4$  м, отношение длины к глубине  $L: H_p = 8-12$  (до 20). Ширина отстойника  $B=(2-5) H_p$  зависит от способа удаления осадка и обычно находится в пределах 6-9 м. Первичные отстойники спроектированы на производительность от 25 до 100 тыс.м<sup>3</sup>/сут.

Длина горизонтального отстойника может быть определена:

$$L = \frac{v \cdot H_p}{K(U_o - W)},$$

где  $v$  – средняя расчетная скорость в проточной части отстойника, принимается 5-10 мм/с;

$U_o$  – гидравлическая крупность взвеси, мм/с;

$K = 0,5$  – коэффициент использования объема отстойника;

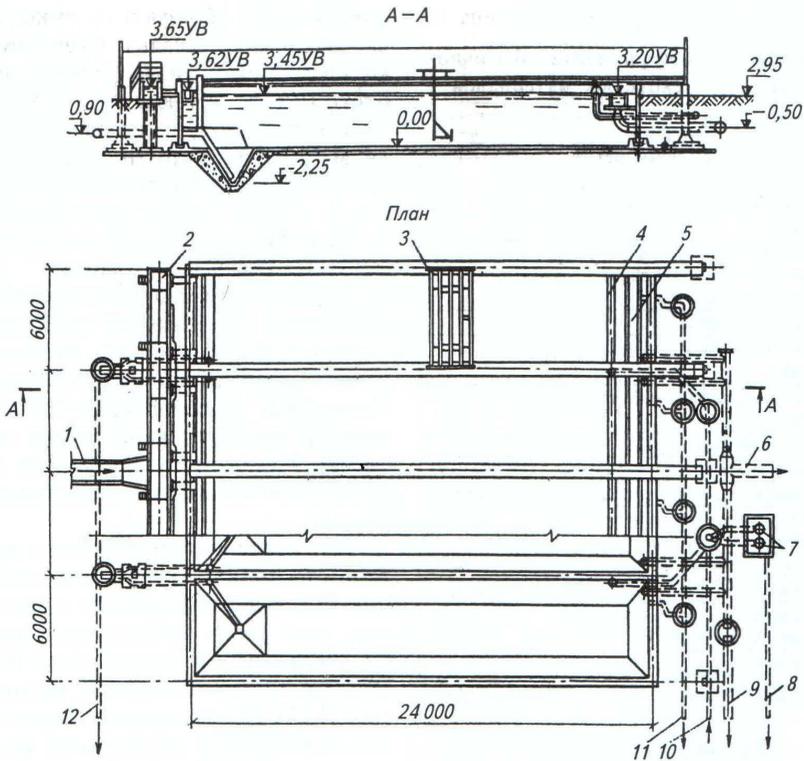
$W$  – вертикальная турбулентная составляющая,  $W=0,05v$ .

Осадок, выпавший на дно отстойника, скребковым механизмом сгребается к иловому приямку, откуда удаляется плунжерным насосом. Уклон днища 0,005 в сторону бункера для сбора осадка.

Продолжительность отстаивания составляет 1-3 ч. Эффективность осаждения до 60 %.

Конструкция типового горизонтального отстойника приведена на рисунке 2.18.

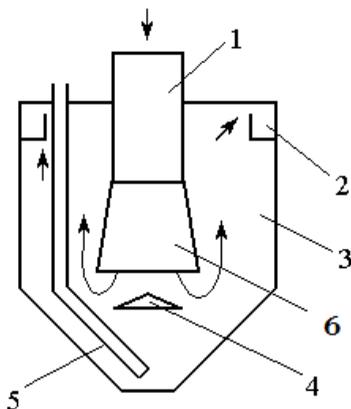
Очищаемая вода по водоподающему лотку 1 поступает в распределительный лоток 2 и отдельные секции отстойника. Пройдя по всей длине отстойника осветленная вода собирается водосборным лотком 5 и отводится по трубопроводу 6. Выпавший на дно осадок скребковым механизмом 3 сгребается в приямок сырого осадка и отводится по трубопроводу 12. Всплывшие легкие вещества собираются поворотной трубой с щелевыми отверстиями для удаления плавающих веществ 4 и отводятся по трубопроводу 8.



1 – водоподводящий лоток; 2 – распределительный лоток; 3 – скребковый механизм; 4 – поворотная труба с щелевидными прорезями для удаления плавающих веществ; 5 – сборный лоток; 6 – отводящий трубопровод осветленной воды; 7 – камера плунжерных насосов; 8 – трубопровод для удаления плавающих веществ; 9 – трубопровод для аварийного сброса; 10 – трубопровод активного ила; 11 – трубопровод для опорожнения; 12 – трубопровод сырого осадка

Рисунок 2.18 – Горизонтальный первичный отстойник

Вертикальные отстойники представляют собой цилиндрический (или квадратный в плане) резервуар с коническим дном, образующим емкость для накопления осадка. Различные типы вертикальных отстойников отличаются конструкцией впускных и выпускных устройств. Наиболее распространенным типом является отстойник с впуском воды через центральную трубу, снабженную в нижней части растробом и отражательным щитом (рисунок 2.19).



*1 – центральная труба; 2 – водосборный лоток; 3 – отстойная часть;  
4 – отражательный щит; 5 – иловая труба; 6 – раструб*

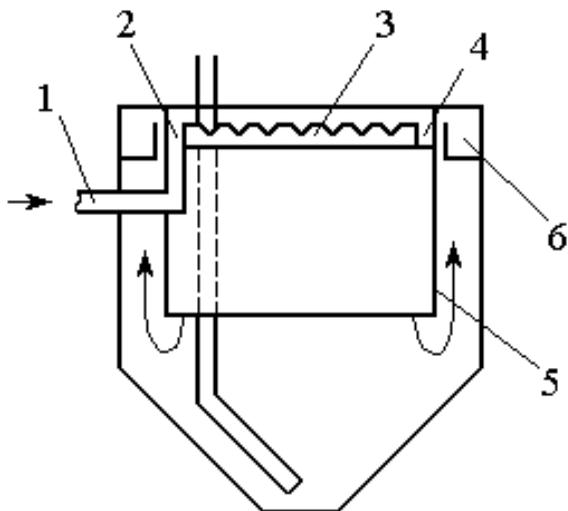
Рисунок 2.19 – Схема вертикального отстойника

Сточная вода подводится по центральной трубе 1 и спускается по ней вниз. При выходе из трубы она меняет направление движения и медленно поднимается вверх к периферийному водосборному лотку 2. Осаждение происходит в восходящем потоке, скорость которого равна 0,2-0,7 мм. Высота зоны осаждения 2,7-3,8 м. Каждая частица движется с водой вверх со скоростью  $v$  и под действием силы тяжести вниз со скоростью  $U_o$ . При  $U_o > v$  частицы оседают, при  $U_o < v$  уносятся с потоком воды вверх.

Эффективность осаждения в вертикальных отстойниках на (10-20) % ниже, чем в горизонтальных.

Диаметр вертикальных отстойников 4-9 м, уклон стенок днища 50-60°.

*Вертикальные отстойники с нисходяще-восходящим потоком воды (рисунок 2.20) и с периферийным впуском* отличаются только конструкцией впускных и выпускных устройств, однако они имеют в 1,3-1,5 раза большую производительность, чем с центральной трубой. Впускное устройство у них выполнено в виде кольцевого распределительного лотка 4 переменного сечения с зубчатым водосливом 3.



1 – водоподводящая труба; 2 – приемная камера; 3 – зубчатый водослив;  
 4 – распределительный лоток; 5 – кольцевая перегородка;  
 6 – отвод осветленной воды

Рисунок 2.20 – Схема вертикального отстойника  
 с нисходяще-восходящими потоками воды

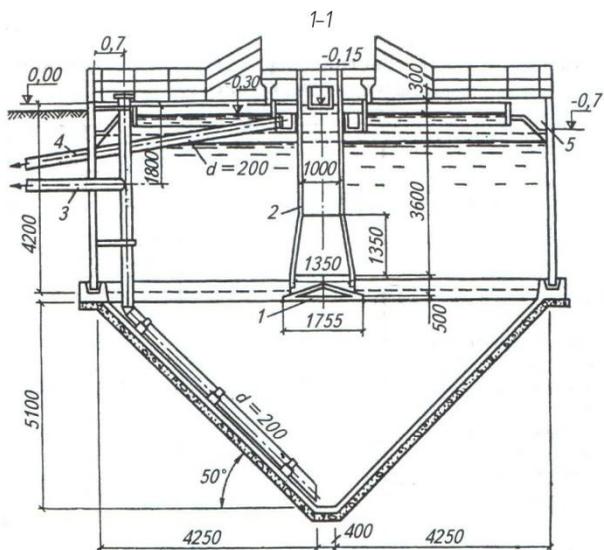
Радиус вертикальных отстойников рассчитывают по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{Q}{3,6\pi K(U_o - \omega)'}}$$

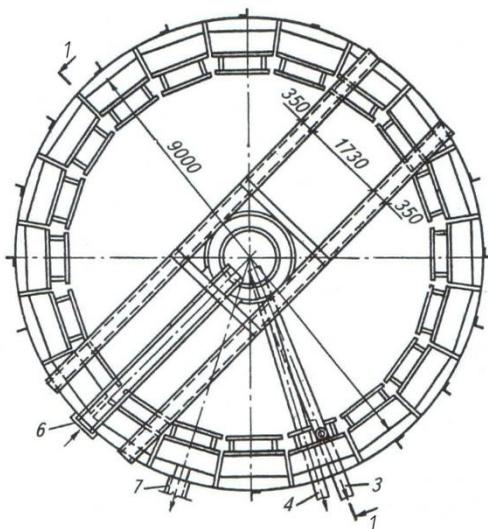
где  $Q$  – расчетный расход сточных вод;

$K$  – коэффициент, принимаемый для вертикального отстойника с центральной впускной трубой  $K=0,35$ , для других конструкций вертикальных отстойников  $K=0,65-0,7$ .

Конструкции типовых вертикальных отстойников приведены на рисунках 2.21 и 2.22.

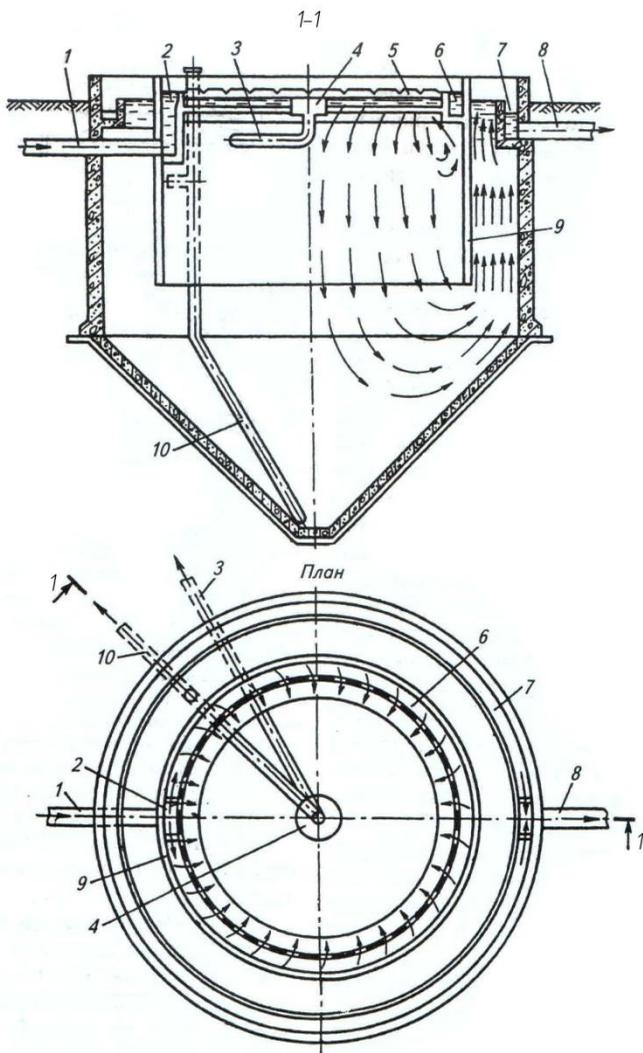


План



1 – отражательный щит; 2 – центральная труба; 3 – труба для выпуска осадка; 4 – то же, плавающих веществ; 5 – водосборный лоток; 6 – подводящий лоток; 7 – отводящий лоток

Рисунок 2.21 – Вертикальный первичный отстойник  
Союзводоканалпроекта



1 – подающая труба; 2 – приемная камера; 3 – трубопровод для удаления плавающих веществ; 4 – приемная воронка для удаления плавающих веществ; 5 – зубчатый водослив; 6 – распределительный лоток; 7 – периферийный лоток для сбора осветленной воды; 8 – отводящий трубопровод; 9 – кольцевая полупогружная перегородка; 10 – трубопровод для отвода ила

Рисунок 2.22 – Первичный вертикальный отстойник с нисходяще-восходящим потоком

*Радиальные отстойники* представляют собой круглые в плане резервуары диаметром от 18 до 50 м и более. Они предназначены для очистки больших количеств сточных вод (более 20 тыс. м<sup>3</sup>/сут). Эти отстойники по сравнению с горизонтальными более надежны в эксплуатации, рассчитаны на высокую производительность, экономичны. В качестве недостатка можно отметить наличие вращающейся фермы со скребками.

Известны радиальные отстойники трех конструктивных модификаций: с центральным или периферийным впуском воды и вращающимся сборно-распределительным устройством (УВР).

Наибольшее распространение получили *отстойники с центральным впуском воды* (рисунок 2.23), которая поступает по центральной трубе 2 снизу вверх, а затем движется от центра к периферии. Скорость течения при этом меняется от максимальной в центре до минимальной на периферии, на середине радиуса она составляет 5-10 мм/с. Глубина проточной части отстойника  $H_p = 1,5-5$  м, отношение диаметра к глубине  $D:H_p = 6-12$  (до 30). Эффективность осаждения в них составляет 60 %.

Осадок, выпавший на дно отстойника, сгребается скребковым механизмом 1, укрепленным на вращающейся ферме, к приемку, расположенному в центре, откуда удаляется насосом или под действием гидростатического давления по трубопроводу 4.

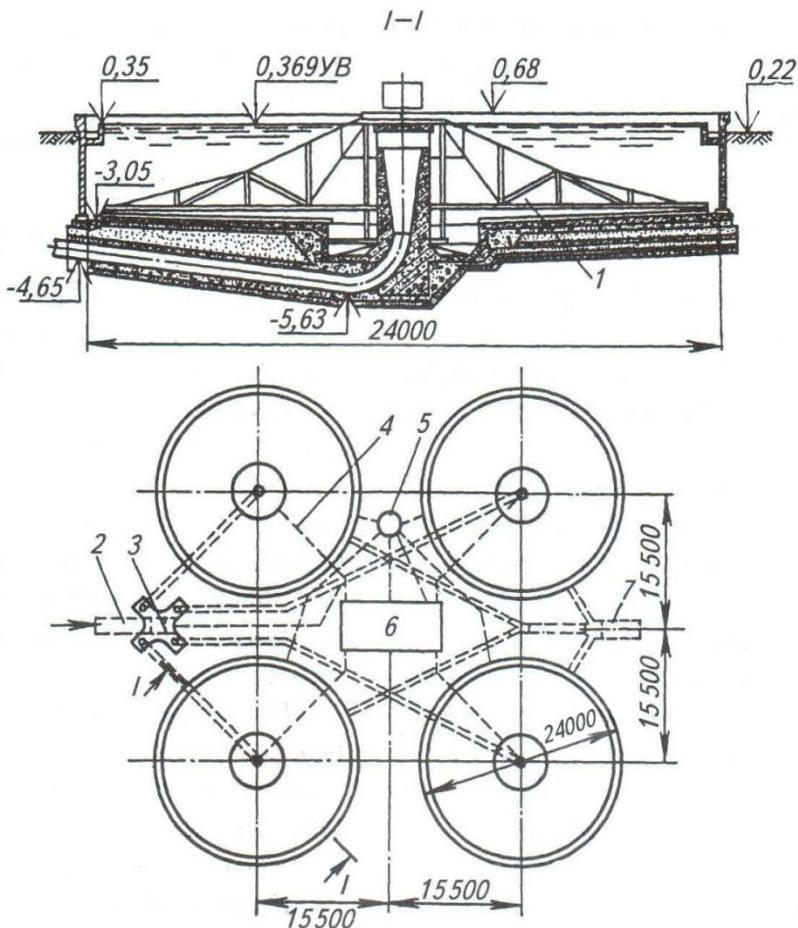
В *отстойниках с периферийным впуском воды* достигается в 1,2-1,3 раза большая эффективность очистки и в 1,3-1,6 большая производительность, чем в обычных радиальных отстойниках. Распределительное устройство представляет собой периферийный кольцевой лоток с зубчатым водосливом или щелевыми донными отверстиями и полупрогруженную перегородку, которые образуют с бортом отстойника кольцевую зону, где происходит быстрое гашение энергии входящих струй, выделение и задержание плавающих веществ. Вода входит в рабочую зону отстойника через кольцевое пространство, образуемое нижней кромкой перегородки и днищем, а отводится через центральную трубу.

Радиус радиальных отстойников определяется так же, как у вертикальных:

$$R = \sqrt{\frac{Q}{3,6\pi K(U_o - \omega)'}}$$

где Q – расчетный расход сточных вод;

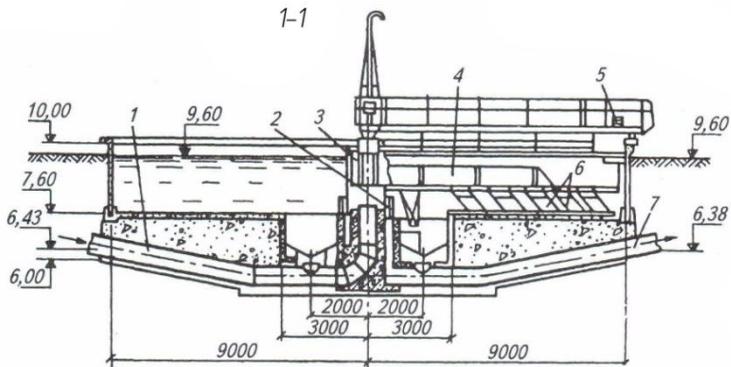
K=0,45 – коэффициент объемного использования отстойника.



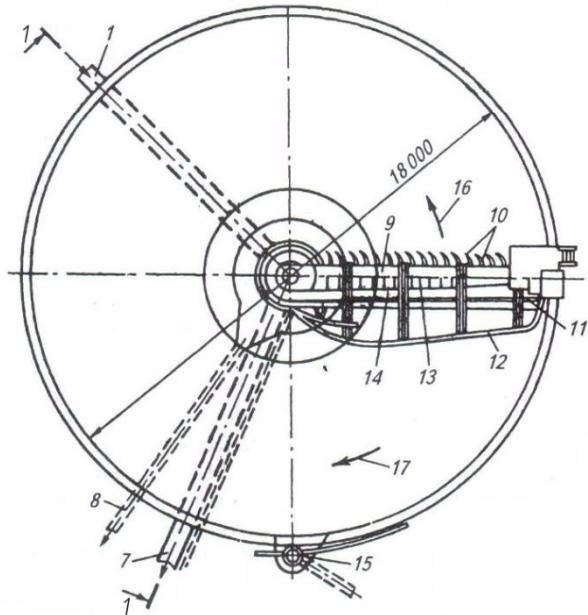
1 – шлоскреб; 2 – подводный трубопровод; 3 – распределительная чаша;  
 4 – трубопровод сырого осадка; 5 – жиросборник; 6 – насосная станция  
 сырого осадка; 7 – отводящий трубопровод

Рисунок 2.23 – Радиальный первичный отстойник

Отстойники с вращающимся сборно-распределительным устройством (УВР) позволяют отстаивать воду практически в статических условиях, при этом пропускная способность радиального отстойника повышается приблизительно на 40 % (рисунок 2.24).



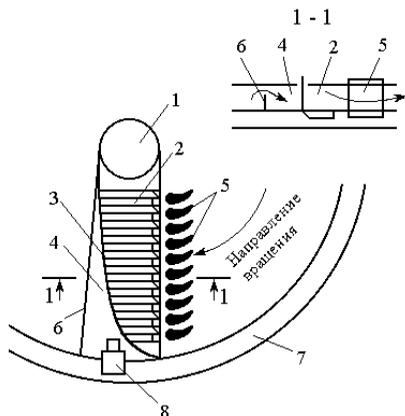
План



1 – подводный трубопровод; 2 – воздушные затворы; 3 – центральная чаша;  
 4 – сборно-распределительное устройство; 5 – периферийный привод;  
 6 – скребки; 7 – отводящий трубопровод осветленной воды; 8 – шлопровод;  
 9 – затопленный лоток; 10 – вертикально подвешенные лопатки; 11 – водослив;  
 12 – полупогружная доска; 13 – щелевое днище; 14 – криволинейная перегородка;  
 15 – камера жиросборника; 16 – направление впуска сточной воды;  
 17 – направление движения сборно-распределительного устройства

Рисунок 2.24 – Отстойник с вращающимся сборно-распределительным устройством

Подача и отвод воды в таком отстойнике осуществляется через центральную чашу 1 и сопрягающееся с ней радиальное подвижное устройство, которое представляет собой желоб, разделенный продольной (криволинейной) перегородкой 3 на распределительный 2 и сборный 4 лотки (рисунок 2.25).



1 – центральная чаша; 2 – водораспределительный лоток; 3 – разделяющая перегородка; 4 – водосборный лоток; 5 – направляющие лопасти; 6 – водозаборная кромка; 7 – кольцевой водосборный желоб; 8 – сифон

Рисунок 2.25 – Схема вращающегося сборно-распределительного устройства

Сточная вода равномерно поступает в отстойную зону по всей длине затопленного вращающегося распределительного лотка через щелевое днище и распределительную решетку из вертикально подвешенных струенаправляющих лопаток 5. Угол установки лопаток может меняться так, чтобы продолжительность пребывания отдельных струй в отстойнике была примерно одинаковой. Осветленная вода отводится через затопленный водослив 6 водосборного лотка 4 и при помощи сифона 8 отводится в периферийный водосборный лоток. Осадок сгребают скребками, укрепленными на ферме вращающегося устройства.

Глубина зоны отстаивания принимается  $H_p = 0,8-1,2$  м, глубина лотка составляет  $H_p = 0,5-1,5$  м, высота нейтрального слоя воды 0,7 м, осадка до 0,3 м. Эффективность осветления достигает 65 %. Радиус таких отстойников рассчитывается по той же формуле, как у вертикальных и радиальных отстойников, только коэффициент К принимается равным 0,85.

Для увеличения эффективности отстаивания используют *тонкослойные* (трубчатые или полочные) *отстойники*. Они могут быть вер-

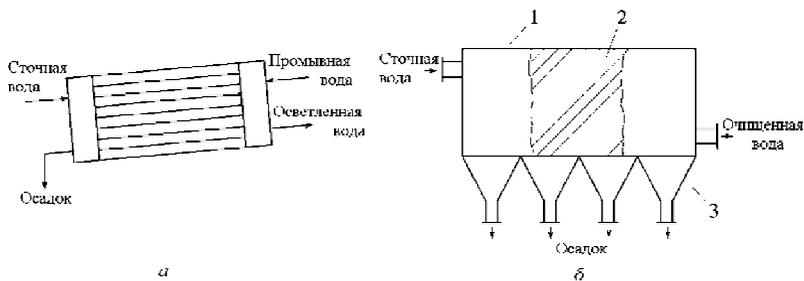
тикальными, радиальными или горизонтальными; состоят из водораспределительной, водосборной и отстойной зон. В таких отстойниках отстойная зона делится трубчатыми или пластинчатыми элементами на ряд слоев небольшой глубины (до 150 мм). При малой глубине отстаивание протекает быстро, что позволяет уменьшить размеры отстойников.

Тонкослойные отстойники *классифицируются* по следующим признакам: по конструкции наклонных блоков на *трубчатые* и *плочные*; по режиму работы – периодического (циклического) и непрерывного действия; по взаимному движению осветленной воды и вытесняемого осадка – с прямоточным, противоточным и смешанным (комбинированным) движением.

Поперечное сечение *трубчатых секций* может быть прямоугольным, квадратным, шестиугольным и круглым. *Плочные секции* монтируются из плоских или гофрированных листов и имеют прямоугольное сечение. Они выполняются из стали, алюминия и пластмассы (полипропилена, полиэтилена, стеклопластиков).

Практическая скорость потока для плочных элементов принимается 5-10 мм/с, для трубчатых элементов – до 20 мм/с. Трубки можно устанавливать с малым (до 5°) и большим (до 45-60°) наклоном. Трубчатый отстойник с небольшим наклоном работает периодически. Сначала проводят отстаивание, затем промывку трубок от осадка. Такие отстойники используются для осветления сточных вод с небольшим содержанием взвесей при расходах от 100 м³/сут до 10 тыс.м³/сут. Эффективность очистки (80-85) %.

В трубчатых отстойниках с большим наклоном вода проходит снизу вверх, а осадок непрерывно сползает по дну трубок в шламовое пространство. Так же работают пластинчатые отстойники (рисунок 2.26).



*а* – трубчатый; *б* – пластинчатый;

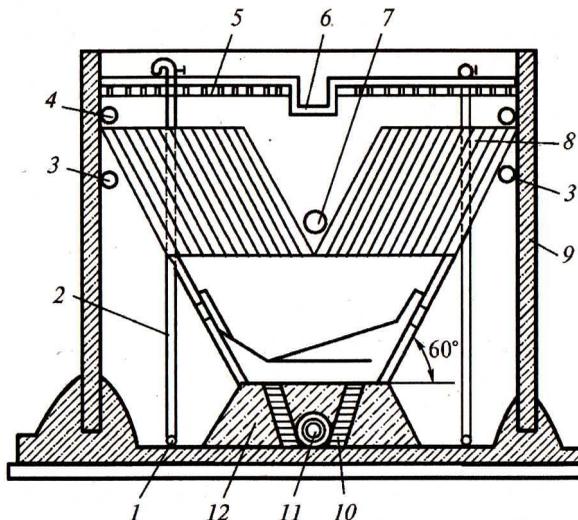
*1* – корпус отстойника; *2* – пластины; *3* – шламоприемник

Рисунок 2.26 – Схема тонкослойных отстойников

Эффективность трубчатых и полочных отстойников практически одинакова и на (25-30) % больше, чем у обычно применяемых отстойников. Высоту тонкослойного пространства рекомендуется принимать равной 1-2 м, расстояние между пластинами – 25-200 мм, длину – 0,6-1 м.

Тонкослойные блоки могут устанавливаться в корпуса обычных отстойников. Продолжительность очистки в таких составляет от 4 до 10 мин.

Схема тонкослойного отстойника приведена на рисунке 2.27.



- 1 – труба для удаления осадка; 2 – труба для выпуска воздуха; 3, 7 – отвод осветленной воды из осадкоуплотнителя; 4 – трубопровод подогрева; 5 – отверстия в поперечных сборных желобах; 6 – сборный лоток; 8 – тонкослойные блоки; 9 – корпус; 10 – кирпичная кладка; 11 – подвод воды в секцию; 12 – гравийная камера хлопьеобразования

Рисунок 2.27 – Тонкослойный отстойник

Вода поступает в секцию по трубопроводу 11 и, пройдя тонкослойные блоки 8, отводится трубопроводами 3 и 7. Осадок удаляется через трубу 1, всплывшие вещества собираются в лоток 6.

### 2.3.4 Удаление осадков из песколовков и отстойников

Выпавший в отстойниках и песколовках осадок должен непрерывно или периодически удаляться из них. Продолжительность хранения осадка зависит от его количества и способности к хранению и загниванию. Легкозагнивающие осадки сточных вод некоторых отраслей

промышленности могут храниться не более суток, например, пищевой промышленности; способные к цементации осадки предприятий стройиндустрии должны удаляться 1-3 раза в сутки.

В вертикальных песколовках и отстойниках осадок сразу выпадает в приямок, откуда под действием гидростатического давления выгружается через центральный илопровод диаметром 200 мм, выпуск которого расположен на 1,5-2 м ниже уровня воды.

В горизонтальных и радиальных сооружениях для их нормальной работы необходимо постоянно или периодически осуществлять следующие технологические операции:

1) сгребание осадка с площади дна сооружений к приямку и удаление собранного осадка на обработку;

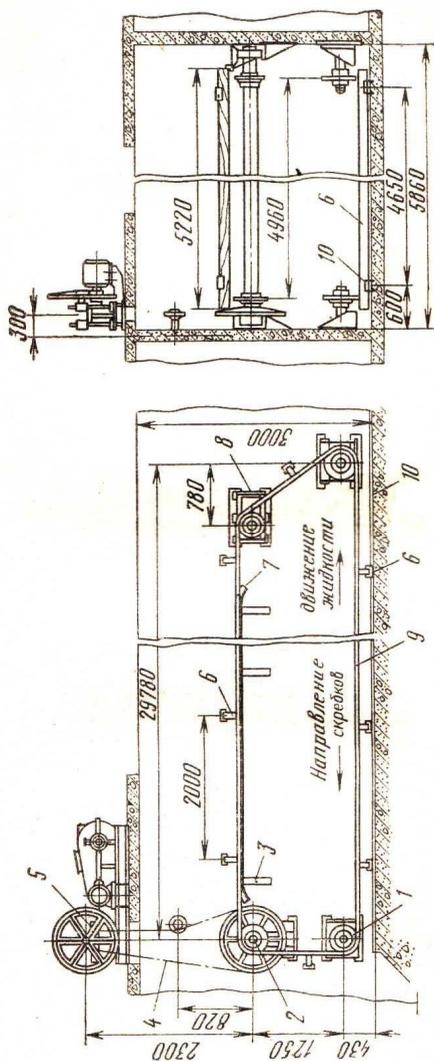
2) сгребание плавающих веществ с поверхности воды к жиросборнику, пеносборному лотку, нефтесборной трубе и удаление собранных плавающих веществ на обработку. Перечисленные операции должны осуществляться без отключения сооружений.

Осадок сгребают *скребковыми механизмами*, которые конструктивно различаются между собой в зависимости от формы, назначения, размеров сооружений, а также по типу привода.

Для сбора осадка в приямки, которые могут располагаться в начале и конце прямоугольных в плане сооружений (по ходу движения воды), или в центральный приямок радиальных сооружений используются: *скребковые цепные механизмы*, скребки-тележки с тяговым приводом и с собственным приводом на ходовых колесах, а также *вращающиеся скребковые устройства* для сгребания осадка, выпавшего на дно отстойника к его центральному приямку, и сбора плавающих веществ с приводом на оси устройства. Возможно также гидромеханическое (направленными струями воды) сгребание осадка и сбора плавающих веществ с приводом на оси устройства.

Удаление осадка из приямка отстойника надлежит предусматривать самотеком под гидростатическим давлением, насосами, предназначенными для перекачки жидкости с большим содержанием взвешенных веществ, гидроэлеваторами, эрлифтами, ковшовыми элеваторами, грейферами и т. п. Гидростатическое давление при удалении осадков необходимо принимать не менее 1,5 м в ст. (15 кПа) – для первичных отстойников, 1,2 м в ст. (12 кПа) – для вторичных. Диаметр труб для удаления осадка должен быть не менее 200 мм.

В горизонтальных отстойниках и песколовках для перемещения осадков по дну применяют механизмы двух типов: ленточные (цепные или канатные) и тележечные. Последние предпочтительнее при тяжелых осадках, в частности, они применяются в песколовках.



1 — консольные звездочки; 2 — вал ведущих звездочек; 3 — кронштейны; 4 — пластинчато-роликковая цепь; 5 — приводная станция; 6 — деревянные скребки; 7 — уголки для опоры цепи со скребками; 8 — натяжное устройство; 9 — тяговые цепи; 10 — швеллеры для опоры скребков

Рисунок 2.28 — Скребокный цепной механизм для прямоугольных сооружений

Ленточный механизм (рисунок 2.28) состоит из бесконечной ленты (цепи) 9, на которой закрепляются скребки 6. Последние могут быть выполнены в виде деревянных прямоугольных перегородок или «полутруб», полученных при продольном разрезе труб на две половины; при любой конструкции длина скребков равна ширине отстойника (или его отделения). У днищ скребки движутся против движения сточ-

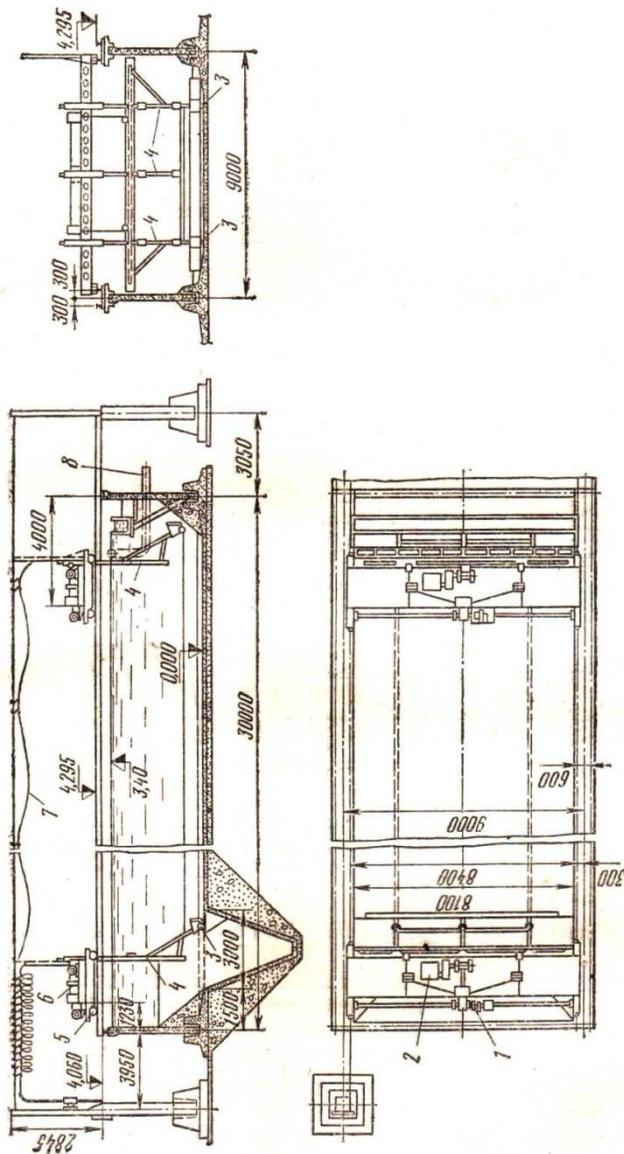
ной воды и сгребают осадок к бункеру. Обратный ход происходит над водой, при этом собираются плавающие на поверхности воды примеси, например, нефтепродукты. Разработаны скребковые механизмы шириной 6 и 9 м со скоростью движения 0,6 м/мин. Привод механизма осуществляется с помощью приводной станции 5 от электродвигателя через редукторы, которые располагаются в начале отстойника; мощность электродвигателя 1,7 кВт с частотой вращения 960 об/мин.

*Тележечный механизм* (рисунок 2.29) представляет собой самоходную тележку 6, опирающуюся на четыре металлических катка 3, которые движутся по рельсам. Осадок сгребается к приямку скребком, укрепленным с помощью стойки 4 на тележке.

Возвратно-поступательное движение тележки по рельсам, установленным на бетонных бортах отстойника, осуществляется с помощью механизма передвижения 1. Последний состоит из электродвигателя и двух редукторов и передает крутящий момент на два ходовых колеса. Число секций, которые обслуживает тележечный скребок, зависит от количества осадка и продолжительности перерыва между операциями по его удалению. Скребок из одной секции отстойника в другую может перемещаться специальной тележкой. При рабочем движении тележки, т. е. при сгребании осадка со дна отстойника (песколовки) в приямок, скребок опущен и перемещается до крайнего левого положения (приямка). После чего скребок поднимается вверх и движется в обратном направлении, собирая плавающие вещества.

Из горизонтальных отстойников (песколовок) возможно *гидромеханическое удаление* осадка через перфорированные трубы в течение 20-30 мин (рисунок 2.30). Устройство отличается простотой конструкции и эксплуатации. Вдоль прямоугольного сооружения по дну прокладывается труба, заглушенная в конце. По образующим трубы приварены патрубки с соплами под углом к горизонтальной и вертикальной плоскостям. Расстояние между осями труб от 2 до 3 м в зависимости от вида днища – плоского или призматического. При необходимости сбора осадка, в приямок по трубе подается вода с определенным напором, за счет действия выходящих из патрубков струй и уклона дна осадок передвигается в приямок. Скорость движения осадка в конце труб не менее 1 м/с, в отверстиях – 1,5-2 м/с; диаметр отверстий не менее 25 мм, расстояние между ними – 300-500 мм.

Напорные гидравлические системы смыва осадка, включающие телескопические дырчатые трубы с насадками, резервуар промывной воды и емкости для сбора и уплотнения осадка перед подачей его на сооружения обезвоживания, следует проектировать для отстойников с тяжелым, трудно удаляющимся осадком, образующимся при осветлении мутных и высокомутных вод.



1 – механизм передвижения скребка; 2 – механизм подъема скребка; 3 – катки для опоры скребка; 4 – стойки скребка; 5 – ходовые колеса; 6 – самоходная тележка; 7 – трапелли для подачи переменного трехфазного тока; 8 – трубопровод для отвода плавающих веществ

Рисунок 2.29 – Тележный скребокый механизм для прямоугольных сооружений

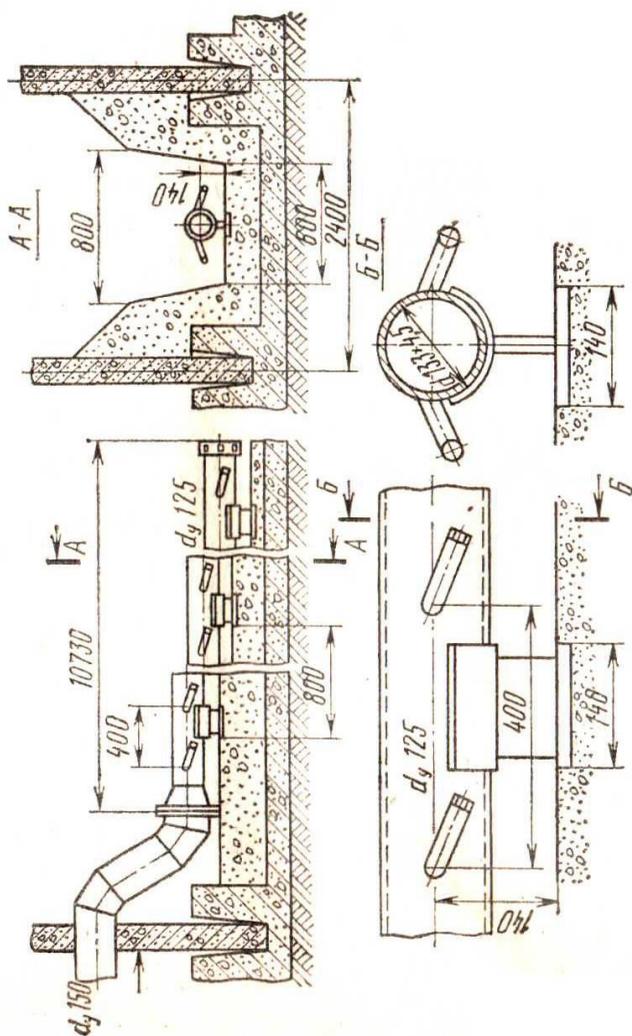
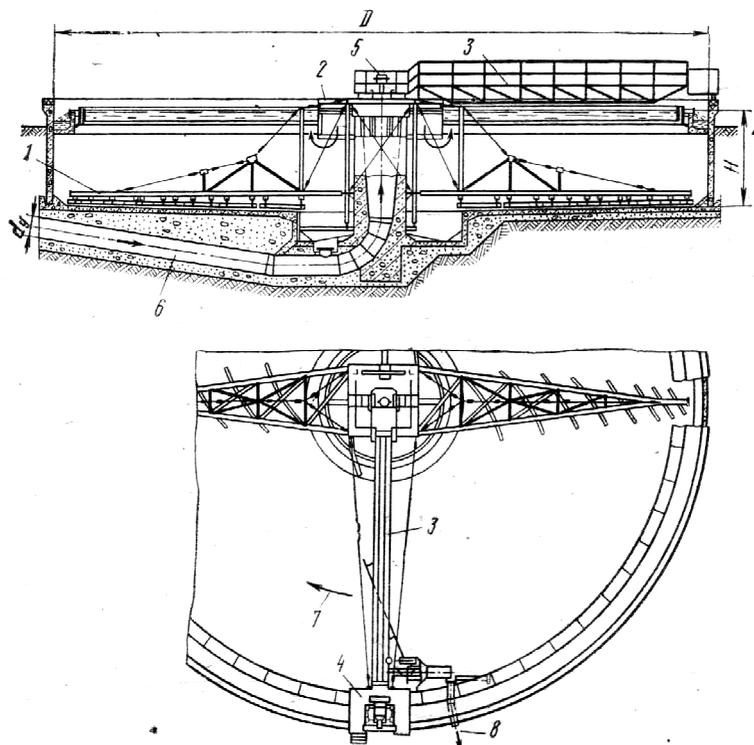


Рисунок 2.30 – Устройство для гидромеханического удаления осадка

В радиальных отстойниках выпавший на дно осадок перемещается к центрально расположенному приемку *илоскребами*, *закрепленными на вращающейся ферме* (рисунок 2.31). Скребковое крыло 1 представляет собой пространственную ферму, имеющую треугольное поперечное сечение, со скребками, расположенными под углом  $35^\circ$  к направлению илоскреба. Последний имеет два скребковых крыла, которые подвешены к вращающейся платформе 2. Вся эта система образует единую конструкцию. Частота вращения 1,5-3 об/ч в зависимости от диаметра отстойника. При диаметре отстойника более 24 м вместо центральной вращающейся фермы устраивают ферму, движущуюся по монорельсу, окружающему отстойник. Вращение платформе придается от приводной тележки 4, установленной на внешнем конце моста 3 и движущейся по поверхности борта отстойника. По верху фермы устроен мостик (подход) к центральной опоре.



1 – скребковые крылья; 2 – платформа; 3 – мост; 4 – приводная тележка;  
5 – кольцевой токоприемник; 6 – подвод жидкости; 7 – направление вращения  
илоскреба; 8 – сток плавающих веществ в жиропровод

Рисунок 2.31 – Илоскреб для радиального первичного отстойника

Плавающие на поверхности воды вещества собираются с помощью погружной доски, прикрепленной к мосту илоскреба. При вращении илоскреба эта доска «сгоняет» плавающие вещества к качающемуся бункеру, откуда они поступают в жировую трубу отстойника 8.

Из приемка радиального отстойника осадок удаляют под гидростатическим давлением (из отстойника небольшого диаметра) или с помощью плунжерных насосов.

Легкоподвижные осадки, например, активный ил вторичных отстойников, можно удалять непосредственно из отстойной зоны с помощью *илососов (сосунов)* без сгребания осадков в приемок. Илоприемные воронки насосов размещаются на таких же подвижных фермах, на каких закрепляются скребки. Частота вращения фермы 0,8-1,5 об/ч, в зависимости от диаметра. Мощность электродвигателя для вращения фермы зависит от диаметра отстойника, плотности осадка, частоты вращения фермы; обычно она составляет 1-10 кВт.

В зависимости от объема выпавшего осадка скребковый механизм работает периодически или непрерывно. В первом случае он включается за 1 ч до начала удаления осадка. При самотечном удалении осадка его влажность равна 95 %, при удалении насосами – 93,5 %. Диаметр иловой трубы определяется расчетом, он должен быть не менее 200 мм.

### **2.3.5 Осветлители и отстойники с аэрацией**

По принципу отстаивания работают *осветлители со слоем взвешенного осадка*. Они применяются при повышенном содержании в сточных водах труднооседающих веществ. В результате совмещения процессов осаждения, хлопьеобразования и фильтрации сточной воды через слой взвешенного осадка эффективность очистки достигает 70 %. Имеются конструкции осветлителей как с предварительной коагуляцией и аэрацией вод, так и без них, с совмещением этих процессов в одном аппарате.

Принципиальная схема осветлителя показана на рисунке 2.32. Воду, обработанную коагулянтами, подают в нижнюю часть осветлителя 1 конической или призматической формы, поэтому скорость восходящего потока постепенно уменьшается. Равномерно распределяясь по его площади, вода поднимается вверх до тех пор, пока скорость выпадения частиц не станет равной скорости восходящего потока (сечение I-I). Выше этого уровня образуется слой взвешенного осадка, через который фильтруется осветляемая вода. Происходит прилипание частиц взвешенной к хлопьям коагулянта, за счет чего увеличивается объем взвешенного слоя. Для поддержания постоянной высоты слоя осуществляется непрерывный принудительный отсос избыточного осадка в осадкоуплотнитель 3. Вода, прошедшая такой своеобразный взвешенный фильтр, продолжает восходящее движение вверх до уровня,

где расположены устройства для ее сбора и отвода 2. Высота слоя воды над слоем взвешенного осадка должна обеспечить задержание частиц, проскочивших взвешенный осадок.



1 – осветлитель; 2 – водосборный желоб; 3 – осадкоуплотнитель

Рисунок 2.32 – Схема осветлителя со слоем взвешенного осадка

В слое взвешенного осадка частицы взвесей прилипают к хлопьям коагулянта; происходит стесненное осаждение взвеси. При этом скорость восходящего потока воды в пределах этого слоя в каждый момент равна скорости выпадения хлопьев и слой взвешенного осадка обладает определенной устойчивостью.

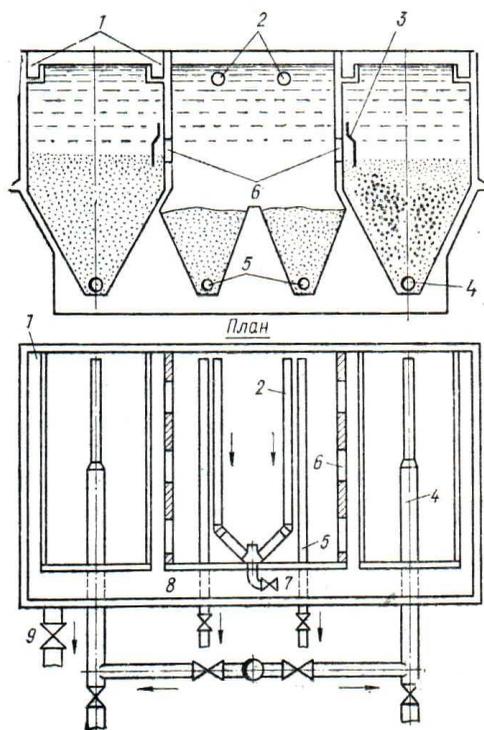
Образование и уплотнение осадка осуществляется в условиях непрерывного поступления взвесей. При этом происходит: 1) стесненное осаждение частиц с образованием из них сплошной пространственной структуры, уменьшением ее объема из-за сжатия пустот между частицами; 2) уплотнение хлопьевидных частиц осадка с удалением воды, заключенной в ячейках хлопьев; 3) сжатие хлопьев. Последний процесс наиболее медленный и поэтому лимитирует уплотнение осадка в целом.

*Конструкции осветлителей* весьма разнообразны и отличаются: 1) по форме рабочей камеры (круглая или прямоугольная); 2) наличию или отсутствию дырчатого днища под слоем взвешенного осадка; 3) способу удаления избыточного осадка (естественный и принудительный); 4) конструкции и месту расположения осадкоуплотнителей (встроенные, выносные).

Наиболее проста конструкция *осветлителя коридорного типа* с вертикальным осадкоуплотнителем и принудительным отсосом осадка (рисунок 2.33). Он представляет собой прямоугольный железобетонный резервуар, разделенный вертикальными перегородками на три

коридора – две камеры осветления и осадкоуплотнитель. Сечение, в котором скорость восходящего потока становится равной 2 мм/с, условно определяет нижнюю границу взвешенного слоя. Нижняя кромка осадкоотводящих окон дает верхнюю расчетную границу взвешенного слоя.

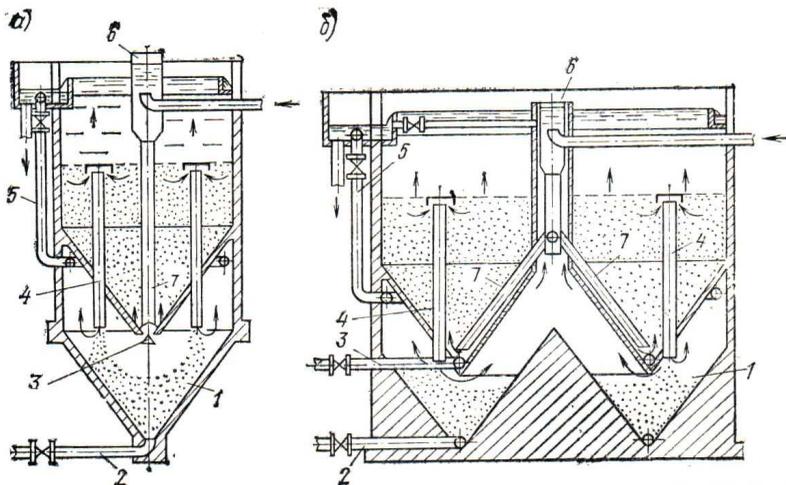
В нижнюю призматическую часть камеры осветления по трубам 4 подается исходная вода, осветленная вода отводится из этих же камер с помощью сборных желобов 1, а из осадкоуплотнителя – по трубам для сбора осветленной воды 2. Осадок из взвешенного слоя камер осветления через переточные окна 6 поступает в осадкоуплотнитель, расположенный в середине между двумя отделениями осветлителя. Уплотненный осадок из осадкоуплотнителя выпускается по дырчатым трубам 5.



1 – сборные желоба осветленной воды; 2 – отбор осветленной воды из осадкоуплотнителя; 3 – козырек переточных окон; 4 – трубы для подачи исходной воды; 5 – вывод уплотненного осадка; 6 – осадкоотводящие окна; 7 – задвижка; 8 – сборный лоток осветленной воды; 9 – отвод осветленной воды

Рисунок 2.33 – Осветлитель коридорного типа

В осветлителе конструкции ВНИИ ВОДГЕО (рисунок 2.34) вертикальный осадкоуплотнитель 1 расположен под днищем рабочих камер осветлителя. Вода по трубам 7 через воздухоотделитель 6 поступает в нижнюю часть рабочих камер. Слой взвешенного осадка по переточным трубам 4 перетекает в поддонный осадкоуплотнитель 1.



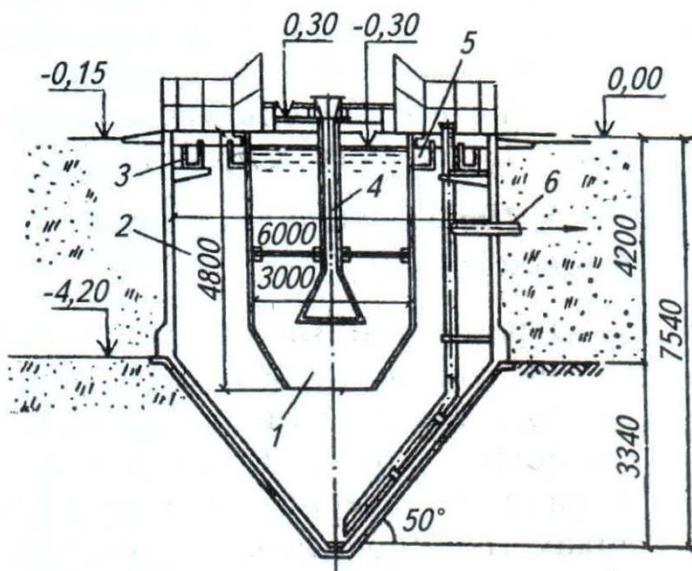
1 – осадкоуплотнитель; 2, 3 – трубы для отвода осадка; 4 – переточные трубы для осадка; 5 – принудительный отсос воды; 6 – воздухоотделитель; 7 – трубы для подачи исходной воды в рабочую камеру

Рисунок 2.34 – Осветлитель с поддонным осадкоуплотнителем

В отечественной практике применяется *осветлитель с естественной аэрацией* (или *отстойник-осветлитель*), представляющий собой вертикальный отстойник с внутренней камерой флокуляции (рисунок 2.35).

Поток воды, поступающей через центральную трубу 4 в камеру флокуляции 1, эжектирует воздух вследствие разницы уровней воды в подающем лотке и осветлителе.

В камере флокуляции происходит частичное окисление органических веществ, хлопьеобразование и сорбция загрязнений. В отстойной зоне 2 вода проходит через слой взвешенного осадка, где задерживаются мелкодисперсные примеси. Осветленная вода отводится через круговой периферийный лоток 3, плавающие вещества задерживаются внутренней стенкой этого лотка и сбрасываются через специальный кольцевой лоток 5, осадок удаляется под гидростатическим напором. Объем камеры флокуляции диаметром не более 9 м должен обеспечить 20-минутное пребывание в ней воды.



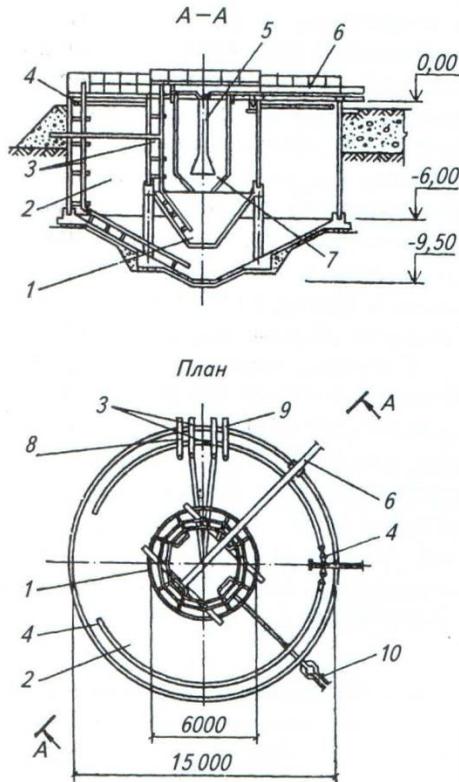
1 – камера флокуляции; 2 – отстойная зона; 3 – периферийный лоток для сбора осветленной воды; 4 – центральная труба; 5 – лоток для отвода плавающих веществ; 6 – трубопровод для выпуска осадка

Рисунок 2.35 – Отстойник-осветлитель

Второй группой отстойников с аэрацией являются *осветлители-перегниватели*, предназначенные для осветления бытовых и производственных сточных вод и сбраживания осадка (рисунок 2.36). Они являются комбинированными сооружениями, состоящими из осветлителя с естественной аэрацией 1, расположенного внутри перегнивателя 2.

Исходная вода по трубе 5 подается в камеру флокуляции 7, откуда иловая смесь поступает в осветлитель 1. Выпавший на дно осадок насосом подается в верхнюю часть перегнивателя 2 для сбраживания, суточная доза осадка определяется экспериментально.

Для интенсификации процесса сбраживания и предотвращения коркообразования осадок перемешивают путем подачи его насосом в кольцевой трубопровод с соплами 4, расположенными над поверхностью осадка по периметру перегнивателя. Типовые осветлители-перегниватели имеют диаметр 9; 12 и 15 м, глубину камеры флокуляции 4-5 м.



1 – осветлитель; 2 – перегниватель; 3 – иловые трубы; 4 – труба для загрузки и перемешивания осадка; 5 – центральная труба; 6 – поводящий лоток; 7 – камера флокуляции; 8 – труба для выпуска иловой воды; 9 – переливная труба; 10 – отводящий лоток

Рисунок 2.36 – Осветлитель-перегниватель

Разделение зон осветления и сбраживания исключает попадание осадка в очищенную воду, а перемешивание осадка в иловой камере интенсифицирует процесс минерализации.

### 2.3.6 Удаление всплывающих примесей

Процесс отстаивания используют для очистки производственных сточных вод от нефти, масел, жиров, смол и других примесей (при концентрации более 100 мг/л), способных к гравитационному отделению (всплыванию) в *нефтеловушках* (продуктоловушках). Очистка от всплывающих примесей аналогична осаждению твердых веществ, раз-

личие заключается в том, что плотность таких частиц меньше, чем плотность воды и вместо осаждения они всплывают.

Скорость подъема частиц легкой жидкости зависит от размера частиц  $d$ , плотности  $\rho$  и вязкости  $\mu$ , т. е. от числа  $Re = W_{вс} \rho d / \mu_0$ . В области  $Re < 0,25$  всплывание происходит по закону Стокса. Движение частиц легкой фазы вверх вызывает в сточной воде вторичные потоки, тормозящие подъем и уменьшающие скорость всплывания. На процесс разделения оказывает влияние турбулентность, коагуляция, комплексобразование.

Отношение числа отстоявшихся частиц легкой жидкости ( $W_{вс} L$ ) определенного размера к общему числу частиц легкой жидкости ( $\nu h$ ) называется *эффектом отстаивания*. При равномерном распределении в воде легкой жидкости, что соответствует идеальным условиям, эффект отстаивания (всплывания):

$$\Theta = \frac{W_{вс} L}{\nu h},$$

где  $\nu$  – скорость сточной воды в нефтеловушке, которая составляет 3-10 мм/с;

$W_{вс}$  – скорость всплывания частиц, равная 0,4-0,6 мм/с;

$h$  – высота слоя легкой жидкости от дна отстойника;

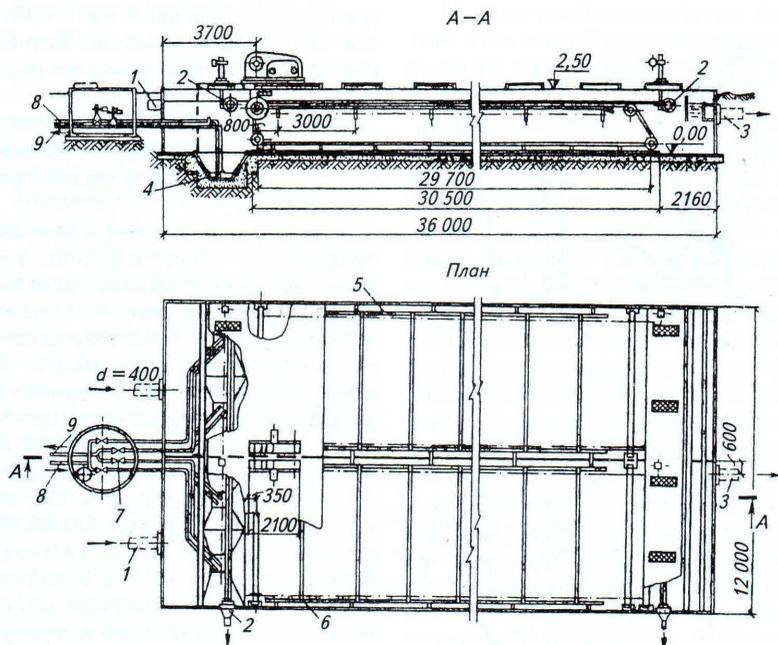
$L$  – длина отстойника.

Для удаления всплывающих примесей используют нефтеловушки, смоло- и маслоуловители. Нефтеловушки проектируют трех типов: горизонтальные, многоярусные (тонкослойные) и радиальные.

*Горизонтальная нефтеловушка* (рисунок 2.37) аналогична горизонтальному отстойнику, разделенному продольными вертикальными стенками на параллельные секции, в каждую из которых поступает сточная вода. Освобожденная от нефти вода в конце секции проходит под затопленной нефтеудерживающей стенкой через водослив, переливается в отводящий лоток и далее в трубопровод. Всплывшая нефть скребковым механизмом передвигается к щелевым поворотным трубам и отводится из нефтеловушки. Глубина слоя воды  $H_p$  в горизонтальной нефтеловушке от 1,2 до 2 м, отношение длины к глубине  $L:H_p=15-20$ . Слой всплывших нефтепродуктов 0,1 м. Общие потери напора в нефтеловушке 0,4-0,5 м. Продолжительность отстаивания не менее 2 ч. Число секций не менее двух, ширина секции от 2 до 6 м. Длину отстойной части вычисляют по формуле:

$$L = \frac{\alpha \cdot H_p \cdot \nu}{W_{вс}},$$

где  $\alpha = 1,65-1,5$  – коэффициент, учитывающий турбулентность потока воды.



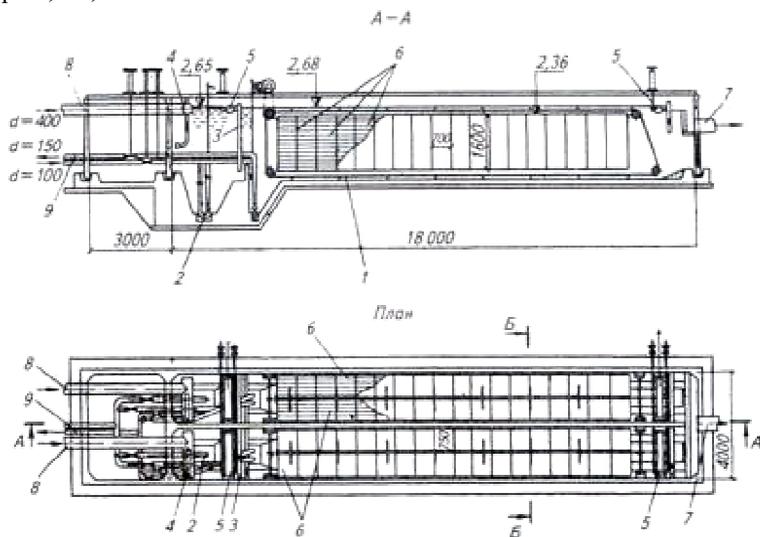
- 1 – трубопровод для подачи сточных вод на очистку; 2 – нефтесборная труба; 3 – трубопровод для отвода осветленных сточных вод;  
 4 – гидроэлеватор; 5 – скребковый транспортер левый; 6 – то же, правый;  
 7 – задвижки с электроприводом во взрывобезопасном исполнении;  
 8 – трубопровод для подачи воды к гидроэлеватору;  
 9 – трубопровод для отвода осадка

Рисунок 2.37 – Горизонтальная нефтеловушка

Для более равномерного распределения потока воды по живому сечению в нефтеловушке устанавливают в начале и в нескольких сечениях по длине сооружения дырчатые перегородки с отверстиями 20–30 мм. Такие перегородки выполняют из легких пленочных материалов типа полиэтилена и размещают между верхними и нижними скребками.

Многоярусные (тонкослойные) нефтеловушки (рисунок 2.38) являются усовершенствованным видом горизонтальных, имеют меньшие габариты, более экономичны. Полочный блок 6 устанавливается в основной части нефтеловушки. При движении потока в ярусах блока частицы нефти поднимаются к верхним образующим яруса, движутся по ним вверх к периферии и в пространстве между блоками и стенкой нефтеловушки всплывают на поверхность воды. Нефтепродукты,

всплывшие над полочными блоками, сгоняются скребками 1 в направлении потока к концу отстойной зоны и через щелевую поворотную трубу 5 периодически выводятся из сооружения. Для этих нефтеловушек глубину слоя отстаиваемой воды  $H_p$  принимают 2,5-3 м. Скорость всплывания частиц нефти (гидравлическая крупность) 0,15 мм/с. Расстояние между полками 50 мм, угол наклона между ними 45°, ширина полочного блока 0,65-0,75 м, его высота 1,5-1,6 м. Общая длина нефтеловушки на 5-6 м больше длины полочного пространства. Потери напора 0,5-0,6 м.

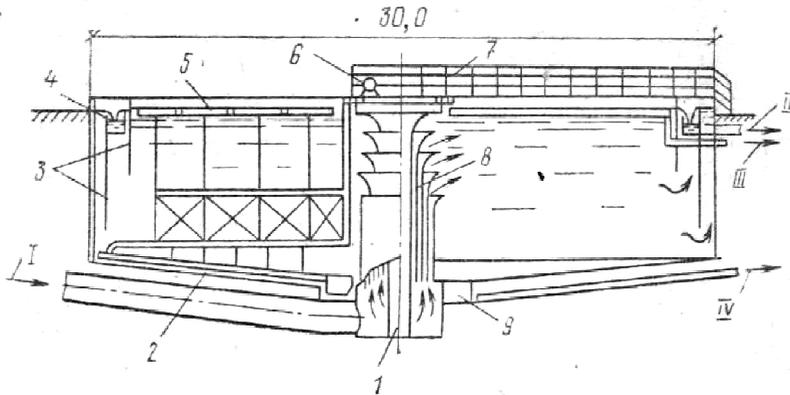


1 – скребковый транспортер; 2 – гидроэлеватор; 3 – пропорциональное водораспределительное устройство; 4 – водораспределительная труба; 5 – нефтеловушная труба с ручным приводом; 6 – блок полочный; 7 – трубопровод для отвода воды; 8 – трубопровод для подвода сточной воды; 9 – трубопровод для отвода осадка

Рисунок 2.38 – Многоярусная нефтеловушка

Они применяются для очистки больших расходов производственных сточных вод. Занимают меньшие площади, удаление осадка и нефтепродуктов в них полностью автоматизировано.

Радиальные нефтеловушки аналогичны радиальным отстойникам (рисунок 2.39).



- I – подающий трубопровод нефтесодержащей воды; II – отводящий трубопровод осветленной воды; III – трубопровод уловленных нефтепродуктов; IV – трубопровод осадка; 1 – центральная опора; 2 – донные скребки; 3 – погружные стенки; 4 – водосборный лоток; 5 – нефтесборные скребки; 6 – центральный привод скребкового механизма; 7 – ходовой мостик; 8 – коаксиально-козырьковый водораспределитель; 9 – прямок для осадка*

Рисунок 2.39 – Нефтеловушка радиального типа

Сточная вода поступает в центральную часть по трубопроводу I, расположенному под днищем нефтеловушки и переходящему в вертикальный раструб 8 с направляющим цилиндром высотой 1,2 м. Цилиндр обеспечивает равномерное распределение воды по рабочей зоне нефтеловушки. Для сбора осветленной воды предусмотрен кольцевой лоток 4 с пропорциональным водосливом, из которого вода отводится по трубопроводу II.

Равномерность распределения воды и малые ее скорости способствуют всплыванию мелкодисперсных частиц нефтепродуктов размером до 50 мкм. Всплывшие нефтепродукты вращающимся скребком 5 сгоняются к стационарно установленной нефтесборной трубе III, по которой отводится за пределы сооружения. Осадок сгребается в прямок 9 и отводится по трубопроводу IV.

Рабочая глубина радиальной нефтеловушки 3-3,5 м, продолжительность отстаивания 6 ч, потери напора 0,6 м. Толщина слоя всплывшей нефти, как и в других типах нефтеловушек, 0,1 м.

Эффективность очистки для горизонтальных нефтеловушек составляет (60-70) %, многоярусных и радиальных – до 75 %.

## Контрольные вопросы

1. Закономерности осаждения примесей в воде
2. Примеси, выделяемые в песколовках, их классификация
3. Характеристика горизонтальных песколовков, конструкции, их расчет
4. Вертикальные песколовки, их расчет
5. Аэрируемые песколовки, их конструкции
6. Классификация отстойников, основные конструкции
7. Исходные данные для расчета отстойников
8. Горизонтальные отстойники, их расчет
9. Вертикальные отстойники, их конструкции и расчет
10. Радиальные отстойники, конструктивные модификации, определение размеров
11. Тонкослойные отстойники, принцип действия, конструкции
12. Удаление осадка из песколовков и отстойников, конструкции механизмов для удаления осадков
13. Осветлители со взвешенным осадком, их конструкции
14. Отстойник-осветлитель
15. Отстойник-перегниватель
16. Механизм удаления всплывающих примесей
17. Горизонтальные и тонкослойные нефтеловушки
18. Нефтеловушки радиального типа

## 2.4 Фильтрация

### 2.4.1 Механизм процесса фильтрации

Сущность *метода фильтрации* заключается в пропуске жидкости, содержащей мелкодиспергированные примеси, через фильтрующий материал, проницаемый для жидкости и не проницаемый для твердых частиц. Кроме тонкодиспергированных веществ на фильтрационных установках извлекают масла, нефтепродукты, смолы и др. Процесс идет под действием гидростатического давления столба жидкости над фильтрующей перегородкой, повышенного давления до перегородки или вакуума после нее, т. е. *движущей силой фильтрации* является разность давлений до и после фильтрующей перегородки. При этом процесс сопровождается значительными затратами энергии. Фильтрация применяется для глубокой механической очистки воды от твердых и жидких нерастворимых в воде частиц, в большинстве случаев является последним этапом осветления воды и производится после ее предварительного отстаивания в отстойниках, осветлителях или других сооружениях.

*Механизм* извлечения частиц из воды может включать следующие составляющие:

- механическое процеживание,
- гравитационное осаждение,
- инерционное захватывание,
- химическую и физическую адсорбцию,
- адгезию,
- коагуляционное осаждение,
- биологическое выращивание.

В общем случае указанные составляющие могут действовать совместно, а процесс фильтрования состоит *из трех стадий*:

- 1) перенос частиц к поверхности фильтрующего слоя;
- 2) прикрепление к поверхности;
- 3) отрыв от поверхности.

По характеру механизма задержания взвешенных частиц различают *два вида фильтрования*:

- 1) фильтрование через пленку (осадок) загрязнений, образующуюся на поверхности фильтрующего слоя;
- 2) фильтрование без образования пленки загрязнений.

В первом случае задерживаются частицы, размер которых больше пор материала, при этом образуется слой загрязнений, который также является фильтрующим материалом (*пленочное фильтрование*). Такой процесс характерен для так называемых *медленных фильтров*, которые работают при малых скоростях фильтрования (0,1-0,3 м/ч). Во втором случае фильтрование (*объемное*) происходит в толще слоя загрузки, где частицы загрязнений удерживаются на зернах фильтрующего материала адгезионными силами (молекулярными, электростатическими, химического сродства и адсорбции). Величина этих сил зависит от свойства фильтрующего материала, скорости потока, температуры воды, свойств примесей. Такой процесс характерен для *скорых фильтров*, работающих при скоростях фильтрования 5-12 м/ч.

При пропускании воды через слой фильтрующего материала одновременно протекают два процесса: *прилипание* частиц к поверхности фильтрующего материала и *отрыв* ранее прилипших частиц. Прилипшие частицы постоянно испытывают влияние движущегося потока, который в результате трения срывает их с поверхности фильтрующего материала. Вода осветляется до тех пор, пока силы отрыва частичек не начинают превалировать над силами прилипания. При равенстве числа частиц, поступающих в единицу времени на поверхность фильтрующего слоя и покидающих ее, наступает насыщение и сточная вода перестает осветляться.

По мере загрязнения фильтрующего слоя уменьшается его порозность и увеличивается сопротивление при прохождении через него

сточной воды, т. е. растет потерянный напор, при достижении определенной величины которого фильтр останавливают на *регенерацию* фильтрующего материала (*промывка*). Интервал между двумя промывками называют *фильтроциклом*.

Процесс фильтрования зависит от многих технологических параметров и, в первую очередь, от свойств фильтрующего материала, фильтрационной среды и примесей, гидродинамического режима фильтрования. *Производительность фильтра* определяется скоростью фильтрования  $v$ , т. е. объемом воды  $Q$ , прошедшим в единицу времени  $\tau$  через поверхность фильтра  $F_{\phi}$ :

$$v = \frac{Q}{\tau \cdot F_{\phi}}.$$

Время, в течение которого определенная загрузка способна осветлять воду до заданных показателей, называется *временем защитного действия* фильтрующей загрузки.

Количество загрязнений, задерживающихся в процессе фильтроцикла, представляет *грязеемкость* фильтра.

#### 2.4.2 Классификация фильтров и фильтровальных материалов

Фильтры для очистки воды подразделяются по *различным признакам*:

- по характеру протекания процесса – периодические и непрерывные;
- по виду процесса – для разделения, сгущения (осадка), осветления (воды);
- по давлению при фильтровании – под вакуумом (до 0,085 МПа), под давлением (от 0,3 до 1,5 МПа) или при гидростатическом давлении столба жидкости над фильтрующей загрузкой (до 0,05 МПа);
- по направлению фильтрования – вниз, вверх или вбок;
- по конструктивным признакам – барабанные, дисковые, ленточные, с фильтрующим зернистым слоем;
- по виду фильтрующей среды – зернистые (фильтрующий слой – кварцевый песок, дробленый антрацит, керамзит, шлак, пенополистирол, магномаасса и др.); сетчатые (сетка с ячейками от 40 до 70 мкм); тканевые (хлопчатобумажные, льняные, суконные, стеклянные или капроновые ткани); намывные (древесная мука, диатомит, асбестовая крошка и другие материалы, намываемые в виде тонкого слоя на каркас из пористой керамики, металлической сетки или синтетической ткани). В практике водоочистки наибольшее применение находят зернистые фильтры.

*Фильтры с зернистой загрузкой* можно классифицировать по ряду основных признаков:

1) по скорости фильтрования – медленные (0,1-0,3 м/ч), скорые (5-12 м/ч) и сверхскорые (25-100 м/ч);

2) по давлению, под которым они работают – открытые (безнапорные), закрытые (напорные);

3) по направлению фильтрующего потока – однопоточные (обычные скорые фильтры), двухпоточные (фильтры АКХ, ДДФ), многопоточные;

4) по крупности фильтрующего материала – мелко-, средне- и крупнозернистые;

5) по количеству фильтрующих слоев – одно-, двух- и многослойные.

*Зернистый фильтрующий слой* представляет собой отсортированный материал, чаще всего речной кварцевый песок крупностью от 0,5 до 2,0 мм. Могут быть использованы также горелые породы, керамзит и шунгит, подвергнутые обжигу; вулканические шлаки, гидрантроцит, а также доменный шлак, горелые породы или синтетические материалы (пенополиуретан, полистиролы, полипропилен, лавсан, нитрон).

Зерна фильтрующей загрузки характеризуются эффективной величиной зерен и коэффициентом неоднородности загрузки, которые получают в результате ситового анализа. *Эффективная величина зерен* соответствует калибру сита, через которое проходит 10 % данного песка. *Коэффициентом неоднородности* называют отношение 80 %-го калибра песка к 10 %-му:  $K_n = d_{80}/d_{10}$ . Фильтрующий материал кроме того должен обладать механической прочностью, химической стойкостью.

Фильтрующие загрузки располагаются на *поддерживающих слоях* гравия, щебня или пористого материала с тем, чтобы мелкий фильтрующий материал не вымывался из слоя и не уносился вместе с потоком воды. Размер зерен поддерживающих слоев в зависимости от устройства фильтра и условий фильтрования постепенно увеличивается от 2-5 до 20-40 мм.

#### **2.4.3 Основные конструкции фильтров**

Фильтровальное оборудование широко используется в системах водоподготовки, очистки промышленных и бытовых сточных вод, в водооборотных системах промышленных предприятий. В процессе фильтрования применяется две группы фильтров: с фильтрующими перегородками и с зернистым слоем. Первые используются для улавливания из сточных вод ценных компонентов или обезвреживания

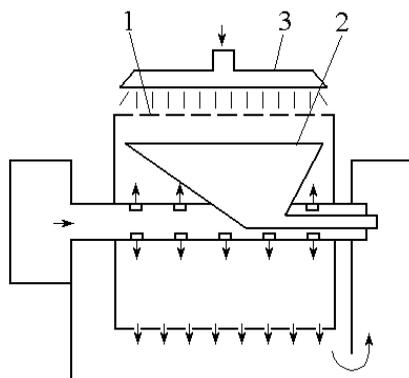
осадков. *Фильтры с зернистым слоем* применяются в основном при очистке больших объемов воды как в системах водоподготовки, так и очистки сточных вод.

Среди фильтров *с фильтрующими перегородками* используются: барабанные, вакуумные со сходящим полотном, дисковые, ленточные, листовые, патронные, фильтр-прессы. К ним также относятся *сетчатые и тканевые микрофильтры*.

**Микрофильтры** конструктивно подобны барабанным сеткам, используемым для процеживания воды. Размеры ячеек микрофильтров примерно в 10 раз меньше, чем у сеток, и составляют 40-70 мкм. Применяют микрофильтры для задержания твердых и волокнистых материалов. Скорость фильтрации в них составляет 25-45 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч), эффективность очистки – (40-60) % и зависит от состава и свойств сточных вод, размера ячеек микрофильтра и режима его работы. Такие микрофильтры можно использовать вместо первичных отстойников.

*Материалом* для изготовления *сеток* микрофильтров служат *различные виды сталей* (низко- и среднеуглеродистые, легированные), медь, латунь и др. По виду покрытия сетки могут быть *цельнопопаянными, оцинкованными, окрашенными, лакированными, гуммированными*. Неметаллические сетки и фильтровальные ткани в технологии очистки воды имеют ограниченное применение, чаще они применяются для обезвоживания осадков сточных вод. Могут использоваться *ткани из натуральных волокон* (хлопок, шерсть, лен) и *синтетических материалов* (капрон, нитрон, хлорин), но они обладают большим гидравлическим сопротивлением и с их поверхности трудно удаляются загрязнения.

Основным элементом микрофильтра (рисунок 2.40) является вращающийся барабан 1, размещенный в бетонном, а иногда металлическом резервуаре прямоугольной формы, вращающийся со скоростью 0,1-0,5 м/с. В микрофильтрах рабочая фильтрующая сетка располагается между двумя поддерживающими с размером ячеек 2×2 мм. Сточная вода может поступать как внутрь барабана, так и через наружную поверхность. Загрязненная сетка очищается промывкой отдельных ее участков через устройство 3 очищенной водой, расход которой не должен превышать 1,5 % от количества воды, подаваемой на станцию очистки. Промывная вода собирается в лоток 2.



1 – вращающийся барабан; 2 – лоток для сбора промывных вод;  
3 – устройство для промывки

Рисунок 2.40 – Схема микрофильтра

**Фильтры с зернистой загрузкой** широко применяют для подготовки технических и оборотных вод, они незаменимы на водоочистных станциях хозяйственно-питьевого назначения для осветления и обесцвечивания поверхностных вод, а также для обезжелезивания подземных вод.

Эти фильтры можно классифицировать по нескольким признакам:

1) *по напору над фильтрующим материалом* – на *открытые* (гравитационные безнапорные), где фильтрование воды происходит под атмосферным давлением, и *напорные* (закрытые) фильтры, в которых над зернистым слоем создается избыточное давление;

2) *по производительности с единицы площади фильтра*, т. е. по *скорости фильтрования* – на *медленные* (0,1-0,3 м/ч), *скорые* (5-12 м/ч), *сверхскоростные* (25-100 м/ч) фильтры; медленные фильтры всегда открытые, скорые могут быть открытые или закрытые, сверхскоростные – только напорные;

3) *по крупности зерен фильтрующего материала* - на *мелкозернистые* (до 0,4 мм), *среднезернистые* (0,4-0,8 мм) и *грубозернистые* (свыше 0,8 мм); мелкозернистую загрузку используют в медленных фильтрах, среднезернистую – в скорых и сверхскорых, грубозернистую – для очистки воды в технических целях;

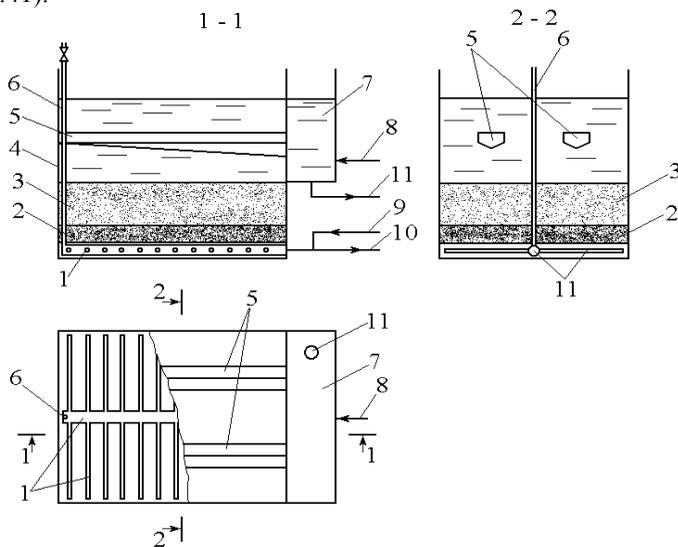
4) *по количеству слоев разных зернистых материалов* – на одно-, двух-, трех- и многослойные фильтры, например, каркасно-засыпные (КЗФ);

5) *по направлению движения фильтрующего потока* – с нисходящим или восходящим фильтрованием, двухпоточные (фильтры

АКХ); с горизонтальным направлением фильтрования (радиальные фильтры).

*Медленные фильтры* применяются для безреагентного осветления воды и представляют собой железобетонные или кирпичные резервуары прямоугольной или круглой в плане формы, загруженные зернистой загрузкой. На ней задерживаются частицы, размер которых больше пор материала, затем на поверхности зерен загрузки образуется пленка (осадок), который также является фильтрующим материалом. Они отличаются высокой степенью очистки. Однако малая скорость фильтрования, значительная стоимость и большая занимаемая площадь привели к тому, что в отечественной практике водоочистки эти фильтры мало распространены.

*Скорые безнапорные (самотечные) фильтры* предназначены для осветления воды после реагентной обработки или без нее. Они представляют собой прямоугольные или круглые в плане железобетонные резервуары 4 площадью 4-140 м<sup>2</sup>, загруженные фильтрующими слоями зернистого материала 3 в один или два слоя с поддерживающими слоями гравия 2, под которыми размещена дренажная система 1 (рисунок 2.41).



1 – трубчатая распределительная система; 2 – поддерживающий слой гравия; 3 – фильтрующая загрузка; 4 – железобетонный корпус фильтра; 5 – желоба; 6 – воздушник; 7 – боковой карман; 8, 10 – подача исходной и отвод фильтрованной воды; 9, 11 – подача и отвод промывной воды

Рисунок 2.41 – Схема открытого скорого фильтра

Дренажное устройство 1 выполняют из пористобетонных сборных плит или щелевых труб. Оно служит для отвода профильтрованной воды и равномерного распределения промывной воды. Высота слоя загрузки 3 этих фильтров зависит от диаметра зерен фильтрующего материала и составляет 0,4-2,0 м. Скорость воды в подводящих трубопроводах и каналах должна составлять 0,8-1,2 м/с, высота слоя воды над загрузкой фильтра не менее 2 м. Вода чаще фильтруется сверху вниз, промывка осуществляется подачей воды снизу вверх. Для сбора промывной воды служат специальные желоба 5, расположенные над слоем фильтрующей загрузки.

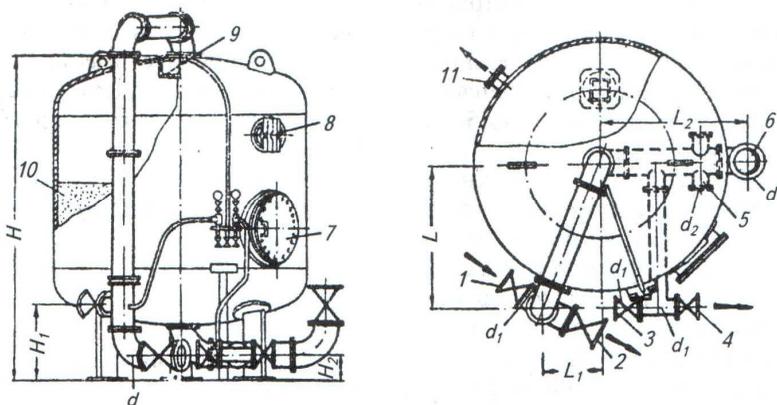
Однослойные фильтры загружают кварцевым песком с диаметром зерен 0,5-2,0 мм, двухслойные – либо однородным материалом с разной крупностью частиц, либо разнородными материалами. Многослойные фильтры имеют большую грязеемкость по сравнению с однослойными в 2-3 раза. Это позволяет либо увеличить скорость фильтрации, либо удлинить фильтроцикл.

*Продолжительность фильтроцикла* при нормальном режиме работы скорых безнапорных фильтров должна составлять не менее 8-12 ч, *скорость фильтрации* при нормальном режиме 5-12 м/ч, при форсированном – 6-16 м/ч.

При достижении *потери напора* 3,0-3,5 м скорые безнапорные фильтры останавливают *на промывку*. Промывку осуществляют либо только водой, подаваемой снизу вверх с интенсивностью 12-18 л/(м<sup>2</sup>с), либо одновременно промывают водой и продувают воздухом. Равномерное распределение воды по площади скорых фильтров осуществляют дренажными системами с поддерживающими слоями или без них.

При водно-воздушной промывке зернистый слой сначала продувают для разрыхления, а затем подают воду, что снижает расход промывной воды, при этом зерна загрузки переходят во взвешенное состояние и освобождаются от прилипших частиц загрязнений.

*Скорые напорные фильтры* представляют собой закрытые вертикальные (рисунок 2.42) или горизонтальные резервуары со сферическими днищами, рассчитанные на рабочее давление до 0,6 МПа. Они используются для осветления воды после обработки ее коагулянтами без предварительного отстаивания. Производительность одного вертикального фильтра составляет 50-90 м<sup>3</sup>/ч.



1 – подача воды на осветление; 2 – спуск промывной воды; 3 – выход осветленной воды; 4 – спуск первого фильтрата; 5 – подвод сжатого воздуха; 6 – подвод промывной воды; 7 – лаз круглый; 8 – лаз эллиптический; 9 – верхнее распределительное устройство; 10 – фильтрующий слой (песок, антрацит); 11 – штуцер для гидравлической выгрузки и загрузки фильтра

Рисунок 2.42 – Вертикальный напорный фильтр

Серийные отечественные *осветлительные фильтры* серии ФОВ (фильтр осветлительный вертикальный) заводского изготовления выпускаются диаметрами 1,0-3,4 м, высота слоя загрузки в них 0,5-1 м. В качестве загрузки могут быть использованы как природные (дробленые антрацит и гравий, керамзиты, мраморная крошка, керамическая крошка), так и синтетические материалы. Гравийные поддерживающие слои в напорных фильтрах, как правило, не устраиваются. Напор воды создается насосами. Предельные *потери напора* в закрытых фильтрах, когда их останавливают *на промывку*, составляют 6-8 м. *Скорость фильтрования* в них такая же, как в открытых скорых фильтрах 5-12 м/ч, в крупнозернистых до 15 м/ч.

Исходная вода подается на осветление по трубопроводу 1 через верхнее распределительное устройство 9. Осветленная вода отводится через штуцер 3 внизу фильтра. Для взрыхления загрузки перед промывкой подается сжатый воздух через трубопровод 5, промывная вода подводится через штуцер 6, движется снизу вверх загрузки и отводится через штуцер 2.

Для увеличения единичной производительности выпускаются двух- и трехкамерные фильтры, имеющие фактически 2-3 фильтра в одном корпусе.

Все скорые напорные фильтры имеют антикоррозионное покрытие, подвергаясь гуммировке, нанесению эпоксидной смолы и других материалов. Сам фильтр изготавливают из оцинкованной либо нержавеющей стали, или пластика.

*Фильтрующую поверхность для скорых зернистых фильтров* рассчитывают исходя из рекомендуемой скорости фильтрации 5-12 м/ч с возрастанием ее при форсированном режиме на 2 м/ч. Исходя из рассчитанных и выбранных размеров корпусов определяется и высота фильтрующего слоя.

Суммарная площадь скорых фильтров  $F_{\phi}$ , м<sup>2</sup> определяется по формуле:

$$F_{\phi} = \frac{Q}{\tau v_{\rho} - 3,6nw\tau_1 - nv_{\rho}\tau_2},$$

где  $Q$  – полезная производительность фильтровальной станции, м<sup>3</sup>/сут;

$\tau$  – продолжительность работы фильтра в течение суток, ч;

$v_{\rho}$  – расчетная скорость фильтрации, м/ч;

$n$  – число промывок фильтра в сутки (как правило 2-3);

$w$  – интенсивность промывки, л/(м<sup>2</sup>·с);

$\tau_1$  – продолжительность промывки, ч;

$\tau_2$  – продолжительность простоя фильтра в связи с промывкой, ч;

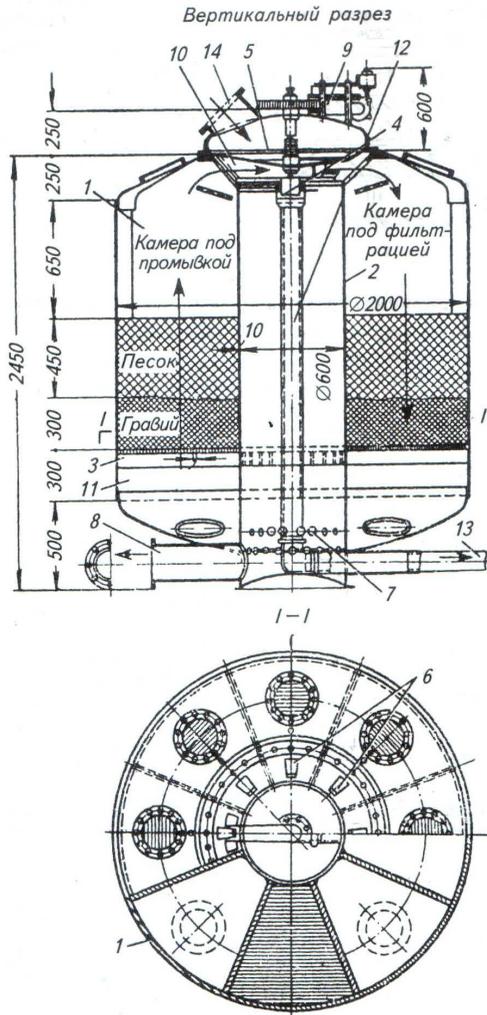
для фильтров, промываемых водой  $\tau_2 = 0,33$  ч; для промываемых водой и воздухом  $\tau_2 = 0,5$  ч.

Количество фильтров  $N_{\phi}$  при производительности станции более 8-10 тыс. м<sup>3</sup>/сут определяется по формуле:

$$N_{\phi} = \sqrt{\frac{F_{\phi}}{2}}.$$

*Сверхскорый напорный фильтр конструкции Г. Н. Никифорова* работает при постоянном напоре с переменной скоростью фильтрования, уменьшающейся по мере загрязнения фильтра. *Начальная скорость фильтрования* составляет 50-100 м/ч. Фильтр представляет собой цилиндрический корпус 1 с цилиндрической камерой 2 внутри (рисунок 2.43).

Подача осветляемой воды происходит через штуцер 4 в распределительной камере 5 в камеру под фильтрацией. Профильтрованная вода через отверстия 7 собирается из дренажного дырчатого дна 3 в цилиндрическую шахту 2, откуда через трубу 8 отводится потребителю. Промывная вода движется в камере под промывкой снизу вверх, через патрубков 10 поступает в трубопровод 12 и отводится из фильтра через спуск 13.

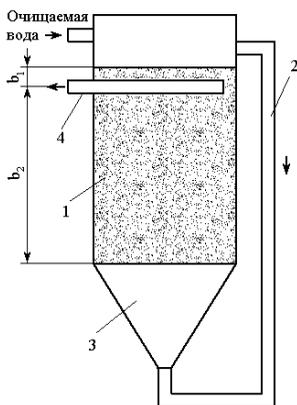


1 – цилиндрический резервуар; 2 – цилиндрическая шахта; 3 – кольцевое дырчатое дно; 4 – подача осветляемой воды; 5 – распределительная камера; 6 – трапециевидные отверстия; 7 – отверстия для поступления воды из дренажного пространства в шахту; 8 – подача воды потребителю; 9 – электродвигатель; 10 – патрубок; 11 – поддренажное пространство; 12 – трубопровод, соединенный с патрубком; 13 – спуск воды в канализацию; 14 – люк

Рисунок 2.43 – Напорный сверхскоростной фильтр камерного типа системы Г. Н. Никифорова

Пространство между цилиндрами разделено вертикальными перегородками на восемь отсеков-фильтров с песчано-гравийной загрузкой. В действии находится семь отсеков, а один на промывке. *Продолжительность фильтроцикла* в каждом отсеке не превышает 1-2 ч. Промывка фильтра автоматизирована, отсеки переключаются на промывку последовательно. Высота слоя загрузки 450 мм, гравийного поддерживающего слоя 500 мм. Максимальный диаметр фильтра 3 м, производительность 150 м<sup>3</sup>/ч. Такие фильтры обычно собираются в батареи.

В основу *двухпоточных скорых фильтров АКХ (Академии коммунального хозяйства)* (рисунок 2.44) положен принцип двухстороннего фильтрования воды с отводом фильтрата трубчатой дренажной системой, расположенной в толще фильтрующего слоя. Пространство над поверхностью песка соединяется трубопроводом с поддонным пространством 3. Дренажная система 4 расположена на расстоянии 50-60 см от поверхности песка. Часть исходной воды направляется в дренажную систему, фильтруясь через слой песка  $b_1$ , а другая часть по трубопроводу в поддонное пространство, а оттуда - в дренажную систему снизу вверх через слой песка  $b_2$ .



1 – песчаная загрузка; 2 - трубопровод; 3 – поддонное пространство;  
4 – дренажная система

Рисунок 2.44 – Схема фильтра АКХ

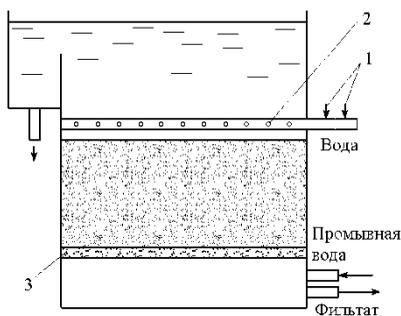
Основная масса воды поступает в нижнюю часть фильтрующего слоя 1 и двигаясь, снизу вверх, проходит сначала через слой крупного, а затем более мелкого песка, чем обеспечивается повышенная грязеемкость и производительность фильтра при сокращении воды на промывку фильтра.

Расчетная скорость фильтрования для фильтров АКХ составляет 10-12 м/ч при нормальном режиме и 12-15 м/ч при форсированном. С течением времени скорость фильтрования через нижний слой загрузки увеличивается, а через верхний слой, в связи с малой грязеемкостью его, уменьшается. К концу фильтроцикла скорость фильтрования через нижний слой составляет 80 % суммарной скорости. Недостаток фильтров АКХ – более сложная конструкция и управление их работой.

Работа *контактных осветлителей и контактных фильтров* основана на использовании явления контактной коагуляции. На поверхности зерен загрузки (ее высота не менее 2 м) при движении воды, обработанной коагулянтом, снизу вверх сорбируются коллоидные и взвешенные частицы.

*Контактные осветлители* являются своеобразной разновидностью скорых безнапорных фильтров, работающих по принципу пропускания воды с добавлением коагулянта в направлении убывания крупности зерен в слое, т. е. снизу вверх. Скорость фильтрования не должна превышать 5-5,5 м/ч при размере зерен загрузки 0,8 мм во избежание взвешивания песка. Если осуществлять отвод фильтрата из верхней части фильтрующего слоя, то скорость можно повысить до 10 м/ч. Объем сооружений очистки воды с применением контактных осветлителей уменьшается в 4-5 раз по сравнению с сооружениями обычного типа, т. к. перед контактными осветлителями не устанавливают отстойников. В них на (15-20) % уменьшается расход коагулянта.

В *контактных фильтрах* (рисунок 2.45), работающих по принципу контактной коагуляции, вода с добавленными к ней реагентами (в отличие от контактных осветлителей) фильтруется через зернистый слой загрузки сверху вниз.

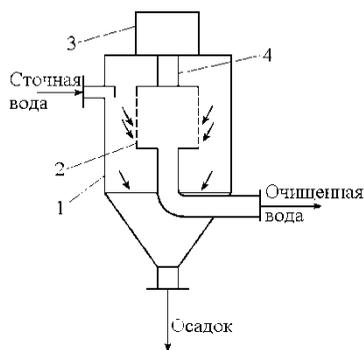


1 – подача реагентов; 2 – распределительная система;  
3 – дренаж из пористого бетона

Рисунок 2.45 – Схема контактного фильтра

**Магнитные фильтры** (сепараторы) применяются для удаления из жидкостей мелких ферромагнитных частиц размером 0,5-5 мкм, при их содержании более 25 %. Помимо магнитных частиц они улавливают абразивные загрязнения, песок и другие примеси, которые подвергаются эффекту электризации. Они могут быть снабжены постоянным магнитом или электромагнитом. При прохождении ламинарным потоком через магнитное поле ферромагнитные частицы намагничиваются и образуют агломераты размером до 50 мм, которые удаляются фильтрованием или осаждением. Направление потока должно совпадать с направлением магнитного поля. Широкое распространение нашли магнитные сепараторы, которые имеют эффективность очистки (80-90) % при производительности до 60 м<sup>3</sup>/ч. Фильтрующий элемент представляет собой ферромагнитную зернистую загрузку крупностью 1-3 мм. Фильтрование очищаемой сточной воды производят при наложении магнитного поля, промывку без его применения.

**Акустические сетчатые фильтры** применяют для предварительного осветления вод, содержащих высокодисперсные глинистые взвеси. Эффект очистки достигает 60 %. В результате упругих колебаний звукового диапазона частот электромагнитным вибратором в акустических фильтрах происходит непрерывная регенерация фильтрующего элемента. Электромагнитный вибратор располагается на крышке акустического фильтра, представляющего собой круглый металлический резервуар 1 (рисунок 2.46). Фильтрующий элемент выполняется в виде перфорированного стакана из нержавеющей стали с расположенными в шахматном порядке отверстиями диаметром 4-5 мм, обтянутого микросеткой с размерами ячеек 100-125 мкм.



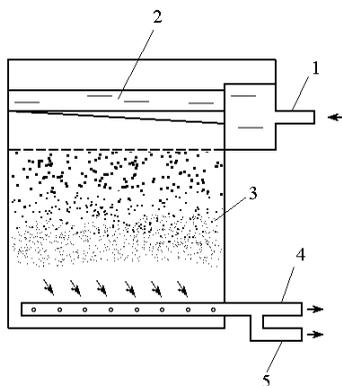
1 – металлический корпус; 2 – фильтрующий элемент; 3 – электромагнитный вибратор; 4 – шток

Рисунок 2.46 – Схема акустического фильтра

**Намывные фильтры** представляют собой открытые, напорные или вакуумные резервуары, внутри которых находятся плоские или цилиндрические фильтрующие элементы с размером ячеек 100-150 мкм (пористые керамические, сетчатые, каркасно-навитые), на которые предварительно намывают специальные фильтрующие порошки. В качестве последних применяют диатомит, целлюлозу, бентонит, опилки и другие материалы с размером частичек 50-70 мкм. Широко используют диатомит и перлит, получаемые дроблением породы вулканического происхождения с последующим обжигом, поэтому такие фильтры часто называют диатомитовыми. Образующийся слой осадка, наряду с фильтровальной перегородкой, играет роль основной фильтрующей среды.

Намывные фильтры применяют для очистки небольших объемов воды, если ее мутность не превышает 40 мг/л. При достижении потери напора 15-20 м фильтр промывают обратным током воды.

Для удаления нефтепродуктов и других эмульгированных веществ применяются **фильтры с плавающей загрузкой (ФЗП)** из различных полимерных материалов (рисунок 2.47). Хорошие результаты получены при использовании пенополистирола различных марок, пенополиуретана, гранул керамзита, котельных и металлургических шлаков. Такие материалы обладают высокой пористостью, механической и химической прочностью и большой поглощательной способностью. Высота слоя загрузки 1,2-2,0 м, скорость фильтрования от 0,6-2 м/ч до 20-25 м/ч.



1 – подача исходной воды; 2 – надзагрузочный объем воды для промывки фильтра; 3 – загрузка; 4 – отвод фильтрованной воды; 5 – отвод промывной воды

Рисунок 2.47 – Схема фильтра с плавающей загрузкой

Плавающую загрузку можно использовать в стандартных стальных корпусах с размещением дренажного устройства сверху. При подаче воды снизу вверх с целью предотвращения уноса гранул загрузки в верхней части устанавливают перфорированную решетку (сетку) с отверстиями меньшими, чем размер гранул.

Разработаны различные конструкции напорных, самотечных и контактных ФЗП; они могут встраиваться в первичные и вторичные отстойники, быть однослойными и двухслойными. Регенерация фильтрующего материала может производиться интенсивной водовоздушной промывкой или механическим отжимом.

Такие фильтры используются для очистки сточных вод от нефтепродуктов, масел, смазочно-охлаждающих жидкостей и других примесей, находящихся в виде нестойких эмульсий.

### **Контрольные вопросы**

1. Сущность метода фильтрования, движущая сила
2. Механизм извлечения примесей из воды фильтрованием
3. Стадии процесса фильтрования
4. Пленочное и объемное фильтрование
5. Фильтроцикл и производительность фильтра
6. Классификация фильтров по различным признакам
7. Фильтрующие материалы, их характеристика
8. Микрофильтры
9. Классификация фильтров с зернистой загрузкой
10. Скорые безнапорные фильтры, их характеристика, параметры работы
11. Скорые напорные фильтры, параметры работы
12. Определение площади фильтрования и количества фильтров
13. Сверхскоростной напорный фильтр конструкции Г.Н. Никифорова, принцип действия, конструкция
14. Двухпоточные скорые фильтры АКХ
15. Контактные осветлители и контактные фильтры
16. Магнитные и акустические фильтры
17. Намывные фильтры, фильтры с плавающей загрузкой

## **2.5 Центрифугирование**

### **2.5.1 Гидроциклоны**

Интенсификацию процессов осаждения взвешенных частиц из сточных вод осуществляют воздействием на них центробежных и центростремительных сил в гидроциклонах и центрифугах.

Используют *низконапорные (открытые) и напорные (закрытые) гидроциклоны*. Напорные гидроциклоны применяют для выделения из сточных вод грубодисперсных примесей минерального происхождения, в них производят сгущение сточных вод и осадков, а открытые - для удаления осаждающихся и всплывающих примесей с гидравлической крупностью более 0,2 мм/с. Гидроциклоны просты по устройству, компактны, легко обслуживаются, имеют высокую производительность, невысокую стоимость.

*Вращательное движение жидкости* в гидроциклоне, приводящее к сепарации частиц, обеспечивается тангенциальным подводом воды к цилиндрическому корпусу. Возникающие центробежные силы перемещают частицы примесей к стенкам аппаратов по спиральной траектории вниз к патрубку для отвода шлама, очищенная вода движется вверх около оси гидроциклона и отводится из центра через верхний патрубок или кольцевой лоток. Вращение потока способствует агломерации частиц и увеличению их гидравлической крупности. При высоких скоростях вращения центробежные силы значительно превышают силы тяжести.

Скорость движения частицы в жидкости зависит от ее диаметра, разности плотностей фаз, вязкости и плотности сточной воды, ускорения центробежного поля. При больших значениях скоростей и малых радиусах гидроциклонов сила, действующая на частицу взвеси во вращающейся жидкости, будет значительно превосходить скорость их свободного осаждения. Соотношение центробежных сил  $F$  и сил тяжести  $P$  определяется *фактором разделения  $K$* :

$$K = \frac{F}{P} = \frac{mv^2}{R \cdot mg} = \frac{v^2}{gR},$$

где  $K$  – фактор разделения, показывающий, во сколько раз центробежные силы больше сил тяжести;

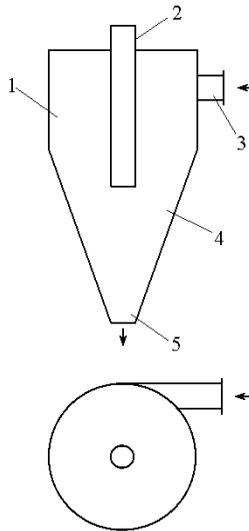
$v$  – тангенциальная скорость движения частицы, м/с;

$R$  – радиус вращения частицы, м.

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Кроме физических свойств жидкости, на эффективность работы гидроциклонов влияют конструктивные размеры (диаметр аппарата и устройство впускных и выпускных патрубков). Чем меньше диаметр гидроциклона, тем выше (при одинаковом напоре) его эффективность.

*Напорные гидроциклоны* представляют собой цилиндрические аппараты с нижней конической частью (рисунок 2.48). Сточная вода под давлением 0,15-0,4 МПа поступает по тангенциально расположенному вводу 3 в верхнюю часть цилиндра 1 и приобретает вращательное движение. Возникающие центробежные силы перемещают частицы примесей к стенкам аппарата по спиральной траектории вниз, к выходному патрубку 5 для отвода шлама.



*1 – цилиндрическая часть; 2 – отвод воды; 3 – впуск воды; 4 – коническая часть; 5 – отвод шлама*

Рисунок 2.48 – Схема напорного гидроциклона

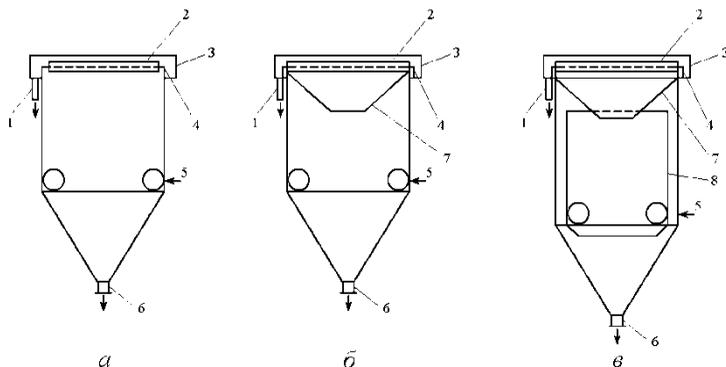
Очищенная вода удаляется через верхний патрубок 2. Фактор разделения напорных гидроциклонов достигает 2000, что обуславливает их высокую эффективность. Диаметр напорных гидроциклонов от 75 до 1000 мм (типовых 50-500 мм), высота цилиндрической части равна примерно диаметру аппарата. Эффективность очистки до 70 %. Скорость потока на входе составляет от 2-3 м/с до 20 м/с.

Производительность гидроциклонов от 3 до 90 м<sup>3</sup>/ч. К недостаткам можно отнести высокую энергоемкость, быстрый износ стенок. Последнее устраняется футеровкой внутренней поверхности аппарата резиной или каменным литьем.

Напорные гидроциклоны могут быть единичными и батарейными (мультигидроциклоны).

*Открытые гидроциклоны* имеют большую производительность и малое гидравлическое сопротивление, чем закрытые, но меньший эффект осветления. Часто их используют в качестве первой ступени в комплексе с другими аппаратами для механической очистки сточных вод, в них выделяют грубодисперсные примеси с гидравлической крупностью 5 мм/с. Число впускных патрубков в гидроциклоне для более равномерного распределения потока должно быть не менее двух. Скорость впуска воды 0,1-0,5 м/с.

Разработаны различные конструкции открытых гидроциклонов (рисунок 2.49): без внутренних устройств, с диафрагмой, с диафрагмой и цилиндрической перегородкой, многоярусные.



*а – без внутренних устройств; б – с конической диафрагмой;  
в – с цилиндрической перегородкой*

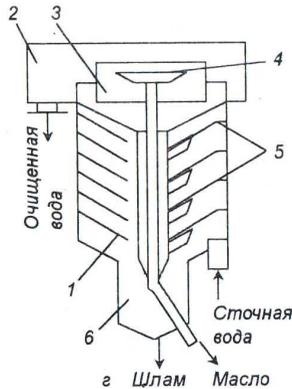
*1 – отвод воды; 2 – полупогруженная кольцевая доска; 3 – лоток; 4 – кольцевой водослив; 5 – подача воды; 6 – отвод шлама; 7 – коническая диафрагма;  
8 – цилиндрическая перегородка*

Рисунок 2.49 – Схемы открытых гидроциклонов

Наличие конической диафрагмы 7 и внутреннего цилиндра 8 позволяет разделить воду на два потока. Один из них (осветленная вода) движется к центральному отверстию диафрагмы и, пройдя ее, попадает в лоток 3, а затем отводится через кольцевой водослив 4. Другой поток со взвешенными частицами поступает в коническую часть, откуда удаляется под действием гидростатического напора через штуцер 6.

В открытых гидроциклонах задерживают всплывающие примеси и нефтепродукты кольцевым полупогруженным щитом 2. Диаметры открытых гидроциклонов составляют от 2 до 10 м.

*Многоярусные гидроциклоны* (рисунок 2.50) используются для интенсификации процесса очистки. В них рабочий объем разделен на отдельные ярусы свободно вставляемыми коническими диафрагмами 1, каждый из ярусов работает самостоятельно, малое расстояние между ними приводит к тому, что отделение частиц идет по принципу тонкослойного отстаивания. Вращательное движение позволяет полнее использовать объем яруса и способствует агломерации взвешенных частиц.



1 – конические диафрагмы; 2 – лоток; 3 – водослив; 4 – маслосборная воронка;  
5 – распределительные лотки; 6 – шламоотводящая щель

Рисунок 2.50 – Схема многоярусного гидроциклона

Очищаемая вода подается из аванкамер тангенциально через щели в пространство между ярусами, где движется по спирали к центру. При этом происходит осаждение из нее твердых частиц на нижние диафрагмы ярусов. Осадок сползает по наклонным диафрагмам и через щели 6 попадает в коническую часть. Осветленная вода поступает в кольцевой лоток 2. Частицы масел и нефти собираются маслосборной воронкой 4 с поверхности осветленной воды и отводятся из аппарата.

Диаметр многоярусных гидроциклонов от 2 до 6 м, высота яруса 100-250 мм, число ярусов 4-20. Скорость воды на входе в аппарат  $v=0,3-0,5$  м/с. При той же эффективности очистки, что у других типов гидроциклонов, удельные гидравлические нагрузки возрастают в 8-10 раз.

### 2.5.2 Центрифуги

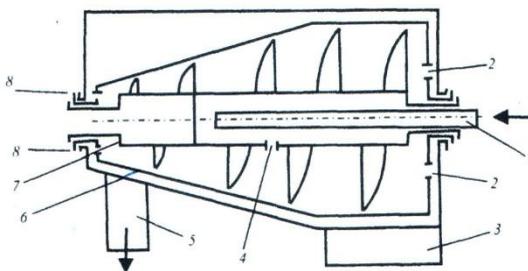
Центрифугирование для очистки сточных вод используется реже, чем отстаивание и фильтрование из-за повышенной энергоемкости. *Центрифуги* бывают *отстойные* и *фильтрующие*, *периодического* и *непрерывного действия*. В процессах очистки сточных вод фильтрующие центрифуги используют для разделения грубодисперсных систем (суспензий), отстойные – труднофильтрующихся тонко- и грубодисперсных суспензий, а также для их классификации по размерам и плотности частиц.

Экономически целесообразно использовать центрифуги для локальной очистки сточных вод в том случае, когда уловленный осадок

имеет ценность и может быть рекуперирован, а для его выделения нельзя использовать реагенты.

Центрифуги *периодического действия* желательно использовать при концентрации нерастворимых примесей в сточных водах не более 2-3 г/л, если образующиеся осадки цементируются или характеризуются высокими абразивными свойствами, при расходах суспензии менее 5 м<sup>3</sup>/ч.

Из центрифуг *непрерывного действия* в системах очистки вод наибольшее распространение получили отстойные горизонтальные шнековые центрифуги типа ОГШ (рисунок 2.51). Для выделения частиц с гидравлической крупностью  $U_0=0,2$  мм/с используют противоточные центрифуги,  $U_0=0,05$  мм/с – прямоточные.



1 – труба подачи осадка; 2 – отверстие для слива фугата; 3 – сливная труба;  
4 – отверстие для поступления осадка в полость ротора; 5 – труба сброса обезвоженного осадка; 6 – ротор центрифуги; 7 – шнек; 8 – выгрузочные окна

Рисунок 2.51 – Схема устройства центрифуги ОГШ

При работе центрифуги сточная вода (суспензия) подается по питающей трубе 1 во внутреннюю поверхность шнека 7, откуда, через отверстия для поступления суспензии в полость ротора 4, затем поступает во вращающийся ротор 6. Ротор и шнек вращаются в одном направлении, но с разной скоростью. Под действием центробежной силы суспензия разделяется, и на стенках ротора осаждаются частицы твердой фазы, которые скребками сдвигаются к окнам 8, а затем отводятся из центрифуги через патрубок 5. Осветленная жидкость (фугат) течет к сливным окнам 2 и выводится из аппарата через патрубок 3. Вращающийся ротор закрывается кожухом.

### Контрольные вопросы

1. Принцип очистки воды центрифугированием
2. Фактор разделения; параметры, влияющие на работу гидроциклонов

3. Напорные гидроциклоны
4. Открытые гидроциклоны
5. Многоярусные гидроциклоны
6. Центрифуги: классификация, применение

## **2.6 Схема механической очистки производственных сточных вод**

В ряде случаев механическая очистка является единственным и достаточным способом извлечения из производственных сточных вод механических загрязнений и для подготовки их к повторному использованию в системах оборотного водоснабжения.

Для очистки сточных вод предусматривается комплекс отдельных сооружений, в которых по ходу движения сточной воды она постепенно очищается сначала от крупных, а затем все более мелких загрязнений, находящихся в нерастворенном состоянии. Стоимость сооружений механической очистки составляет (20-30) % капитальных вложений и (15-20) % годовых эксплуатационных расходов от всех расходов на комплекс сооружений систем водоснабжения и канализации.

В схему механической очистки производственных сточных вод входят следующие очистные сооружения: решетки для задержания крупных загрязнений органического и минерального происхождения, песколовки для выделения тяжелых минеральных примесей, отстойники или отстойники-осветлители для улавливания нерастворимых примесей, в основном органического происхождения, фильтры для более полного осветления воды, устройства для обеззараживания воды.

Самостоятельную группу составляют сооружения по обработке осадка: – метантенки или двухъярусные отстойники с иловыми площадками. Иногда существует механическое обезвоживание осадка в фильтрах или его сушка.

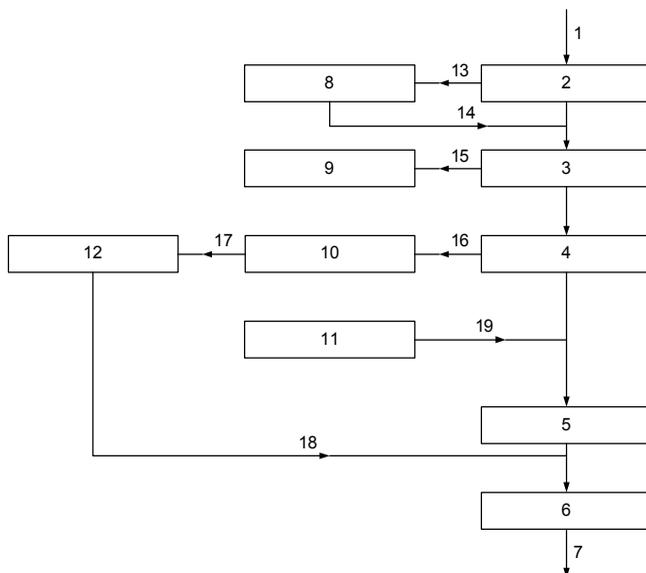
Выбор метода очистки и подбор состава сооружений является сложной технико-экономической задачей и зависит от многих факторов: расхода и состава сточных вод, необходимой степени очистки, местных условий (рельефа местности, характера грунтов, размера площадки), энергетических факторов, последующих вариантов использования очищенной воды и др.

Следует использовать современные очистные сооружения, осуществлять правильную их компоновку, что приводит к сокращению технологических коммуникаций и размеров строительных конструкций, уменьшает эксплуатационные расходы.

Дальнейшее развитие очистки производственных сточных вод, содержащих механические примеси, заключается в модернизации су-

ществующих сооружений за счет использования подвижных решеток, тонкослойных блоков в сооружениях по отстаиванию, совмещению ряда процессов (преаэрация, биокоагуляция, осветление) путем встраивания в первичные отстойники, например, фильтрующих элементов, преаэраторов; применения гидроциклонов, центрифуг и др.

Схема механической очистки сточных вод приведена на рисунке 2.52.



*1 – сточная вода; 2 – решетки; 3 – песколовки; 4 – отстойники; 5 – смесители; 6 – контактный резервуар; 7 – выпуск; 8 – дробилки; 9 – песковые площадки; 10 – метантенки; 11 – хлораторная; 12 – иловые площадки; 13 – отбросы; 14 – пульпа; 15 – песчаная пульпа; 16 – сырой осадок; 17 – сброженный осадок; 18 – дренажная вода; 19 – хлорная вода*

Рисунок 2.52 – Технологическая схема очистной станции с механической очисткой сточных вод

Первоначально сточная вода проходит через решетки 2, откуда задержанные отбросы 13 направляются для измельчения на дробилку 8 и вновь возвращаются в поток воды. Можно использовать вариант решеток-дробилок, тогда примеси не извлекаются из воды, а сразу направляются на последующие очистные сооружения.

В песколовках 3 задерживаются тяжелые минеральные примеси, песчаная пульпа 15 из них идет на песковые площадки 9.

В отстойниках 4 выделяются осаждающиеся и всплывающие органические вещества. Осадок 16 из них направляется в метантенк 10

для сбраживания органических веществ и затем поступает на иловые площадки 12 для обезвоживания. Для интенсификации осаждения взвешенных веществ в отстойниках могут использоваться преаэраторы, в которые подается часть избыточного активного ила для биофлокуляции, добавляются коагулянты и флокулянты, в последнем случае процесс происходит в отстойниках-осветлителях, двухъярусных отстойниках.

Для более тонкой очистки после отстойников можно использовать песчаные или каркасно-засыпные фильтры.

Все сооружения механической очистки промываются водой, иногда осуществляется водовоздушная промывка. Промывные воды возвращаются в технологическую схему на очистку.

Очищенная вода обеззараживается хлорированием, озонированием, УФ-облучением.

### **Контрольные вопросы**

1. Принцип создания схемы механической очистки загрязненных вод
2. Составляющие технологической схемы
3. Сооружения и оборудование для очистки воды механическими методами

## ГЛАВА 3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Методы очистки воды, в основе которых лежат процессы, описываемые физико-химическими законами, называются *физико-химическими*.

Сточные воды со структурой загрязнений, обусловленной внутренней энергией, относятся к категории трудноокисляемых или стабильных. Удаление загрязнений из них возможно только при нарушении их стабильности путем использования внешней энергии в той или иной форме. Наличие источника внешней энергии (химической, тепловой, механической и др.) является обязательным условием применения физико-химических процессов очистки сточных вод.

Физико-химические методы используют для удаления из сточных вод тонкодисперсных взвешенных (твердых и жидких) и коллоидных частиц (коагуляция, флокуляция, флотация), растворимых газов (десорбция), минеральных диссоциированных в воде примесей (ионный обмен, обратный осмос, выпаривание, кристаллизация), органических растворенных веществ (адсорбция, ректификация, экстракция, ультрафильтрация, первапорация, эвапорация).

Применение физико-химических методов позволяет достичь глубокой и стабильной степени очистки, рекуперировать различные вещества, удалить из сточных вод токсичные, биохимически неокисляемые органические загрязнения.

Они применяются как самостоятельно, так и в сочетании с механическими, химическими и биологическими методами и играют значительную роль при очистке производственных сточных вод, а также в водоподготовке. Причем наиболее эффективны они при локальной очистке сточных вод промышленных предприятий.

### 3.1 Коагуляция и флокуляция

#### 3.1.1 Физико-химические основы процессов

*Коагуляцию* в очистке воды применяют для ускорения процесса осаждения тонкодисперсных примесей и эмульгированных веществ, представляющих собой агрегативно-устойчивую систему. *Коагуляция* – это процесс укрупнения коллоидных и дисперсных частиц при их взаимодействии, происходящем вследствие взаимного слипания под действием сил молекулярного притяжения и химического средства. В результате коагуляции образуются агрегаты – более крупные (вторичные) частицы, состоящие из скопления мелких (первичных). Первичные частицы в таких агрегатах соединены силами межмолекулярного взаимодействия или через прослойку окружающей (дисперсионной)

среды. Завершается этот процесс отделения агрегатов слипшихся частиц от жидкой фазы, как правило, осаждением.

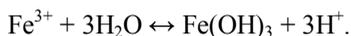
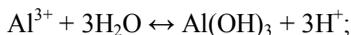
Коагуляция наиболее эффективна для удаления из воды коллоидно-дисперсных частиц размером 3-100 мкм и происходит под влиянием специально добавляемых веществ – коагулянтов. Они обволакивают взвешенные частицы, полностью меняя их поверхностные свойства и нейтрализуя их заряд.

Различают *два типа коагуляции: в свободном объеме* (в камерах хлопьеобразования) и *контактную* (в толще зернистой загрузки или в массе взвешенного осадка).

Диспергированные, коллоидные и взвешенные частички примесей воды в большинстве случаев имеют слабый отрицательный заряд, что обуславливает их агрегатную устойчивость в результате возникновения межмолекулярных сил отталкивания. Снижение агрегативной устойчивости примесей достигается при введении в воду коагулянтов. Коагулянты в воде образуют хлопья гидроксидов металлов, которые имеют слабый положительный заряд, большую удельную поверхность и высокую адсорбционную способность. Хлопья обладают способностью улавливать коллоидные и взвешенные частицы, агрегировать их и быстро осаждаться в воде.

В качестве *коагулянтов* обычно используются соли алюминия или железа: - сульфаты алюминия  $Al_2(SO_4)_3$ , железа  $FeSO_4$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$ , хлорида алюминия  $AlCl_3$ , хлорида железа  $FeCl_3$ , алюмината натрия  $Na_3AlO_3$ , оксихлорида алюминия  $Al_2(OH)_5Cl$  и др. Могут применяться смешанные коагулянты из указанных солей, а также природные соединения, например, глинозем,  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ . При использовании смесей  $Al_2(SO_4)_3$  и  $FeCl_3$  в соотношениях от 1:1 до 1:2 достигается лучший результат коагулирования, чем при раздельном использовании реагентов, за счет ускорения осаждения хлопьев. Для коагуляции могут быть использованы различные глины, алюминийсодержащие и железосодержащие отходы производства (травильные растворы); пасты, смеси, шлаки, содержащие диоксид кремния. Коагуляция в среде с повышенной щелочностью происходит быстрее, поэтому, если вода имеет низкую исходную щелочность, в нее добавляют известь, едкий натр, соду и т. п.

При введении в осветляемую воду коагулянтов происходит их гидролиз:



В действительности процесс гидролиза значительно сложнее, ион металла образует ряд промежуточных соединений, которые имеют положительный заряд и легко сорбируют развитой хлопьевидной поверхностью взвешенные мелкодисперсные и коллоидные загрязнения,

а также бактерии, гуминовые вещества и некоторые растворенные соединения, например, ионы тяжелых металлов.

Минеральные коагулянты, используемые для очистки воды и их дозы приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Минеральные коагулянты, используемые при очистке сточных вод

Коагулянты	Химическая формула	Рабочий интервал pH	Основное вещество		Товарный вид
			химическая формула	содержание, %	
Сульфат алюминия технический (очищенный)	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	5 – 7,5	$Al_2O_3$	13,5 – 15	Куски, гранулы, брикеты белого цвета
Глинозем (неочищенный)	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	5 – 7,5	$Al_2O_3$	9	Куски серого цвета
Алюминат натрия	$Na_3AlO_3$	4,5 – 8	$Al_2O_3$	45 – 55	Куски серого цвета
Хлорид железа	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	3,5 – 6,5	$FeCl_3$	95 – 97	Кристаллы фиолетового цвета
Железный купорос	$FeSO_4 \cdot 6H_2O$	9	$FeSO_4$	47	Кристаллы зеленовато-голубого цвета

Таблица 3.2 – Доза коагулянта в зависимости от концентрации примесей

Концентрация примесей в воде, мг/л	Доза безводного коагулянта, мг/л	Концентрация примесей в воде, мг/л	Доза безводного коагулянта, мг/л
До 100	25-35	801-1000	60-90
101-200	30-45	1001-1400	65-105
201-400	40-60	1401-1800	75-115
401-600	45-70	1801-2200	80-125
601-800	55-80	2201-2500	90-130

*Скорость коагуляции* зависит от концентрации смеси электролитов, находящихся в воде и вносимых в воду вместе с коагулянтами. При малых концентрациях эффективность соударения частиц близка к нулю, по мере ее роста скорость коагуляции увеличивается, но не все столкновения эффективны, такую коагуляцию называют *медленной*. При большой концентрации электролита все столкновения частиц заканчиваются образованием агрегатов, тогда наступает *быстрая* коагуляция.

В полидисперсных системах коагуляция происходит быстрее, чем в монодисперсных, так как крупные частицы при оседании увлекают за собой более мелкие.

На процесс коагуляции оказывают влияние также концентрация водородных ионов в воде (рН), анионный состав воды, форма частиц, правильный выбор коагулянта, щелочность воды, температура, условия перемешивания, быстрота смешения коагулянта с водой, содержание в воде естественных взвесей.

Прочность хлопьев зависит от гранулометрического состава образующихся частиц и пластичности. Агломераты, неоднородные по размеру, прочнее, чем однородные.

Применение коагулянтов связано с трудностью регулирования технологического режима работы очистных сооружений в условиях постоянно меняющегося качества воды. Для стабилизации и интенсификации процессов очистки воды с помощью коагулянтов к последним добавляют специальные вещества – флокулянты.

*Флокуляция* – агрегация частиц коллоидной системы за счет адсорбированных высокомолекулярных веществ органического или неорганического происхождения, называемых флокулянтами. Они принадлежат к классу линейных полимеров, для которых характерна цепочечная форма макромолекул. Молекулярная масса флокулянтов находится в пределах от десятков тысяч до нескольких миллионов, длина цепочки, состоящей из ряда повторяющихся звеньев, достигает сотни нанометров.

В качестве природных *флокулянтов* используют крахмал, водорослевую крупку, белковые гидролизные дрожжи, картофельную мезгу, жмыхи и др. Наиболее распространенными неорганическими флокулянтами являются активированный силикат натрия (активная кремниевая кислота) и активный диоксид кремния  $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ . Активная кремниевая кислота относится к флокулянтам анионного типа. Из синтетических флокулянтов применяют прежде всего органический полимер полиакриламид (ПАА), который является анионным флокулянтом. Выпускают также флокулянты катионного типа (ВА-2, ВА-3, ВА-102, ВА-212), которые в отличие от флокулянта анионного типа ПАА вызывают образование крупных хлопьев без обработки воды коагулянтами.

Технология применения флокулянтов зависит от многих факторов и в первую очередь от физико-химических свойств обрабатываемой жидкости. В таблице 3.3 приведены наиболее употребляемые в технологии водоподготовки дозы флокулянта (полиакриламида) в зависимости от содержания взвешенных веществ и цветности воды.

Использование флокулянтов позволяет снизить дозы коагулянтов, уменьшить продолжительность процесса коагулирования, повысить скорость осаждения образующихся хлопьев.

Таблица 3.3 – Наиболее употребляемые дозы флокулянта в технологии водоподготовки

Доза полиакриламида, г/м <sup>3</sup>	Содержание взвешенных веществ, г/м <sup>3</sup>	Цветность, град
0,4-10	501-1000	–
0,6-0,4	101-500	20-60
1,0-0,6	11-100	30-100
1,5-1,0	До 10	50

Механизм действия флокулянтов основан на следующих явлениях: адсорбции молекул флокулянта на поверхности коллоидных частиц, образовании сетчатой структуры молекул флокулянта, слипания коллоидных частиц за счет сил Ван-дер-Ваальса. ПАА образует в воде длинные цепочки вытянутой или изогнутой формы. Из-за такой формы молекулы ПАА адсорбция происходит в разных местах с несколькими частицами гидроксида, в результате чего последние связываются полимерными мостиками в тяжелые, крупные и прочные хорошо осаждающиеся агрегаты. ПАА выпускается в виде 7-9 % геля.

Флокулянты обычно применяют в дополнение к основному коагулянту, иногда самостоятельно, особенно в последнее время. Доза анионных флокулянтов в дополнение к коагулянтам при очистке промышленных сточных вод 0,5-3 г/м<sup>3</sup>, доза катионных флокулянтов при тех же условиях выше и составляет 2,5-20 г/м<sup>3</sup>. Средние дозы флокулянтов 0,5-1 г/м<sup>3</sup>.

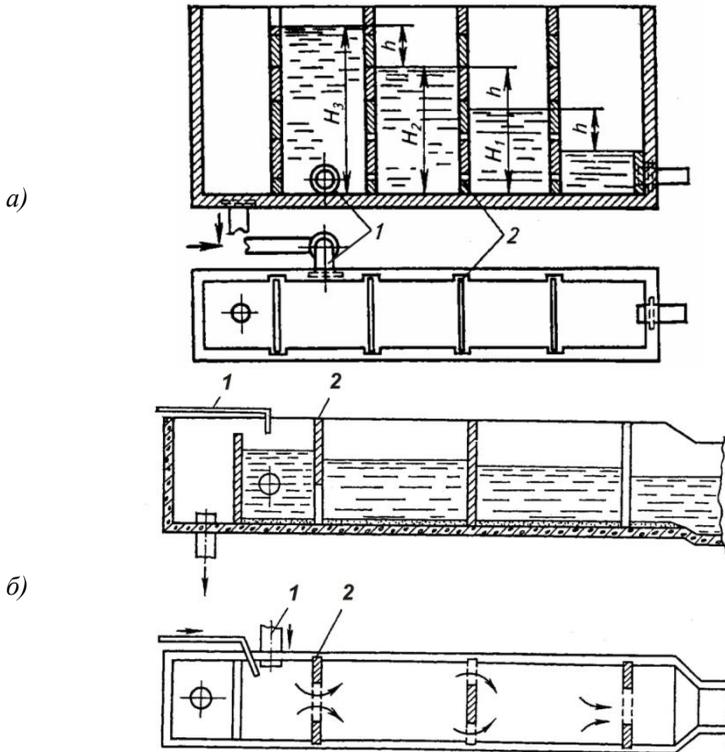
Скорость и эффективность процесса флокуляции зависят от состава сточных вод, их температуры, интенсивности перемешивания и последовательности введения коагулянтов и флокулянтов.

### 3.1.2 Сооружения коагуляции и флокуляции

Очистка воды коагуляцией и флокуляцией включает процессы приготовления водных растворов коагулянтов и флокулянтов, их дозирование в обрабатываемую воду, смешение со всем объемом воды, хлопьеобразование, выделение хлопьев из воды.

*Приготовление и дозирование* реагентов производят в виде растворов или суспензий. Растворение осуществляют в растворных баках, концентрация раствора при этом должна составлять (10-17) %. Для перемешивания в растворные баки подают сжатый воздух через перфорированные трубы. Концентрированные растворы коагулянтов и флокулянтов перемешивают с водой в расходных баках лопастными мешалками, воздухом или циркуляционными насосами до концентрации (1-10) %, флокулянтов – до (0,1-1) %.

Смешение коагулянтов (флокулянтов) со всем объемом обрабатываемой воды происходит в *смесителях*, продолжительность пребывания воды в них от 1 до 5 мин.



а – дырчатый

б – перегородчатый

1 – подача воды; 2 – перегородка с отверстиями

Рисунок 3.1 – Смесители

Применяются дырчатые, перегородчатые, шайбовые, вертикальные смесители, а также механические с лопастными или пропеллерными мешалками. В первых четырех типах аппаратов смешение происходит вследствие изменения направления движения и скорости потока воды, они относятся к гидравлическим.

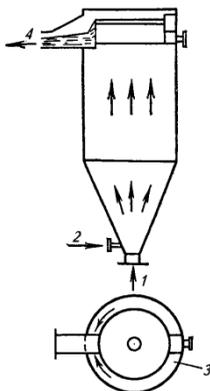
*Дырчатый* и *перегородчатый* смесители выполняются в виде прямоугольного железобетонного или металлического лотка с перегородками. В первом случае в перегородке имеются отверстия, во втором – проемы в середине или по бокам, примыкающим к стенкам сме-

сителя. Скорость движения воды в лотке 0,6 м/с, в отверстиях перегородок или проемов 1 м/с (рисунок 3.1).

*Вертикальный (вихревой) смеситель* (рисунок 3.2) имеет нижнюю коническую, верхнюю цилиндрическую часть. Вода с коагулянтom поступает в коническую часть со скоростью 1 м/с, при движении ее вверх к цилиндрической части скорость уменьшается до 25 мм/с, за счет чего и происходит перемешивание.

В *механических смесителях* – аппаратах с мешалками, процесс перемешивания должен быть равномерным и медленным, чтобы образовавшиеся хлопья не разрушались при вращении мешалки.

Время пребывания в смесителях составляет 1-2 минуты.



1 – подача сточных вод; 2 – подача реагентов; 3 – лоток;  
4 – выпуск сточных вод

Рисунок 3.2 – Вертикальный смеситель

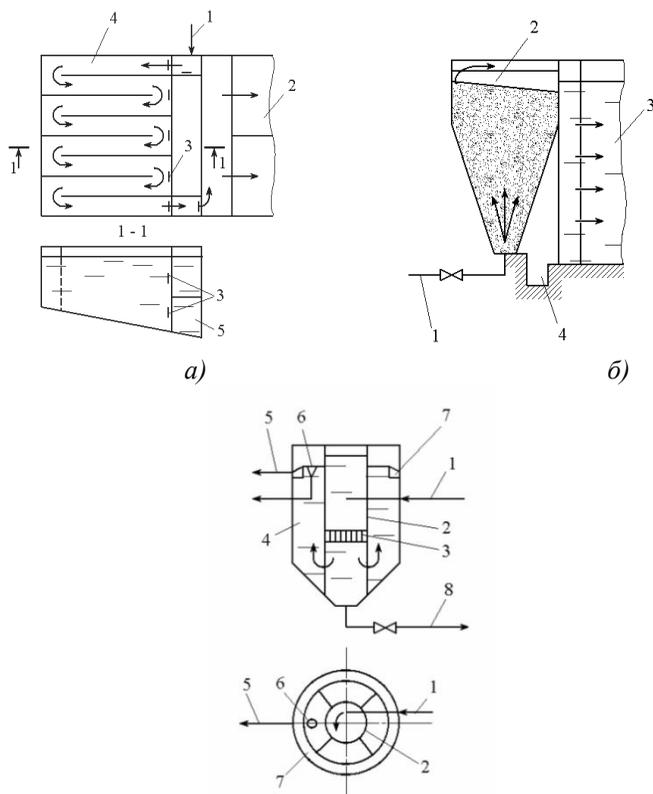
После смешения сточных вод с реагентом вода направляется в *камеры хлопьеобразования*, служащие для образования хлопьев коагулянтов и их агломерации. Используют перегородчатые, вихревые, водоворотные камеры (рисунок 3.3).

*Перегородчатая* камера представляет собой резервуар, разделенный вертикальными или горизонтальными перегородками на 8-10 коридоров, скорость движения воды в них составляет 0,2-0,3 м/с, продолжительность пребывания – 20-30 минут. Такие камеры конструктивно объединяют с горизонтальными отстойниками.

*Вихревые* камеры работают по принципу вихревых смесителей. Скорость движения воды в нижней конической части 0,7 м/с, в верхнем сечении 4-5 мм/с, продолжительность пребывания 6-10 мин.

*Водоворотная* камера хлопьеобразования конструктивно объединяется с вертикальным отстойником, совмещаясь с его центральной трубой. В верхнюю часть смесителя вводится сточная вода с враща-

тельной скоростью на выходе из сопла 2-3 м/с. В нижней части камеры перед выходом в отстойник находятся гасители вращательного движения воды. Продолжительность пребывания воды в камере 15-20 минут.



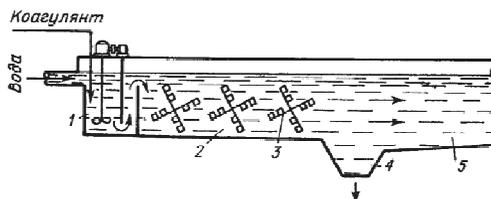
- а – перегородчатая: 1 – сточная вода; 2 – отстойник; 3 – шиберы;  
4 – коридоры; 5 – канал опорожнения
- б – вихревая: 1 – сточная вода; 2 – сборный лоток; 3 – отстойник;  
4 – сборный канал осадка

в – водоворотная: 1 – сточная вода; 2 – водоворотная камера хлопьеобразования;  
3 – гаситель турбулентности потока; 4 – вертикальный смеситель;  
5 – отвод осветленной воды; 6 – перелив; 7 – сборный лоток;  
8 – отвод осадка

Рисунок 3.3 – Камеры хлопьеобразования

В зарубежной и отечественной практике получили распространение камеры хлопьеобразования с механическим перемешиванием (рисунок 3.4). Часто такие камеры совмещают с горизонтальным отстой-

ником, для перемешивания применяют горизонтальные или вертикальные мешалки. Скорость движения воды 0,15 – 0,2 м/с, продолжительность пребывания 20 – 30 мин.

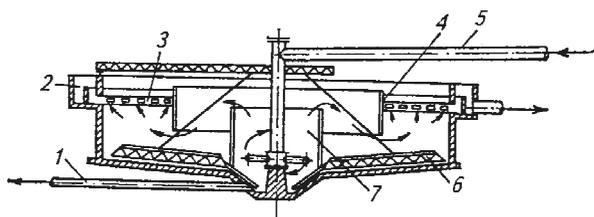


1 – камера смешения; 2 – камера хлопьеобразования; 3 – горизонтальная лопастная мешалка; 4 – камера осадка; 5 – отстойная камера

Рисунок 3.4 – Схема отстойника с механической камерой хлопьеобразования

Иногда смесители и камеры хлопьеобразования объединяют в одно сооружение. Часто стадии смешения, коагулирования и отстаивания также проводят в одном аппарате.

В последние годы стали применяться встроенные камеры хлопьеобразования, например, в радиальный отстойник (рисунок 3.5).

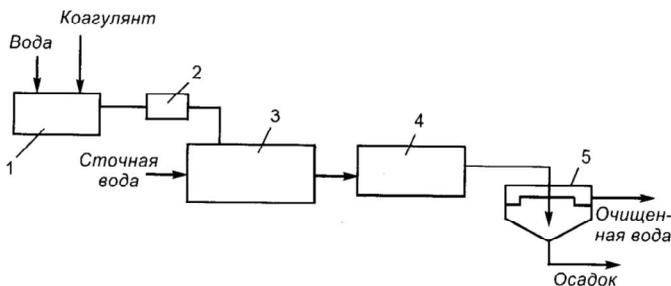


1 – отвод осадка; 2 – кольцевой водосборный лоток; 3 – водосборные трубы; 4 – полупогружная перегородка; 5 – подача исходной воды; 6 – скребковая ферма; 7 – камера хлопьеобразования

Рисунок 3.5 – Отстойник с камерой хлопьеобразования гидроциклонного типа

Осаждение хлопьев происходит в отстойниках и осветлителях. Наиболее целесообразной является двухступенчатая схема, когда на первой ступени осуществляется простое отстаивание в отстойнике без коагулянта, а на второй – отстаивание после предварительной обработки сточных вод коагулянтами и флокулянтами.

На рисунке 3.6 приведена схема очистки воды коагуляцией.



1 – емкость для приготовления растворов; 2 – дозатор; 3 – смеситель;  
4 – камера хлопьеобразования; 5 – отстойник

Рисунок 3.6 – Схема установки для очистки вод коагуляцией

### Контрольные вопросы

1. Механизм процесса коагуляции
2. Коагулянты, используемые для очистки воды
3. Гидролиз коагулянтов
4. Факторы, влияющие на процесс коагуляции
5. Механизм процесса флокуляции
6. Природные и синтетические флокулянты
7. Использование коагулянтов и флокулянтов в практике очистки воды
8. Стадии очистки воды коагуляцией и флокуляцией
9. Основные конструкции смесителей
10. Камеры хлопьеобразования, их компоновка с другим оборудованием
11. Компоновка камер хлопьеобразования с отстойниками
12. Схема установки для очистки воды коагуляцией

## 3.2 Флотация

### 3.2.1 Физико-химические основы и способы флотации

*Флотация* - это процесс, основанный на молекулярном слипании коллоидных и дисперсных примесей с пузырьками воздуха, всплывании комплекса пузырек-частица на поверхность воды с образованием пены. При этом происходит концентрирование частиц в образовавшемся пенном слое, который затем удаляется с поверхности воды.

Флотационные установки используются для извлечения из сточных вод масел, нефтепродуктов, смол, гидроксидов, ПАВ, полимеров, волокнистых материалов и других с гидравлической крупностью ме-

нее 0,01 мм/с. Флотацию применяют для очистки сточных вод многих производств: нефтеперерабатывающих, искусственного волокна, целлюлозно-бумажных, машиностроительных, пищевых, кожевенных, химических.

Процесс очистки сточных вод методом флотации заключается в образовании комплексов (агломератов) частицы-пузырьки за счет прилипания частиц к пузырькам воздуха и их всплывания.

Эффект прилипания зависит от смачиваемости частицы, которая характеризуется величиной *краевого угла смачивания*  $\theta$  (рисунок 3.7). Чем больше краевой угол, тем более гидрофобна поверхность частицы, тем больше вероятность прилипания и прочность удержания пузырька воздуха на ее поверхности. Внешним проявлением способности жидкости к смачиваемости является величина поверхностного натяжения ее на границе с газовой фазой, а также разность полярностей на границе жидкой и твердой фаз.

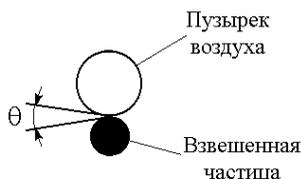


Рисунок 3.7 – Схема прилипания пузырька воздуха к взвешенной частице

Процесс флотации идет эффективно при поверхностном натяжении воды не более 60–65 мН/м. Интенсификация процесса флотации достигается гидрофобизацией поверхности дисперсных примесей реагентами, которые избирательно сорбируясь на поверхности частичек, понижают их смачиваемость, в результате чего улучшается прилипание примесей к пузырькам воздуха и делает образовавшийся комплекс устойчивым. В качестве таких реагентов используют коагулянты, флокулянты, собиратели и пенообразователи, для создания оптимальной рН среды применяют известь, кислоты, едкий натр.

Флотуемость частиц различной крупности зависит от размеров, количества и равномерности распределения пузырьков воздуха (лучший эффект достигается при высокой степени насыщения воды пузырьками), поверхностного натяжения воды, присутствия в воде примесей ПАВ, электролитов и др.

Достоинствами флотации является непрерывность процесса, широкий диапазон применения, небольшие капитальные и эксплуатационные затраты, высокая степень очистки (до 95–98 %), большая скорость процесса по сравнению с отстаиванием, возможность рекуперации удаляемых веществ.

Традиционным признаком классификации флотационных сооружений является способ получения диспергированной газовой фазы (ДГФ). При этом можно выделить группы: *диспергирование* – дробление газовой фазы в толще жидкости и *выделение* из обрабатываемой воды (рисунок 3.8)

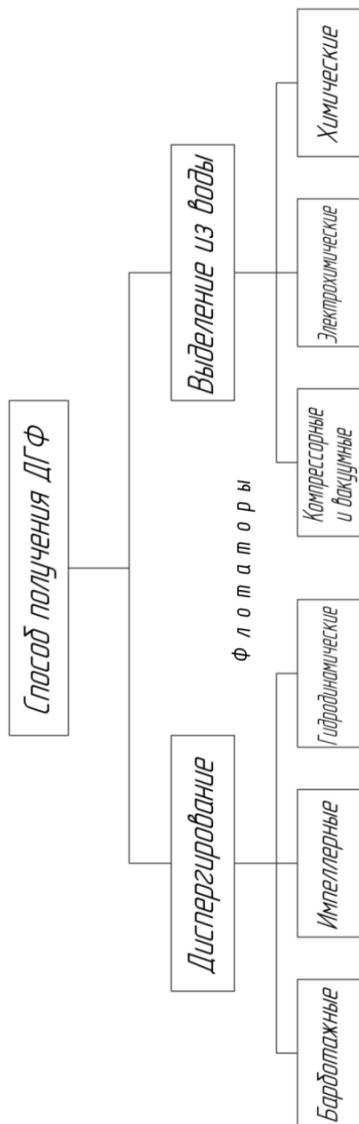


Рисунок 3.8 – Классификация флотационных сооружений по способу получения ДГФ

На практике процесс флотации осуществляют несколькими *способами диспергирования* воздуха в воде:

- подача воздуха через пористые материалы – *барботажная*;
- механический – воздух подсасывается в воду при ее интенсивном перемешивании с последующим диспергированием лопастями мешалки – *импеллерная флотация, безнапорная*;
- гидродинамический – насыщение воздухом через сопла водораспределительных труб – *пневматическая флотация*;
- компрессионный, когда воздух предварительно растворяется в воде под давлением – *напорная флотация*;
- вакуумный – выделение мелкодисперсных пузырьков воздуха из воды при снижении давления – *вакуумная флотация*;
- электрический способ насыщения воды газом при электролизе воды – *электрофлотация*;
- химический – пузырьки газа образуются при химических реакциях с вводимыми в воду реагентами – *химическая флотация*.

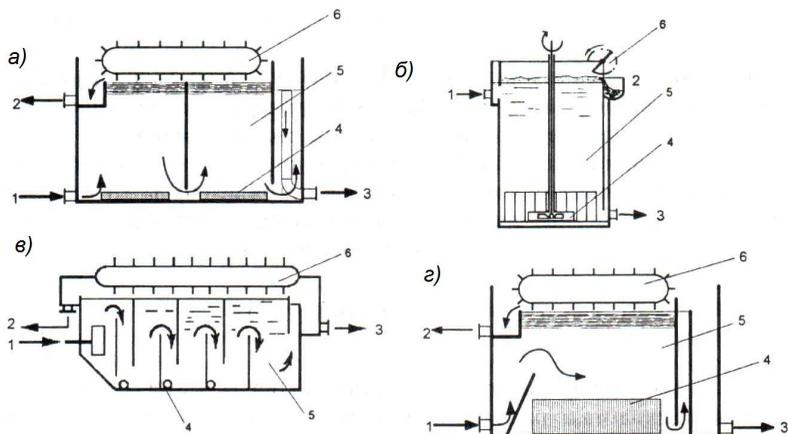
Одним из наиболее распространенных методов получения ДГФ в очистных сооружениях является барботаж. Воздух проходит через отверстия (поры) фильтрационного устройства и образует поток газовых пузырьков.

Для механического диспергирования газовой фазы используют различные мешалки (импеллеры).

В компрессионных и вакуумных установках ДГФ получают из пересыщенных растворов газов, которые образуются при предварительном насыщении (напорная флотация) или снижении давления во флотаторе (вакуумная флотация). По сравнению с другими методами в этих установках обеспечивается наибольшая дисперсность газовой фазы в воде. Такой же пересыщенный раствор может быть получен при протекании химических, электрохимических, микробиологических процессов.

### **3.2.2 Флотационные установки**

Все *типы флотационных сооружений* содержат ряд общих конструктивных элементов. К ним относятся камера флотации, которая может быть одно- и многосекционной, система распределения подаваемой на очистку воды, система получения ДГФ, устройства для сбора и удаления флотошлама. Различные *варианты флотационных сооружений* приведены на рисунке 3.9.

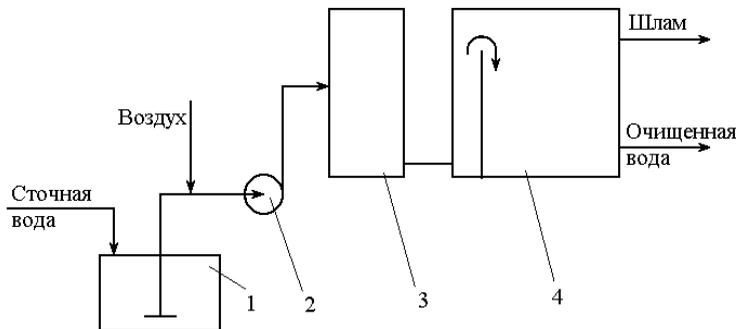


*a – барботажный; б – импеллерный; в – компрессионный (напорная флотация); г – электрохимический*

*1, 3 – подача сточных вод и отведение очищенной воды; 2 – отведение флотошлама; 4 – система получения газовой дисперсии; 5 – камера флотации; 6 – пеноуловитель*

Рисунок 3.9 – Флотаторы

Наиболее широко в процессах очистки сточных вод используется *напорная флотация*. Она позволяет очищать сточные воды с концентрацией взвесей до 4-5 г/л. Для увеличения степени очистки в воду добавляют коагулянты. Установки напорной флотации просты и надежны в эксплуатации. Принципиальная схема напорной флотации приведена на рисунке 3.10.



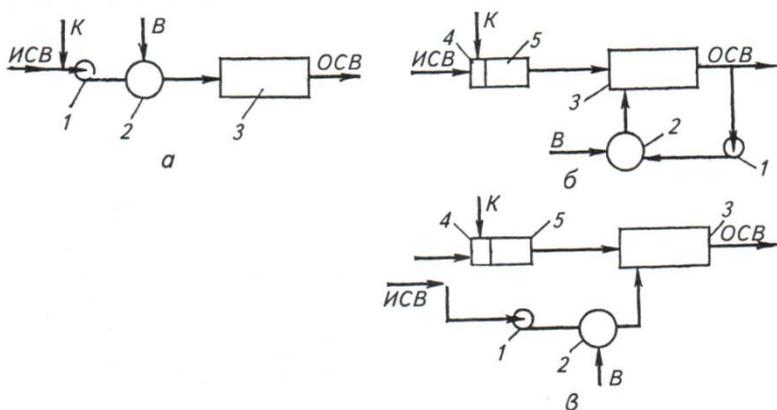
*1 – емкость; 2 – насос; 3 – сатуратор; 4 – флотатор*

Рисунок 3.10 – Схема напорной флотации

Установки для напорной флотации включают резервуар сточной воды 1, насосы для подачи жидкости 2, эжекторы или компрессоры для подачи воздуха в воду, напорный резервуар для насыщения воды воздухом (сатуратор) 3, флотационную камеру 4 и оборудование для сбора и удаления пены с загрязнениями.

Из резервуара вода перекачивается насосом, во всасывающий трубопровод которого эжектором засасывается воздух. Образующаяся водовоздушная смесь направляется в напорную емкость, где при повышенном давлении (0,15-0,5 МПа) воздух растворяется в воде. При поступлении водовоздушного раствора во флотатор, который работает при атмосферном давлении, воздух выделяется в виде пузырьков и флотирует взвешенные частицы. Таким образом, образование пузырьков газа происходит вследствие уменьшения растворимости воздуха в воде при снижении давления. Количество растворяющегося в сатураторе воздуха должно составлять (1,5-5) % объема обрабатываемой сточной воды.

В зависимости от характеристики сточных вод и флотируемых загрязнений применяются три технологические схемы напорной флотации (рисунок 3.11).



*а – прямоточная; б – рециркуляционная; в – частично-прямоточная*  
 ИСВ – исходная сточная вода; ОСВ – очищенная сточная вода;  
 К – коагулянт; В – воздух;

*1 – насос; 2 – сатуратор; 3 – флотатор; 4 – смеситель;  
 5 – камера хлопьеобразования*

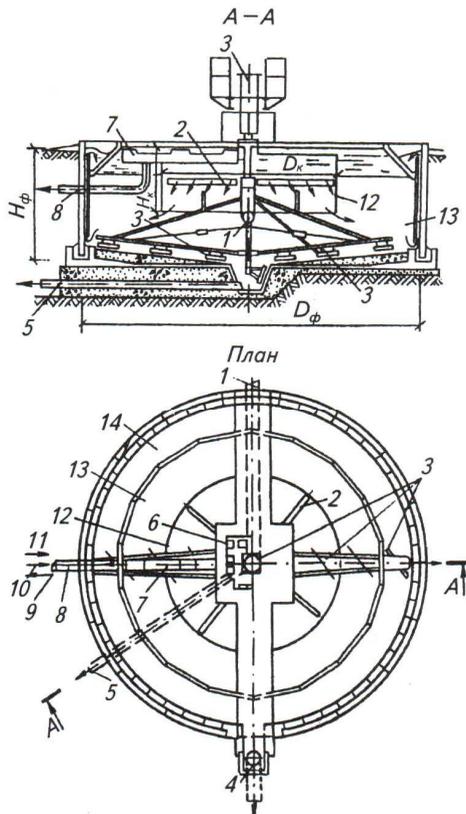
Рисунок 3.11 – Технологические схемы метода напорной флотации

При прямоточной схеме весь объем обрабатываемых сточных вод насыщается воздухом в сатураторе. При рециркуляционной схеме в сатуратор подается от 20 % до 70 % воды, прошедшей флотокамеру. В

частично-прямоточной схеме в сатуратор для насыщения воздухом поступает часть исходной неочищенной воды (от 30 % до 70 %), остальная часть направляется во флотокамеру.

Для напорной флотации используют флотаторы-отстойники радиального типа или прямоугольные в плане многокамерные флотаторы.

Радиальный флотатор-отстойник (рисунок 3.12) имеет встроленную подвесную флотационную камеру высотой  $H_k=1,5$  м, комбинированный механизм для распределения сточной воды, сгребания пены и сбора осадка. Высота флотатора-отстойника  $H_\phi=3$  м; он применяется при производительности более  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ .



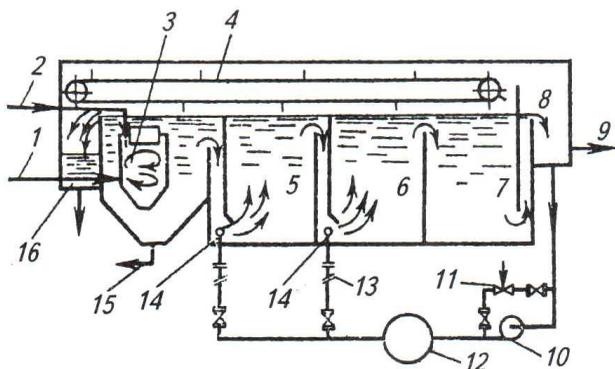
1 – подводный трубопровод; 2 – водораспределитель; 3 – механизм для сгребания пены и сбора осадка; 4 – отводящий трубопровод; 5 – трубопровод отвода осадка; 6 – привод механизма; 7 – пеносборный лоток; 8 – трубопровод отвода пены; 9 – отвод конденсата; 10 – подача воды на дождевание пены; 11 – подача пара; 12 – флотационная камера; 13 – отстойная зона; 14 – кольцевой водосборный лоток

Рисунок 3.12 – Флотатор-отстойник радиального типа

Вода, насыщенная воздухом, по трубопроводу 1 через водораспределитель 2 поступает во флотационную камеру 12. Всплывшая пена собирается в пеносборный лоток 7, вода поступает в отстойную зону 13. Очищенная вода отводится кольцевым водосборным лотком 14. Осадок с помощью скребкового механизма 3 сгребается в приемок осадка и выводится из флотатора по трубопроводу 5.

*Горизонтальные флотаторы* (рисунок 3.13) глубиной 1-1,5 м предназначены для очистки воды до 100 м<sup>3</sup>/ч.

Вода 1 и коагулянт 2 поступают в смеситель гидроциклонного типа 3, из которого по трубопроводу 15 отводится осадок, а вода направляется в первую 5 и вторую 6 ступени флотации и далее в отстойную камеру 7. Водовоздушная смесь подается из сатуратора 12 по трубопроводу 14 в камеры флотатора. Очищенная вода отводится через лоток 8 трубопроводом 9. Всплывшая пена собирается скребковым механизмом 4.



- 1 – исходная вода; 2 – подача коагулянта; 3 – смеситель гидроциклонного типа; 4 – скребковый транспортер; 5 – первая ступень флотации; 6 – вторая ступень флотации; 7 – отстойная камера; 8 – водоприемный лоток; 9 – очищенная вода; 10 – насос; 11 – эжектор; 12 – сатуратор; 13 – диафрагма; 14 – трубопровод распределения водовоздушной смеси; 15 – отвод осадка; 16 – пеносборник

Рисунок 3.13 – Схема флотационной установки ЦНИИ МПС горизонтального типа

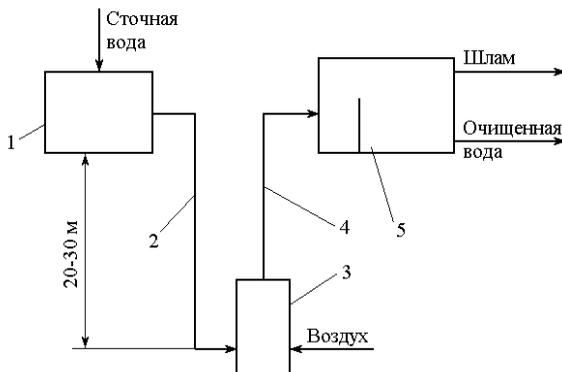
Продолжительность пребывания воды во флотационной камере при напорной флотации составляет от 5-7 до 20 мин.

Напорная флотация применяется для очистки сточных вод от нефти, нефтепродуктов, жиров, масел, ПАВ и волокнистых веществ.

При *вакуумной флотации* сточную воду предварительно насыщают воздухом при атмосферном давлении в аэрационной камере, а за-

тем направляют во флотационную камеру, где вакуум-насосом поддерживается разрежение.

При *эрлифтной флотации* затраты энергии в 2-4 раза меньше, чем при напорной, но конструкция установки требует значительного перепада отметок по высоте между питательным резервуаром со сточной водой 1, аэратором 3 и флотационной камерой 5 (до 20-30 м), что значительно сужает область применения этого метода (рисунок 3.14).



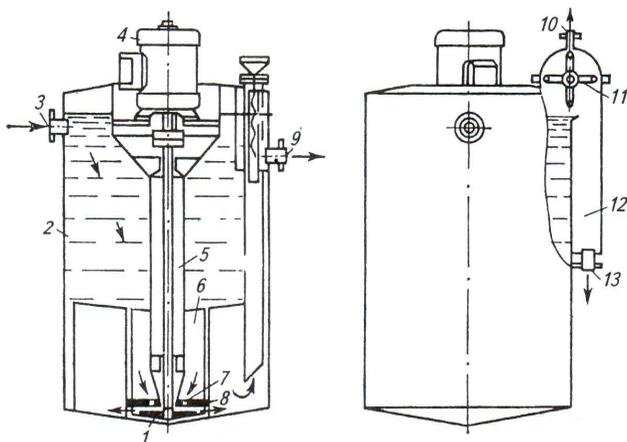
1 – емкость; 2 – трубопровод; 3 – аэратор; 4 – труба эрлифта; 5 – флотатор

Рисунок 3.14 – Схема эрлифтной флотационной установки

Флотация с *механическим диспергированием воздуха* осуществляется импеллерами – турбинками насосного типа. При вращении импеллера в жидкости возникает большое число мелких вихревых потоков, которые разбиваются на пузырьки определенной величины. Такие установки применяют для очистки сточных вод, с высоким содержанием взвешенных частиц (более 2 г/л), но в них нельзя использовать коагулянты, т. к. их хлопья разрушаются при турбулентном перемешивании. Эффективность очистки импеллерной флотацией зависит от скорости вращения импеллера. Схема флотационной машины импеллерного типа показана на рисунке 3.15.

В центре камеры 2 установлен закрытый статором импеллер 1, который приводится в движение электродвигателем 4. При вращении импеллера образуется зона пониженного давления, куда через центральную трубу 5 подсасывается воздух. Одновременно через отверстия на лопасти импеллера поступает небольшое количество воды, которая перемешивается с воздухом и выбрасывается через боковые отверстия во флотационную камеру. Отбойные перегородки 6 гасят энергию турбулентного потока, выходящего из отверстий статора 7. Воздушные пузырьки флотируют примеси на поверхность, пенный слой удаляется пеноснимателем 11.

Камера импеллерного флотатора может быть круглой или квадратной в плане. Диаметр импеллера 600-700 мм, скорость вращения 10-15 м/с, продолжительность флотации 15-20 мин.



1 – импеллер; 2 – флотационная камера; 3 – штуцер ввода исходной сточной воды; 4 – электродвигатель; 5 – воздушная труба; 6 – отбойные перегородки; 7 – отверстия статора; 8 – статор; 9 – штуцер вывода очищенной воды; 10 – штуцер вывода воздуха; 11 – пеносниматель; 12 – пеносорбный бункер; 13 – штуцер вывода пенного продукта

Риснок 3.15 – Флотационная машины импеллерного типа

При *пневматической флотации (гидродинамической)* измельчение пузырьков воздуха достигается путем впуска воздуха во флотационную камеру через специальные сопла на воздухораспределительных трубках, укладываемых на дно флотационной камеры. Такие установки применяются при очистке сточных вод, содержащих растворенные примеси, агрессивные по отношению к механизмам, имеющим движущиеся части (насосы, импеллеры). Они относятся к гидродинамическим или гидромеханическим флотатором.

Диспергирование воздуха в *безнапорных установках* происходит за счет вихревых потоков, создаваемых рабочим колесом центробежного насоса. Схема флотации аналогична напорной, но в ней отсутствует сатуратор, что и является преимуществом безнапорной флотации.

Флотация воздуха через пористые материалы (*барботажная*) отличается простотой аппаратного оформления процесса и относительно малыми расходами энергии. Однако происходит частое зарастание и засорение отверстий пористого материала (фильтросных пластин, труб, насадок), а также имеются трудности в подборе материала с одинаковыми отверстиями пор от 4 до 20 мкм, обеспечивающими образование мелких и равных по размерам пузырьков.

*Химическая флотация* заключается во введении в сточную воду химических реагентов, которые выделяют пузырьки газа:  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $Cl_2$  и др. Пузырьки этих газов при некоторых условиях могут прилипать к нерастворимым взвешенным частицам и выносить их в пенный слой. Такое явление, например, наблюдается при обработке сточных вод хлорной известью с введением коагулянтов.

*Биологическая флотация* применяется для уплотнения осадка из первичных отстойников. При этом осадок подогревается паром в специальной емкости до (35-55) °С и при этих условиях выдерживается не-сколько суток. В результате деятельности микроорганизмов выделяются пузырьки газа, которые уносят частицы осадка в пенный слой, где они уплотняются и обезвоживаются. Таким путем за 5-6 суток влажность осадка можно понизить до 80 % и тем самым упростить его дальнейшую обработку.

*Ионной флотацией* извлекают из воды ионы. В сточную воду вводят воздух, разбивая его на пузырьки каким-либо из вышеописанных способов, и собиратель (поверхностно-активное вещество, которое сорбируясь на частицах, понижает их смачиваемость, т. е. делает гидрофобными). Собиратель образует в воде ионы, которые имеют заряд, противоположный заряду извлекаемого иона. Ионы собирателя и загрязнений концентрируются на поверхности газовых пузырьков и выносятся ими в пену. Этот процесс можно использовать для удаления из сточных вод таких металлов, как Mo, W, V, Pt, Re и др.

Для удаления из воды ПАВ используют *пенную сепарацию* или *пенное фракционирование*, основанные на селективной адсорбции одного или нескольких растворенных веществ на поверхности газовых пузырьков, которые поднимаются наверх. Образовавшаяся пена обогащается адсорбированным веществом, что и обеспечивает фракционирование компонентов раствора. Процесс аналогичен адсорбции на твердых сорбентах. При пенной сепарации одновременно с ПАВ происходит удаление из воды суспендированных или эмульгированных частиц, а также частично растворенных веществ. Для барботажки чаще применяют мелкопористые аэраторы.

### Контрольные вопросы

1. Физико-химические основы флотации
2. Механизм акта флотации
3. Факторы, влияющие на процесс флотации
4. Способы диспергирования газовой фазы в воде
5. Классификация процессов флотации
6. Варианты флотационных сооружений
7. Схема установки напорной флотации
8. Технологические схемы напорной флотации

9. Конструкции флотационных установок напорной флотации
10. Эрлифтная флотационная установка
11. Импеллерные флотационные установки
12. Характеристика различных видов флотации

### 3.3 Адсорбция

#### 3.3.1 Физико-химические основы процесса

*Адсорбция* используется для очистки сточных вод от растворенных органических веществ. Она может применяться самостоятельно и совместно с биологической очисткой как метод предварительной и глубокой очистки, а также в локальных установках для обезвреживания сточных вод от фенолов, гербицидов, ПАВ, красителей, ароматических углеводов, пестицидов и других органических соединений. Адсорбция эффективна для извлечения ценных продуктов с целью их регенерации, для удаления токсичных веществ, препятствующих биологической очистке, для глубокой очистки сточных вод, используемых в системах оборотного водоснабжения.

Эффективность адсорбционной очистки составляет от 80 % до 95 % и зависит от химической природы адсорбента, величины адсорбционной поверхности и ее доступности, от химического строения вещества и его состояния в водном растворе.

Преимуществом метода является возможность сорбции веществ из многокомпонентных смесей, в том числе из слабоконцентрированных сточных вод, высокая эффективность очистки.

*Адсорбция* растворенных веществ – результат перехода молекулы растворенного вещества из раствора на поверхность твердого сорбента под действием силового поля поверхности. При этом наблюдается два вида межмолекулярного взаимодействия: растворенного вещества с твердой поверхностью и с молекулами воды в растворе (гидратация). Разность этих двух сил и определяет возможность удерживания вещества на поверхности сорбента. Чем больше энергия гидратации молекул растворенного вещества, тем большее противодействие испытывают эти молекулы при переходе на поверхность сорбента и тем слабее адсорбируется вещество из раствора. Поэтому сорбционная очистка сточных вод целесообразна, если в них содержатся соединения, энергия связи которых с твердой поверхностью значительно превосходит энергию гидратации.

В качестве *сорбентов* могут служить различные искусственные и природные пористые материалы, прежде всего активированные угли различных марок, зола, шлак, торф и др. Минеральные сорбенты - глины, силикагели, алюмогели, гидроксиды используются мало, т.к. энергия взаимодействия их с молекулами воды велика и нередко превышает

ет энергию адсорбции. Однако предварительная обработка, например, глинистых материалов – бентонитов, позволяет значительно увеличить их сорбционную емкость. Наиболее универсальными сорбентами являются активные угли.

Активные угли изготавливают на древесной и каменноугольной основах, а также из полимерных волокон, путем пиролиза материала основы, т. е. его высокотемпературной обработки без доступа воздуха.

В зависимости от преобладающего размера пор активные угли делятся на *крупно-, мелкопористые и смешанные*. Поры по размерам подразделяются на три типа: макропоры, размером 0,1-2 мкм; переходные (мезо-) – 0,004-0,1 мкм; микропоры – менее 0,004 мкм. Макро- и переходные поры играют роль транспортирующих каналов, а микропоры определяют сорбционную способность активных углей.

Активированные угли, предназначенные для очистки сточных вод, должны быть относительно крупнопористыми, чтобы они могли улавливать большие и сложные органические молекулы; обладать небольшой удерживающей способностью при регенерации; не подвергаться истиранию; не быть катализаторами по отношению к реакциям, протекающим в водной среде; легко смачиваться водой; иметь низкую стоимость.

Для адсорбции из жидких сред применяют порошкообразные (размеры частиц менее 0,25 мм) и гранулированные (размеры частиц более 1 мм) активные угли: БАУ, КАД-молотый, КАД-иодатный, АГ-2, АР-3, СКТ и др.

Некоторые характеристики активных углей приведены в таблице 2.4.

Таблица 3.4 – Характеристики активных 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	0,60	0,30	1,0 – 3,5	600
АГ-3	0,80 – 1,06	0,37	1,5 – 2,8	450
БАУ	1,50	0,32	1,0 -3,5	260
АР-3	0,70	0,19	1,0 – 5,5	550
КАД-йодный	1,00	0,23	1,0 – 5,0	380
КАД-молотый	0,42	0,12	< 0,04	–
СКТ	0,98	0,51	1,5 – 2,0	420

В процессе адсорбционной доочистки активный уголь удаляет из воды биохимически неокисленные органические вещества, микроколичества ионов тяжелых металлов, радиоактивных изотопов, хлоридов ртути и золота, солей серебра, остаточный хлор, аммонийный азот, бактериальные и другие загрязнения.

В настоящее время для адсорбции в водной среде синтезированы полимерные пористые материалы, в частности, на основе стирола и дивинилбензола – *полисорбы*. Их технологические свойства отличаются от активных углей несколько меньшей энергией связи извлекаемых загрязнений с поверхностью полисорба, но они легче поддаются регенерации растворителями, что важно для последующей утилизации ценных веществ.

В последнее время для получения сорбентов стали использовать *вторичное сырье* – отходы деревообработки, сельского хозяйства. Их подвергают модификации растворами кислот и щелочей и наносят на природный минеральный сорбент.

Одним из основных критериев оценки адсорбционных свойств сорбентов является *изотерма сорбции*, которая отражает связь величины адсорбции с концентрацией поглощаемого компонента в условиях равновесия между фазами при постоянной температуре. Аналитически эта зависимость в случае разбавленных растворов, что имеет место при очистке сточных вод, описывается уравнением Ленгмюра, полученным на базе предпосылок теории мономолекулярной адсорбции:

$$a = K_{\text{адс}} \cdot C_p,$$

где  $a$  – количество поглощенного адсорбата единицей объема или массы адсорбента (удельная адсорбция), кг/кг; кг/м<sup>3</sup>;

$K_{\text{адс}}$  – адсорбционная константа распределения сорбата между сорбентом и раствором, зависящая от температуры;

$C_p$  – равновесная концентрация адсорбируемого вещества в жидкости, кг/кг; кг/м<sup>3</sup>.

*Статическая активность* сорбента характеризуется максимальным количеством вещества, поглощенного единицей объема или массы сорбента к моменту достижения равновесия при постоянной температуре и начальной концентрации вещества.

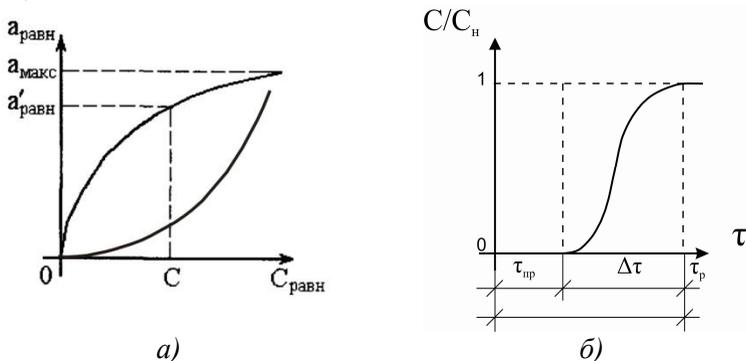
*Динамическая активность* – максимальное количество вещества, поглощенное единицей объема или массы сорбента до момента появления сорбируемого вещества в фильтрате при пропуске воды через слой сорбента. Динамическая активность в промышленных условиях составляет от 45 % до 90 % статической.

Изотерму адсорбции вещества, находящегося в воде, определяют опытным путем, ее можно приближенно вычислить и без экспериментов.

Вещества, хорошо сорбируемые из водных растворов активными углями, имеют выпуклую изотерму адсорбции, плохо сорбируемые – вогнутую. Изотермы адсорбции в статических и динамических условиях приведены на рисунке 3.16.

Скорость процесса адсорбции зависит от концентрации, природы и структуры растворенных веществ, температуры воды, вида и свойств адсорбента.

В общем случае процесс адсорбции складывается из *трех стадий*: переноса вещества из сточной воды к поверхности адсорбента (внешнедиффузионная область), переноса вещества внутрь зерен адсорбента (внутридиффузионная область), собственно адсорбционный процесс.



*a* – удельная адсорбция;  $C_n$ ,  $C$ ,  $C_p$  – концентрации адсорбируемого вещества соответственно начальная, текущая, равновесная;  $\tau_{пр}$  – время защитного действия слоя;  $\tau_p$  – время достижения равновесия

Рисунок 3.16 – Изотермы адсорбции в статических (а) и динамических (б) условиях

Скорость собственно адсорбции велика, следовательно, лимитирующей стадией может быть внешняя либо внутренняя диффузия, или обе вместе.

Во внешнедиффузионной области скорость массопереноса в основном определяется интенсивностью турбулентности потока, т.е. скоростью жидкости. Во внутридиффузионной области скорость массопереноса зависит от вида и размеров пор адсорбента, от формы и размеров его зерен, от размера молекул адсорбирующихся веществ. Процесс целесообразно проводить при гидродинамических режимах, лимитируемых внутридиффузионной областью, сопротивление которой можно снизить, изменяя структуру адсорбента, уменьшая размеры зерен. Рекомендуемые для ориентировочных расчетов значения скорости воды  $v=1,8$  м/ч, диаметра зерна адсорбента  $d_s=2,5$  мм. При меньших значениях процесс лимитируется во внешнедиффузионной области, при больших – во внутридиффузионной.

### 3.3.2 Статическая адсорбция

Процесс сорбции может осуществляться в статических или динамических условиях. При *статической адсорбции* жидкость не перемещается относительно частицы сорбента, а движется вместе с последней. При этом проводят интенсивное перемешивание, используя сорбент с размерами частиц 0,1 мм и менее, в одну или несколько ступеней с последующим отделением от воды отстаиванием или фильтрованием. Статическая одноступенчатая адсорбция применяется, когда адсорбент дешев или является отходом производства.

Более эффективно процесс протекает при использовании многоступенчатых установок, осуществляемых в *прямоточном* и *противоточном вариантах*. Схемы таких установок приведены на рисунке 3.17. При последовательном введении сорбента его подают в каждую ступень и из нее же отводят отработанный сорбент. В противоточной схеме адсорбент вводят однократно в последнюю ступень и он движется навстречу сточной воде. Противоточные сорбционные установки применяются значительно шире благодаря более экономичному расходованию адсорбента.

В основу *расчета статической адсорбции* положено уравнение материального баланса (по извлекаемому веществу):

$$m a + Q C_k = Q C_n,$$

где  $m$  – количество сорбента, кг;

$Q$  – количество сточных вод, м<sup>3</sup>/ч;

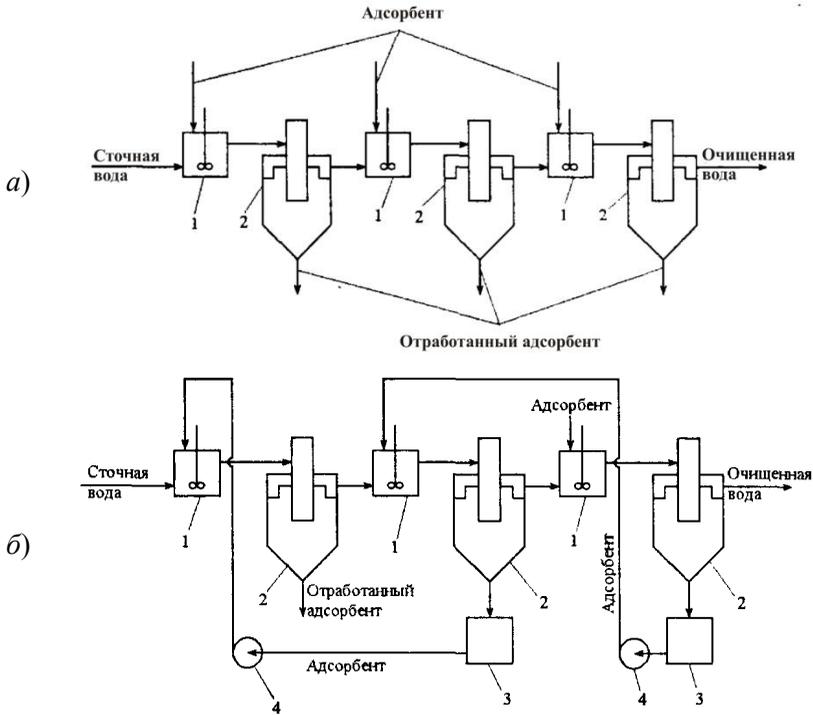
$C_n, C_k$  – соответственно начальная и конечная концентрации примесей сточных вод, кг/м<sup>3</sup>.

Отсюда, учитывая, что  $a = K_{\text{адс}} \cdot C_p$ , получаем:

$$m = \frac{Q(C_n - C_k)}{K_{\text{адс}} C_p}.$$

Конечная концентрация загрязнений в сточной воде после очистки в одну и  $n$  ступеней, учитывая что  $C_p = C_k$ , составит:

$$C_k = \frac{Q C_n}{Q + K_{\text{адс}} m}; \quad C_{nk} = \left( \frac{Q}{Q + K_{\text{адс}} m} \right)^n C_n.$$



а) с последовательным введением сорбента;

б) с противоточным введением сорбента;

1 – смесители; 2 – отстойники; 3 – приемники адсорбента; 4 – насосы

Рисунок 3.17 – Схема адсорбционных установок

Дозу сорбента, вводимого в каждую ступень, можно определить:

$$m_n = Q / K_{\text{адс}} \left( \sqrt[n]{\frac{C_n}{C_{\text{нк}}} - 1} \right),$$

необходимое число ступеней адсорбции равно:

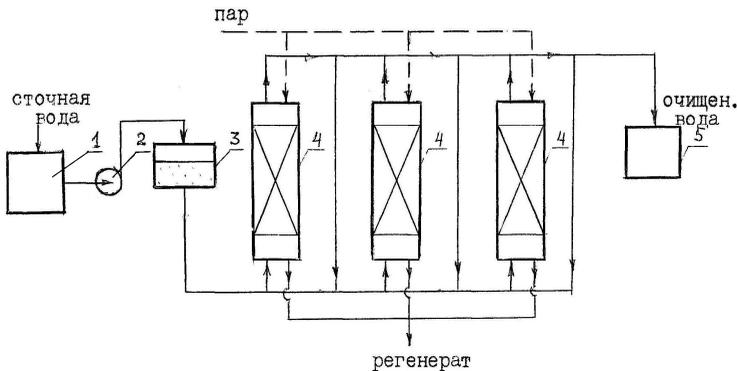
$$n = \frac{\lg C_n - \lg C_{\text{нк}}}{\lg(Q + K_{\text{адс}} m_1) - \lg Q}.$$

Многokратная обработка сточных вод сорбентом позволяет более полно использовать поглощающую способность и тем самым значительно снизить его расход.

### 3.3.3 Динамическая адсорбция

В *динамических условиях* частицы жидкости перемещаются относительно сорбента (фильтры с неподвижным слоем загрузки, аппараты с псевдооживленным или движущимся слоем сорбента).

Наибольшее практическое применение до настоящего времени получили установки *полупериодического действия* (непрерывного по воде и периодического по углю), в которых осуществляется процесс адсорбции в динамических условиях. Вода фильтруется через слой сорбента высотой 1-2 м и крупностью зерен 0,8-5 мм. Скорость фильтрования зависит от концентрации растворенных в воде веществ и составляет 1-12 м/ч. Наиболее рациональное направление фильтрования снизу вверх для равномерного заполнения всего сечения аппарата и вытеснения пузырьков воздуха из пор сорбента. Потери напора составляют до 0,5 м на 1 м слоя загрузки. Слои адсорбента обрабатываются постепенно, в одной колонне процесс ведут до проскока, затем адсорбент выгружают на регенерацию. При *непрерывной организации* процесса используют несколько колонн (рисунок 3.18). По такой схеме две колонны работают последовательно, третья находится на регенерации.



1 – усреднитель; 2 – насос; 3 – механический фильтр; 4 – адсорбционные колонны (фильтры); 5 – емкость очищенной воды

Рисунок 3.18 – Схема непрерывной адсорбционной установки

По мере насыщения адсорбента первый по ходу движения воды адсорбер отключается на регенерацию, а прошедший регенерацию – включается последним по ходу движения воды.

Адсорбция в динамических условиях в *стационарном слое* позволяет более полно использовать емкость сорбента, получить устойчивые, надежные результаты, провести автоматизацию процесса.

При инженерных расчетах адсорбции из водных сред часто используют формулу, предложенную Н.А. Шиловым, для определения продолжительности защитного действия насыпного фильтра  $T_{з.д.}$ :

$$T_{з.д.} = k_{з.д.}H - \tau,$$

где  $k_{з.д.}$  – коэффициент защитного действия, определяемый экспериментально:

$$k_{з.д.} = \frac{\alpha_p}{(v \cdot C_n)};$$

$\alpha_p$  – предельная насыщенность сорбента, равновесная с конечной концентрацией, в динамических условиях:  $a_o = K_o \cdot C_p$ ;

$v$  – скорость фильтрования;

$H$  – высота слоя загрузки;

$a_o$  – емкость в динамических условиях, мг/г;

$\tau$  – потеря времени защитного действия:  $\tau = \varepsilon \Delta t$ ,

здесь  $\varepsilon$  – порозность сорбента (в долях единицы);

$\Delta t$  – время, в течение которого концентрация вещества в фильтрате изменяется от  $C_n$  до равновесной  $C_p$ , определяется по выходной кривой динамики сорбции.

Количество вещества  $M$ , задерживаемого насыпным фильтром:

$$M = (H-h) \cdot S \cdot a_{д.}$$

где  $h$  – эмпирическая константа;

$S$  – площадь фильтра;

$a_{д.}$  – динамическая активность сорбента.

При относительно высоком содержании в сточной воде мелкодиспергированных взвешенных частиц, заливающих сорбенты, а также в случае, если равновесие устанавливается медленно, рационально применять процесс с *псевдооживленным* слоем сорбента. Псевдооживление наступает при повышении скорости потока сточной воды, проходящей снизу вверх, до такой величины, при которой зерна расширившегося слоя начинают интенсивно и беспорядочно перемещаться в его объеме, сохраняющего постоянную для данной скорости высоту. При размерах частиц активированного угля 0,25-1 мм, скорость потока воды составляет 10-20 м/ч, при крупности зерен 1-2,5 мм – 30-40 м/ч.

Гидравлическое сопротивление в кипящем слое, по сравнению с неподвижным, меньше, а скорость массообмена выше в результате использования более мелких частиц адсорбента. Однако в кипящем слое уменьшается адсорбционная емкость и коэффициент защитного действия из-за интенсивного перемешивания частиц по высоте слоя, велик унос сорбента, сложнее конструкция адсорберов.

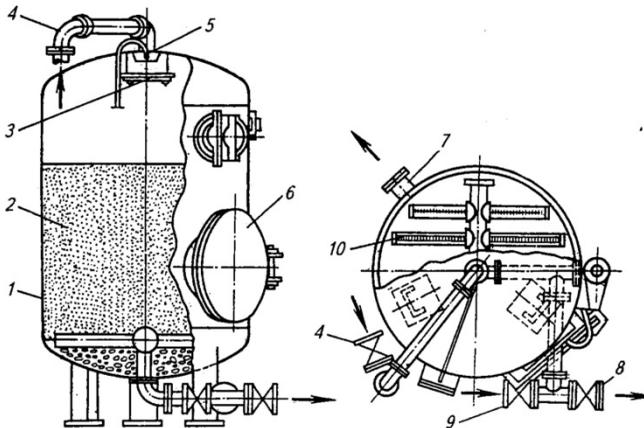
Если из колонны с неподвижным слоем сорбента отводить отработанный, или так называемый, «мертвый» слой и одновременно вводить в нее такое же количество свежего сорбента, то колонна будет работать непрерывно. В таких установках с *движущимся* слоем адсорбента процесс адсорбции и регенерации идет непрерывно, что позволяет значительно интенсифицировать процесс очистки.

### 3.3.4 Адсорбционные аппараты и схемы адсорбционных установок

В промышленности процесс адсорбции осуществляют по периодической, полупериодической и непрерывной технологическим схемам. Периодический процесс применяется при небольших производительностях.

Чаще всего в практике водоочистки используются аппараты с *неподвижным слоем* поглотителя полупериодического действия (непрерывного по воде и периодического по углю), работающие в динамических условиях.

В качестве адсорберов применяют конструкции *безнапорных открытых* и *напорных фильтров* с загрузкой в виде плотного слоя гранулированного угля высотой до 2,5-2,7 м. Различают горизонтальные и вертикальные фильтры, последние могут быть кольцевыми. Вода в таких аппаратах может двигаться как сверху вниз, так и снизу вверх, заполняя все сечение. Диаметры сорбционных фильтров от 1,0 м до 3,4 м, высота принимается конструктивно. Условием применимости таких аппаратов является практически полное отсутствие взвесей в очищаемой воде, не более 5 мг/л, во избежание забивки пор адсорбента. Используются они при регенеративной очистке локальных сточных вод с целью утилизации выделенных веществ. В них осуществляется собственно адсорбция, десорбция (чаще всего водяным паром) и охлаждение. Насыпной сорбционный фильтр приведен на рисунке 3.19.



1 – корпус; 2 – неподвижный слой активированного угля; 3 – отбойник;  
4 – трубопровод подачи очищаемой сточной воды; 5 – труба сброса воздуха;  
6 – люк; 7 – трубопровод для загрузки активированного угля; 8 – трубопровод отвода очищенной воды; 9 – трубопровод подачи взрыхляющей воды;  
10 – распределительная система труб

Рисунок 3.19 – Сорбционный вертикальный параллельно-проточный фильтр

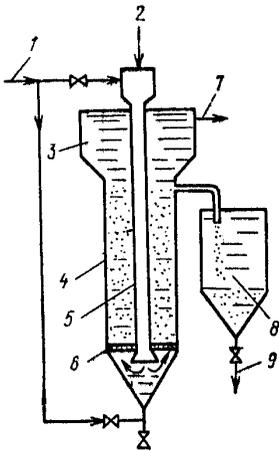
Вода подается в адсорбер по трубопроводу 4 и движется через слой загрузки 2 вниз. Очищенная вода собирается распределительной системой труб 10 и отводится из аппарата через трубопровод 8. Перед регенерацией адсорбента через трубопровод 9 снизу через распределительную систему подается взрыхляющая вода. При регенерации водяным паром он движется сверху вниз, конденсат с извлеченными примесями выводится снизу.

В установках с *движущимся слоем* адсорбента снизу вверх идет очищаемая вода, сверху вниз под действием силы тяжести – адсорбент. При этом колонна делится на несколько зон: адсорбционную, ректификационную, десорбционную. В адсорбционной зоне сточная вода взаимодействует со слоем активного угля, при этом поглощаемые компоненты извлекаются, а очищенная вода отводится из установки. В ректификационной и десорбционной зонах происходит, соответственно, выделение поглощенных компонентов и регенерация адсорбента.

Отработанный сорбент из адсорбера с движущимся слоем можно отводить на регенерацию в другой аппарат. При этом упрощается конструкция самого адсорбера.

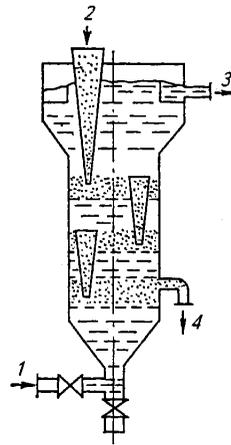
Установки с *псевдооживленным слоем* могут быть периодического и непрерывного действия. В промышленности обычно применяются непрерывно действующие многокамерные адсорберы. Кипящий слой не заливается взвешенными веществами, имеет меньшее гидравлическое сопротивление по сравнению с неподвижным слоем, а скорость массообмена выше в результате использования менее крупных частиц активного угля.

Показателем работы адсорберов с псевдооживленным слоем является относительное расширение слоя  $H/H_0$  ( $H$  – высота псевдооживленного,  $H_0$  – высота неподвижного слоя). Оптимальное значение  $H/H_0=1,4-1,6$ , что регулируется скоростью подачи воды.



а) цилиндрический одноярусный

1 – подача сточной воды; 2 – подача сорбента; 3 – царга; 4 – цилиндрическая колонна; 5 – центральная труба с диффузором; 6 – распределительная решетка; 7 – выпуск обработанной сточной воды; 8 – сгуститель сорбента; 9 – выпуск отработанного сорбента



б) многоступенчатый

1 – подача воды на очистку; 2 – ввод суспензии сорбента; 3 – вывод очищенной воды; 4 – выгрузка суспензии сорбента для уплотнения и регенерации

Рисунок 3.20 – Схемы адсорберов со взвешенным слоем сорбента

Простейший однокамерный адсорбер (рисунок 3.20, а) представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат 4, в котором жидкость 1 движется снизу вверх, поддерживая слой адсорбента во взвешенном состоянии. Очищенная вода удаляется через циклонное устройство 3, служащее для выделения из жидкости захваченных ею мелких частиц адсорбента.

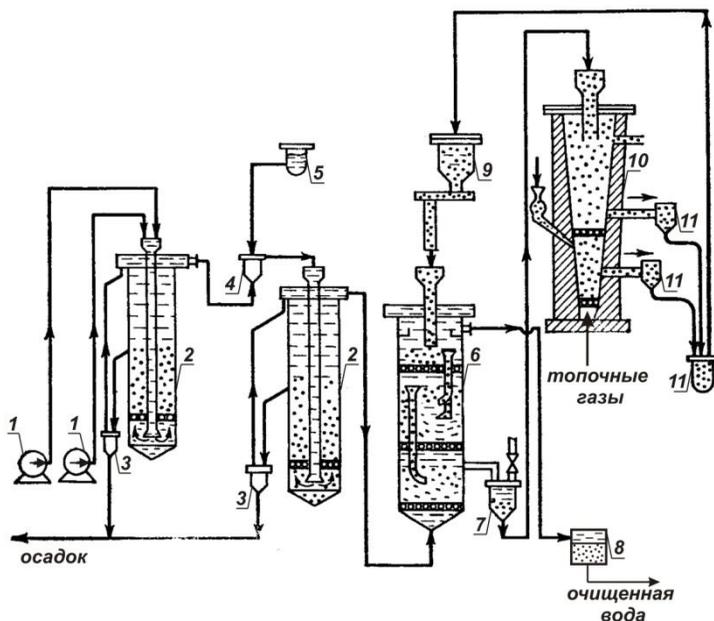
Взвешенный слой отводится в сгуститель сорбента 8 для уплотнения.

Трехъярусный адсорбер (рисунок 3.20, б) имеет 3 тарелки (яруса) с коническими переливными трубками. Псевдооживленный слой находится на уровне широкой части трубок, узкий конец которых погружен в псевдооживленный слой, расположенный на нижележащей тарелке. Избыток угля с вышележащего яруса по переточным трубкам перетекает на нижележащий.

Активированный уголь подается в адсорбера в виде (15-20) % суспензии с водой, в одноярусном адсорбере под решетку, в многоступенчатом – на верхний ярус. Оптимальное число секций – три-четыре.

Отработанный уголь отводится на регенерацию, которая осуществляется в отдельном аппарате.

На рисунке 3.21 приведена непрерывно действующая схема адсорбционной установки с аппаратами кипящего слоя.



- 1 – насосы дозирования кислых и щелочных стоков; 2 – осветлители со слоем взвешенного осадка; 3 – осадкоуплотнители; 4 – смеситель; 5 – бак известкового молока; 6 – многоярусный противоточный адсорбер; 7 – углеуплотнитель; 8 – механический фильтр; 9 – дозатор активного угля; 10 – печь регенерации и активации угля в псевдооживленном слое; 11 – сборники регенерированного и активированного угля

Рисунок 3.21 – Схема очистки сточных вод анилино-красочного производства адсорбцией

Кислые и щелочные сточные воды насосами 1 последовательно подаются на два осветлителя со слоем взвешенного осадка 2. Во второй по ходу движения воды осветлитель через смеситель 4 из бака 5 подается известковое молоко в качестве коагулянта. Осадок собирается в осадкоуплотнителях 3 и отводится на утилизацию.

Осветленная вода направляется в нижнюю часть многоярусного противоточного адсорбера 6, в верхнюю часть которого дозатором 9 подается активированный уголь. Очищенная вода отводится с верхнего яруса через фильтр 8, который улавливает мелкие частицы унесенного активированного угля. Угольный слой собирается с нижнего яру-

са в углеуплотнителе 7 и направляется на регенерацию в печь 10. Верхняя часть печи предназначена для регенерации отработанного угля, нижняя для активации свежего угля с целью восполнения потерь активированного угля в результате уноса. Регенерированный и активированный уголь собирается в сборниках 11 и через дозатор 9 возвращается в адсорбер 6.

### 3.3.5 Методы регенерации адсорбентов

*Регенерация* адсорбента (активного угля) является важнейшей стадией адсорбционной очистки. Цель регенерации – с одной стороны, десорбция адсорбированных из воды примесей или деструктивное их разрушение и, с другой стороны, восстановление адсорбционной способности активного угля. Применяют *деструктивные* и *регенеративные* методы регенерации. К первым относятся термические, химические и биохимические окислительные процессы, ко вторым – десорбция насыщенным или перегретым водяным паром, нагретым инертным газом (воздухом), экстракция органическими растворителями.

Выбор того или иного способа регенерации зависит от конкретных условий и оказывает влияние на стоимость адсорбционной очистки. Часто указанные способы комбинируются друг с другом.

Из *регенеративных методов* чаще всего для *десорбции* активных углей применяют *насыщенный* или *перегретый водяной пар* с температурой (200-300) °С при избыточном давлении 0,3-0,6 МПа, так, например, регенерируются легколетучие органические вещества. Расход пара – 2,5-3 кг на 1 кг отгоняемого вещества, для высококипящих – в 5-10 раз больше. После десорбции пары конденсируются и вещество извлекается из конденсата, объем которого составляет (5-7,5) % от объема сточных вод.

При использовании *воздуха* его температура не превышает (120-140) °С, *инертных* или *дымовых газов* (300-500) °С. Их пропускают через насыщенный летучими соединениями активный уголь с последующим резким охлаждением газов в теплообменнике. Сконденсированный продукт направляют на утилизацию, а десорбирующий газ вновь используют для очистки активированного угля.

При *экстракции органическими растворителями* могут быть использованы легкоперегоняющиеся с водяным паром органические растворители (жидкофазная десорбция экстракцией) – бензол, толуол, бутилацетат, дихлорэтан, метиловый спирт и др. Процесс десорбции осуществляют при нагревании или на холоде, по окончании десорбции растворитель отгоняют из сорбента острым водяным паром или другим теплоносителем.

При *деструктивной регенерации* обычно применяют термические или окислительные методы.

*Термическое прокаливание* отработанных активных углей осуществляют при температуре от 500 °С до 1000 °С без доступа воздуха в специальных печах. При *термической регенерации перегретым водяным паром* процесс ведут при температуре (700-800) °С в бескислородной среде. Применение термических методов связано с потерей от (5-10) % до (15-20) % адсорбента.

В большинстве случаев термическую регенерацию отработанного активированного угля рационально совместить на одной установке с активацией угля-сырца для пополнения потерь адсорбента в производственном цикле. Печь для совмещенной активации и регенерации угля приведена на рисунке 3.22.

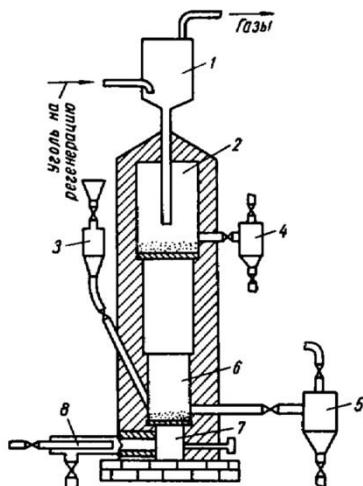
Шахтная печь состоит из трех ярусов, разделенных дырчатыми беспровальными сводами из жаропрочного бетона или шамотного кирпича. Нижний ярус представляет собой топочное пространство 7, в котором смешиваются продукты сжигания газа, не содержащие кислорода, с водяным паром. Эта смесь поступает в камеру активации 6, куда периодически из камеры 3 подается уголь-сырец. Активация идет в псевдооживленном слое в течение 3-4 ч.

Активирующая парогазовая смесь с температурой около 800 °С поступает в камеру верхнего яруса 2, куда подается отработанный активированный уголь. Регенерация происходит в псевдооживленном слое в течение 20-30 минут. Свежий регенерированный и активированный уголь направляется в приемники 4, 5 и после охлаждения вновь подается на адсорбцию.

В некоторых случаях перед регенерацией адсорбированное вещество путем *химического превращения* переводят в другое соединение, которое легче извлекается из адсорбента. Если адсорбированные вещества не представляют ценности, его разрушают химическими реагентами-окислителями (хлор, озон и др.).

Для десорбции слабых органических электролитов химической регенерацией их переводят в диссоциированную форму. При этом ионы переходят в раствор, заключенный в порах угля, откуда они вымываются горячей водой или раствором кислот (для удаления органических оснований) или раствором щелочей (для удаления кислот).

При *биологической регенерации* адсорбент загружают в рециркулируемую суспензию активного ила, которую непрерывно аэрируют. При этом происходит биохимическое окисление адсорбированных веществ. Биологическая регенерация позволяет продлить срок использования сорбента в десятки раз.



1 – загрузочный бункер камеры регенерации; 2 – камера регенерации;  
 3 – загрузочный бункер камеры активации; 4 – приемник регенерированного  
 угля; 5 – приемник свежего активированного угля; 6 – камера активации;  
 7 – напорная топка; 8 – горелка

Рисунок 3.22 – Печь для совмещенной активации и регенерации угля  
 в псевдооживленном слое

Целесообразность применения того или иного метода регенерации адсорбента определяется технико-экономическими параметрами процесса.

### Контрольные вопросы

1. Извлечение примесей из воды адсорбцией
2. Физико-химические основы процесса адсорбции
3. Сорбенты, искусственные и природные, их характеристика
4. Статическая и динамическая активность сорбента
5. Изотермы адсорбции в статических и динамических условиях
6. Стадии адсорбции
7. Статическая адсорбция, ее варианты
8. Материальный баланс статической адсорбции
9. Динамическая адсорбция, условия ее проведения
10. Время защитного действия фильтра
11. Принцип организации работы непрерывной адсорбционной установки
12. Конструкции адсорбционных аппаратов
13. Схема очистки сточных вод анилинокрасочного производства адсорбцией
14. Методы регенерации адсорбентов

## 3.4 Ионный обмен

### 3.4.1 Физико-химические основы процесса

*Ионный обмен* применяют для глубокой очистки вод от ионов цветных и тяжелых металлов, корректировки минерального состава очищенных сточных вод, умягчения и снижения общего содержания природных вод, удаления ряда органических (фенолов, кислот, ароматических и алифатических аминов, ПАВ и др.) и неорганических (цианидов, мышьяка), радиоактивных веществ. Ионный обмен широко распространен при обессоливании в процессе водоподготовки.

Метод позволяет извлекать и утилизировать ценные вещества и очищать сточную воду до предельно допустимых концентраций с последующим ее использованием в технологических процессах или в системах оборотного водоснабжения. Сточные воды, подаваемые на установку, не должны содержать свыше 3 г/л солей и 8 мг/л взвешенных веществ и ХПК.

Ионный обмен представляет собой процесс взаимодействия раствора с твердым веществом – *ионитом*, обладающим способностью обменивать ионы, содержащиеся в нем, на ионы, присутствующие в растворе. Иониты, обладающие кислотными свойствами (катиониты), способны поглощать из растворов электролитов положительные ионы, а щелочными свойствами (аниониты) – отрицательные ионы. Если иониты обменивают катионы и анионы, их называют амфотерными.

Важнейшим свойством ионитов является их поглотительная способность или *ионообменная емкость*, которая определяется числом эквивалентов ионов, поглощаемых единицей массы или объема ионита. Различают полную, статическую и динамическую обменные емкости. *Полная обменная емкость* – это количество вещества, поглощенного до полного насыщения ионита; *статическая (равновесная) емкость* – количество вещества, поглощенное при равновесии в данных рабочих условиях; *динамическая (рабочая)* – емкость ионита до «проскока» ионов в фильтрат, определяемая в условиях фильтрации. Динамическая емкость меньше статической, последняя меньше полной.

Иониты подразделяются на минеральные и органические, искусственные (синтетические) и природные. К *неорганическим* природным ионитам относятся цеолиты, глинистые минералы, полевые шпаты и др. Катионообменные свойства их обусловлены содержанием алюмосиликатов типа  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . К неорганическим синтетическим ионитам относятся силикагели, пермутиты, труднорастворимые оксиды и гидроксиды некоторых металлов (алюминия, хрома, циркония и др.). Катионообменные свойства силикагеля и пермутитов обусловлены обменом ионов водорода гидроксидных групп на катионы металлов, проявляющиеся в щелочной среде.

*Органические природные иониты* – это гуминовые кислоты почв и углей, обладающие слабокислотными свойствами, для усиления обменной емкости которых их измельчают и сульфатируют в избытке олеума. Образующиеся при этом сульфогли являются дешевыми полиэлектролитами, содержащими сильно- и слабокислотные группы. Сульфогли можно получать также обработкой целлюлозы и лигнина.

Однако ведущая роль принадлежит органическим искусственным ионитам – *ионообменным смолам*. Они представляют собой высокомолекулярные соединения, углеводородные радикалы которых образуют пространственную сетку (каркас) с фиксированными на ней ионообменными функциональными группами. Каркас называется матрицей, обменивающиеся ионы – противоионами. Каждый противоион соединен с противоположно заряженными ионами, называемыми фиксированными или анкерными. Матрицу в общем виде обозначают R, активную группу указывают полностью. Например, сульфокатиониты записывают как  $RSO_3H$ , где R – матрица, H – противоион,  $SO_3$  – анкерный (фиксированный) ион.

Иониты получают методом сополимеризации или сополиконденсации с последующим сшиванием образующихся цепей. В конденсационных ионитах сшивание происходит путем образования полимерных связей за счет метиленовых ( $-CH_2-$ ) или метиновых ( $=CH-$ ) мостиков, а также азотсодержащих группировок. В полимеризационных сшивании идет при помощи п-дивинилбензола и его изомеров.

Иониты выпускают в виде порошков (размер частиц 0,04–0,07 мм), зерен (0,3–2,0 мм), волокнистого материала, листов и плиток. Крупнозернистые иониты предназначены для фильтров с высотой слоя 1–3 м, порошкообразные – 3–10 мм. Истирание ионитов приводит к росту сопротивления фильтрующей загрузки, поэтому они должны быть механически, химически и термически стойкими.

В зависимости от *степени диссоциации* различают следующие *виды ионитов*:

1) *сильнокислотные катиониты*, содержащие сульфогруппы  $SO_3H$  или фосфорнокислые группы  $PO(OH)_2$ , например, катионит КУ-2;

2) *сильноосновные аниониты*, содержащие четвертичные аммониевые основания  $R_3NOH$  (анионит АВ-17);

3) *слабокислотные катиониты*, содержащие карбоксильные  $COOH$  и фенольные группы  $C_6H_5OH$ , диссоциирующие при  $pH > 7$ , например, катиониты КБ-2, КБ-4;

4) *слабоосновные аниониты*, включают аминогруппы различной степени замещения ( $-NH_2$ ,  $=NH$ ,  $\equiv N$ ) (аниониты АН-23, АН-2Ф);

5) *иониты смешанного типа* (полифункциональные), проявляющие свойства смеси сильных и слабых кислот и оснований; так катионит КУ-1 содержит сульфогруппу и фенольную группу;

б) иониты с изменяющейся обменной емкостью в широком интервале рН (амфотерные), они ведут себя как смеси кислот и оснований различной силы.

Особую группу представляют окислительно-восстановительные полимеры (редокситы), способные к окислительно-восстановительным реакциям.

Катиониты в качестве противоионов могут содержать ионы водорода или металлов, аниониты могут находиться в гидроксильной или солевой форме, т. е. содержать ионы тех или иных кислот.

Наиболее известными в отечественной практике катионитами являются сульфогли марок СМ и СК, катиониты КУ-1, КУ-2-8, КБ-2, КБ-4, КФ; анионитами – АН-1, АН-2ФН, АН-18-8, АВ-17-8, АВ-16 ГС и др. Катиониты обозначаются буквой К, аниониты – А. Последующие буквы определяют либо свойство, либо основу матрицы: АВ – высокоосновный анионит, АН – низкоосновный анионит, КУ – катионит универсальный, КФ – катионит фосфорнокислый, КБ – слабокислые катиониты Кемеровского завода «Карболит».

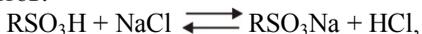
Характерной особенностью ионитов является их обратимость, т. е. возможность проведения реакций в прямом и обратном направлениях, что лежит в основе их регенерации.

Процесс переноса вещества при ионном обмене может быть представлен в соответствии с моделью пограничного диффузионного слоя в несколько стадий: диффузия ионов из раствора через пограничную пленку жидкости к поверхности ионита, диффузия ионов внутрь зерна ионита, химическая реакция обмена ионов, диффузия вытесненных противоионов из объема зерна к его поверхности, диффузия противоионов от поверхности ионита в раствор.

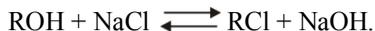
Скорость ионного обмена определяется самой медленной из этих стадий – диффузией через пленку жидкости или внутри зерна ионита. Химическая реакция ионного обмена протекает быстро и не определяет суммарную скорость процесса.

Реакции ионного обмена проходят вследствие разности химических потенциалов обменивающихся ионов и могут быть представлены следующим образом:

для катионитов:



анионитов:



Слабоосновные аниониты обменивают анионы сильных кислот и не способны к обмену анионов слабых минеральных кислот. Сильноосновные аниониты обменивают анионы слабых кислот только при отсутствии в воде сильных кислот и их солей. Учитывая более высокую их стоимость, их следует применять преимущественно для извле-

чения анионов слабых кислот. Полное обессоливание воды возможно при последовательном фильтровании ее через *три ступени фильтров*.

I ступень – *H-катионирование*, при котором из воды удаляются катионы всех металлов; вода при этом обогащается минеральными кислотами.

II ступень – *ОН-анионирование на слабоосновном анионите*, при этом из воды удаляются анионы сильных кислот, а вода нейтрализуется.

III ступень – *ОН-анионирование на сильноосновном анионите* для обмена анионов слабых кислот.

Процесс *регенерации* ионитов состоит из *трех стадий*: взрыхления ионита, собственно регенерации и отмывки ионита от продуктов регенерации и избытка регенерирующего вещества. Объем промывных вод обычно составляет от 75 % до 100 % объема регенерационных растворов.

*Регенерация катионита* осуществляется промывкой его (2-8) % растворами сильных кислот – соляной, азотной, серной (H-форма) или концентрированными растворами натриевых солей (Na-форма).

*Регенерация слабоосновных анионитов* осуществляется (2-6) % водными растворами NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> или (5-10) % раствором NH<sub>4</sub>OH. *Регенерацию сильноосновных анионитов* проводят (6-8) % раствором NaOH. После регенерации ионитов осуществляют их отмывку обессоленной водой.

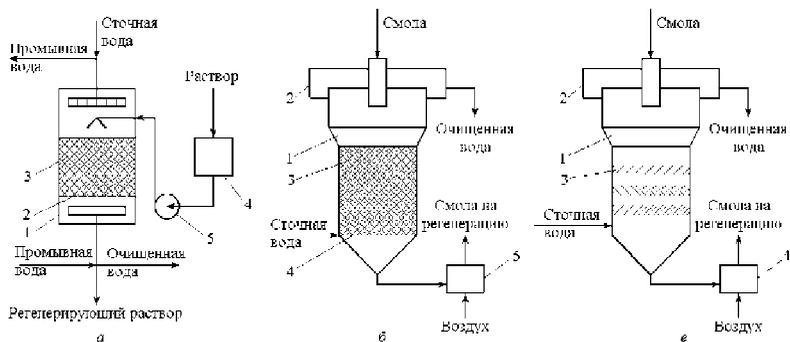
Иониты в контакте с водой не растворяются, но поглощая некоторое количество воды, набухают, увеличивая свой объем в 1,5-3 раза. Набухаемость влияет на полноту и скорость обмена ионов, а также на селективность ионита.

Установлены *ряды ионов* по энергии их вытеснения из сильно- и слабокислотных катионитов. Например, для сильнокислотного сульфокатионита КУ-2 получен следующий ряд:  $H^+ < Na^+ < NH_4^+ < Mg^{2+} < Zn^{2+} < Co^{2+} < Cu^{2+} < Cd^{2+} < Ni^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} < Pb^{2+} < Ba^{2+}$ . Для слабокислотного катионита КБ-4:  $Mg^{2+} < Ca^{2+} < Ni^{2+} < Co^{2+} < Cu^{2+}$ . Для большинства анионитов характерен следующий ряд:  $SO_3^{2-} < NO_3^- < Cl^-$ .

### 3.4.2 Установки ионного обмена

Процессы ионообменной очистки загрязненных вод, включающие чередующиеся стадии извлечения примесей и регенерации ионитов, осуществляются в аппаратах периодического (фильтрах) или непрерывного действия.

*Фильтр периодического действия* представляет собой закрытый цилиндрический резервуар с расположенным у дна щелевым дренажным устройством, служащим для равномерного отведения воды по всему сечению фильтра (рисунок 3.23 а).



*а* – периодического действия:

1 – корпус; 2 – решетка; 3 – слой ионита;

4 – бак с регенерирующим раствором; 5 – насос;

*б* – с движущимся слоем ионита:

1 – корпус; 2 – разделительная зона; 3 – слой смолы; 4 – тарелка; 5 – эрлифт;

*в* – с псевдооживленным слоем ионита:

1 – корпус; 2 – разделительная зона; 3 – тарелки; 4 – эрлифт

Рисунок 3.23 – Схемы ионообменных установок

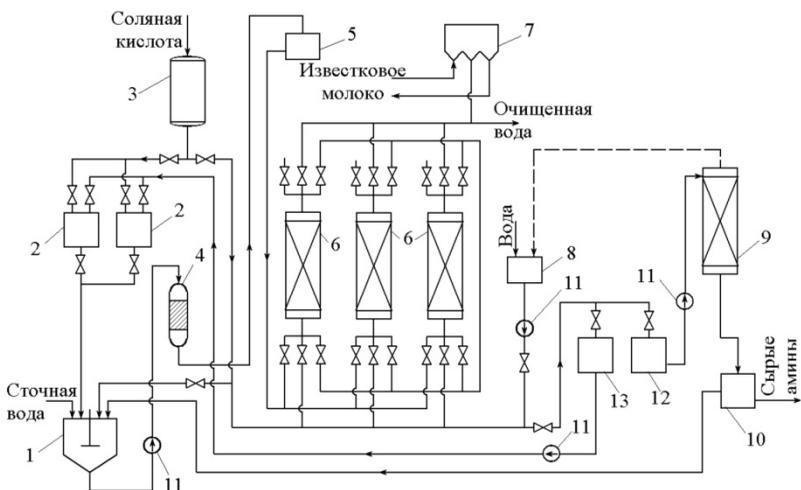
Высота слоя загрузки ионита 1,5-3,0 м. Сточная вода может подаваться сверху или снизу, а регенерирующий раствор сверху. Если подача очищаемой воды и регенерирующего раствора осуществляется сверху, то фильтр называется параллельноточным, когда вода поступает снизу, а регенерирующий раствор сверху – противоточным. Скорость фильтрования составляет от 8 до 25 м/ч в зависимости от содержания ионов в очищаемой воде.

На продолжительность фильтроцикла большое влияние оказывает наличие взвешенных веществ, поэтому перед подачей воды на установку следует обеспечить их максимальное удаление.

При очистке сточных вод, загрязненных взвешенными веществами, применяют ионообменные колонны с псевдооживленным слоем ионита, в которых процесс осуществляется непрерывно. При этом уменьшаются затраты смолы, реагентов для регенерации, промывной воды, используемое оборудование более компактно (рисунок 3.23, в).

К аппаратам непрерывного действия относятся также колонны с движущимся слоем ионита. Сточная вода в них подается снизу, смола – сверху (рисунок 3.23, б).

На рисунке 3.24 приведена технологическая схема ионообменной очистки сточных вод производства хлоранилина на катионите КУ-2 в водородной форме.



1 – резервуар сточной воды; 2 – мерники HCl; 3 – сборник HCl; 4 – фильтр;  
 5 – напорный бак; 6 – ионообменные колонны; 7 – дозатор известкового молока;  
 8 – мерник регенерационного раствора и отмывочной воды; 9 – ректификационная колонна; 10 – отстойник-разделитель; 11 – насосы; 12 – приемник регенерационного раствора; 13 – емкость отработанной HCl

Рисунок 3.24 – Схема ионообменной очистки сточных вод производства хлоранилина

Подкисленная из сборника соляной кислоты 3 через мерники 2 сточная вода из резервуара I насосом 11 подается на фильтр 4, где из нее выделяются выпавшие при подкислении примеси. Фильтрат через напорный бак 5 поступает в блок последовательно расположенных ионообменных колонн 6 снизу вверх. Обычно две колонны работают в режиме ионного обмена, а одна регенерируется. Очищенная вода имеет слабокислую реакцию и должна перед сбросом нейтрализоваться известковым молоком, которое подается из дозатора 7.

Регенерационный аммиачно-метанольный раствор из мерника 8 подается в регенерируемую колонну снизу вверх, через тот же мерник поступает подогретая до (35-40) °С вода для промывки отрегенированной колонны.

Отработанный регенерационный раствор выпускается из колонны 6 в приемник 12, откуда подается в ректификационную колонну 9 для отгонки метанола и аммиака. Дистиллат представляет собой аммиачно-метанольный раствор, возвращаемый на регенерацию катионита. Кубовый продукт направляется в отстойник-разделитель фаз 10; водный слой возвращается в резервуар сточной воды 1, а слой сырых аминов идет на разгонку и утилизацию.

После регенерации водно-метанольным раствором аммиака катионит для перевода в водородную форму промывают (8-10) % раствором соляной кислоты, поступающей из емкости 3. Кислота, вытекающая из колонны, собирается в емкость 13 и оттуда подается в мерники 2 для регулирования рН сточной воды.

### Контрольные вопросы

1. Применение ионного обмена в водоочистке
2. Физико-химические основы ионного обмена
3. Полная, статическая и динамическая обменные емкости
4. Минеральные и органические, природные и синтетические иониты
5. Виды ионитов по степени диссоциации
6. Характеристика катионитов и анионитов
7. Стадии процесса ионного обмена
8. Реакции ионного обмена
9. Ступени ионного обмена
10. Регенерация ионитов
11. Аппараты для проведения ионного обмена
12. Схема ионообменной очистки сточных вод производства хлоранилина

## 3.5 Экстракция

### 3.5.1 Физико-химические основы процесса

*Жидкостная экстракция* применяется для очистки производственных сточных вод, содержащих фенолы, масла, органические кислоты, анилин, ионы металлов и др., при относительно высоком их содержании, что позволяет компенсировать затраты на извлечение. Для большинства продуктов применение экстракции целесообразно при концентрации их выше 3-4 г/л, при меньшей – экономически более выгодна адсорбция.

Наиболее широко методы экстракции используются для очистки сточных вод предприятий химической промышленности, по термической переработке твердых топлив (каменного и бурых углей, сланцев, торфа), содержащих значительное количество фенолов, эффективность извлечения которых достигает (92-98) %.

Экстракционный метод основан на распределении загрязняющего вещества между взаимонерастворимыми жидкостями соответственно его растворимости в них. Извлеченное вещество распределяется между водой и добавленным растворителем согласно *закону равновесного распределения*:

$$K_p = C_p / C_w,$$

где  $C_s$  и  $C_e$  – концентрации извлекаемого вещества соответственно в экстрагенте и в воде при установившемся равновесии.

Коэффициент распределения  $K_p$  характеризует динамическое равновесие при экстракции и зависит от природы компонентов системы, наличия примесей в воде и экстрагенте, температуры и устанавливается опытным путем.

При достижении равновесия концентрация экстрагируемого вещества в экстракте значительно выше, чем в сточной воде (рафинате). Сконцентрированное в экстракте вещество отделяется от растворителя и может быть утилизировано. Экстрагент после этого возвращается в технологический процесс очистки. Так как совершенно нерастворимых в воде экстрагентов нет, то часть их растворяется в воде, становится новым ее загрязнителем, который необходимо удалять с целью очистки воды и сокращения потерь экстрагента.

В ряде случаев процесс экстракции усложняется вследствие химической реакции, протекающей в объеме или на поверхности раздела фаз, в результате чего молекулы растворенного вещества реагируют с компонентами растворителя. Химическая реакция приводит к образованию новых химических соединений, влияет на скорость экстракции. Это, например, имеет место при экстрагировании кислых органических соединений – уксусной и бензойной кислот, фенола из водных растворов.

В качестве *экстрагентов* для извлечения примесей из воды используют различные органические растворители: простые и сложные эфиры (бутил- и изобутилацетаты, диизопропиловый и диэтиловый эфиры), спирты, четыреххлористый углерод, бензол, толуол, хлорбензол. Применяется экстракция смесью растворителей. В качестве экстрагентов экономически выгодно использовать различные технические продукты и отходы производства.

К экстрагенту для очистки сточных вод предъявляются следующие *требования*:

- высокий коэффициент распределения, т. е. способность растворять извлекаемое вещество лучше, чем вода;
- большая селективность, он должен иметь наибольшую растворяющую способность по отношению к извлекаемому компоненту и низкую растворимость в воде;
- значительно отличаться по плотности от плотности воды для обеспечения быстрого и полного разделения фаз;
- иметь большую разницу в температурах кипения с экстрагируемым веществом для лучшего отделения перегонкой или ректификацией;
- не взаимодействовать с экстрагируемым веществом;
- быть безвредным, взрыво- и огнебезопасным;
- не вызывать коррозию материалов аппарата;
- иметь низкую стоимость.

### 3.5.2 Методы экстрагирования

Очистка сточных вод экстракцией состоит из *нескольких стадий*:

- смешение сточной воды с органическим экстрагентом,
- разделение образующихся жидких фаз – экстракта с извлеченным веществом и рафината с примесью экстрагента,
- регенерация экстрагента из экстракта и рафината.

*Методы экстрагирования* по способу контакта экстрагента и сточной воды подразделяются на перекрестноточные (одно- и многократная обработка воды в одном аппарате свежими порциями экстрагента), ступенчато-противоточные (перемешивание воды и экстрагента в ряде аппаратов, работающих по принципу противотока) и непрерывно-противоточные (перемешивание воды и экстрагента в одном аппарате по принципу противотока с последующим разделением). Практическое применение получили два последних метода.

При *многоступенчатой перекрестноточной схеме* процесс происходит в статических условиях, требует большого расхода экстрагента, поэтому неэкономичен и в практике водоочистки не применяется.

При *ступенчато-противоточной экстракции* (рисунок 3.25, а) вода и экстрагент движутся навстречу друг другу, при этом достигается высокая эффективность очистки. Каждая ступень включает смеситель фаз и отстойник для их гравитационного разделения. Экстракт последующей ступени смешивается в смесителе с водной фазой предыдущей ступени. Смеситель должен обеспечить достаточную степень диспергирования экстрагента в воде для создания максимальной поверхности контакта фаз.

Конечная концентрация экстрагируемого вещества в воде может быть определена из уравнения материального баланса (по извлекаемому веществу):

$$C_n Q = C_k Q + C_p W.$$

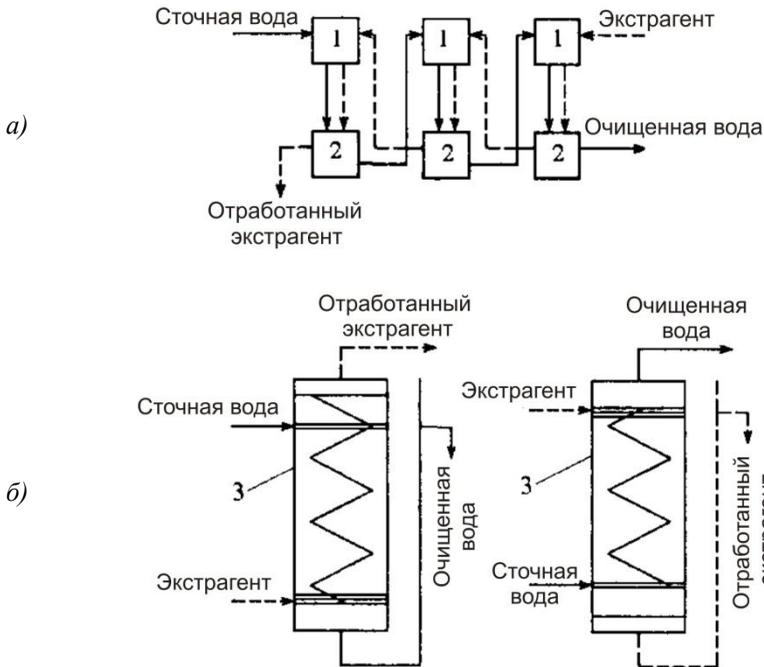
Отсюда, учитывая, что  $K_p = C_p / C_k$  и разделив обе части уравнения на  $Q$ , получим:

$$C_k = C_n / (1 + \epsilon K_p)^n,$$

где  $C_n$ ,  $C_k$  и  $C_p$  соответственно начальная, конечная и равновесная концентрации извлекаемого вещества в воде;

$n$  – число ступеней экстракции;

$\epsilon = W/Q$  – удельный расход экстрагента, равный отношению объема экстрагента  $W$  к объему очищаемой воды  $Q$ .



а – ступенчато-противоточная; б – непрерывно-противоточная  
1 – смеситель; 2 – отстойник; 3 – колонна

Рисунок 3.25 – Схемы экстракции

При *непрерывно-противоточной экстракции* (рисунок 3.25, б) вода и экстрагент движутся навстречу друг другу в одном аппарате (колонне), обеспечивающем диспергирование экстрагента в воде, при этом примеси сточной воды непрерывно переходят в экстрагент, а разделение фаз осуществляется на входе и выходе из аппарата. Если плотность обрабатываемой сточной воды больше плотности экстрагента  $\rho_{ст} > \rho_э$ , то вода (тяжелая фаза) вводится в экстракционную колонну сверху, а экстрагент (легкая фаза) – снизу. Очищенная вода отводится из нижней части колонны, насыщенный удаляемым веществом экстракт – из верхней. При  $\rho_{ст} < \rho_э$  экстрагент вводится в верхнюю часть колонны, вода – в нижнюю, отводится экстракт снизу, очищенная вода сверху. Удельный расход экстрагента составит:

$$v = \frac{C_n - C_k}{K_p C_k}$$

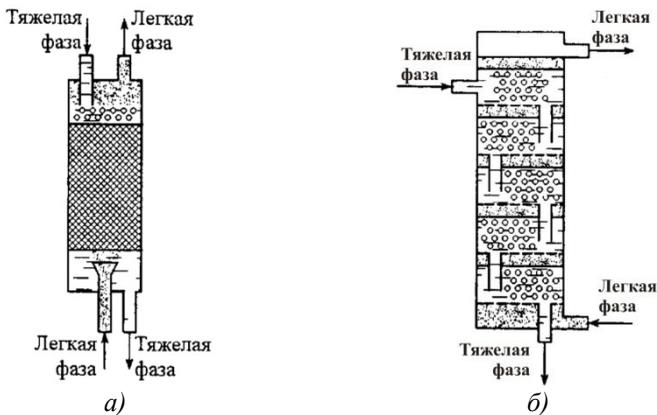
Применение противоточных экстракционных колонн непрерывного действия целесообразно при многоступенчатой экстракции.

### **3.5.3 Технологические схемы и аппаратура для процессов экстракции**

Технологическая схема очистки производственных сточных вод экстракцией зависит от количества и состава сточных вод, свойств экстрагента, способов его регенерации и других факторов и обычно включает четыре установки.

1. *Установки подготовки воды перед экстракцией* (отстойники, флотаторы, фильтры для механической очистки, нейтрализаторы, охлаждающие устройства).

2. *Собственно экстракционные установки*, колонны для улавливания паров экстрагента, сборники экстрагента. Конструкции экстракционных колонн зависят от способа контакта сточной воды и экстрагента. Простейшие колонны без какой-либо насадки (*распылительные, инжекторные*). Сточная вода и экстрагент распределяются по колонне с помощью диспергирующего устройства. Противоточное движение обеспечивается силой тяжести, т. е. различием плотностей фаз. Структура потока приближается к полному перемешиванию, поэтому эффективность распылительных экстракторов не превышает одной-двух теоретических ступеней. Часто применяются насадочные колонны, где в качестве насадки используются блочные конструкции и засыпные элементы из керамики, металла, пластических масс (кольца Рашига, кольца Палля, седла Берля и др.). Для повышения интенсивности и эффективности перемешивания применяют также тарельчатые колонны с перфорированными сетчатыми тарелками. Выбор типа колонны определяется необходимым числом ступеней экстракции и допустимыми затратами энергии. Схемы некоторых типов экстракционных колонн приведены на рисунке 3.26.



*а – насадочная; б – с перфорированными сетчатыми тарелками*

Рисунок 3.26 – Схемы экстракционных колонн без подвода внешней энергии

*Насадочные* и *с перфорированными сетчатыми тарелками* колонны (рисунок 3.26) работают без подвода внешней энергии, прохождение потоков по колонне и их разделение в отстойных зонах происходит под действием гравитационных сил.

Подвод энергии в виде пульсации потоков или с движущимися тарелками позволяет достичь лучшего перемешивания. К экстракторам с подводом внешней энергии относятся колонны с вращающимися элементами, пульсационные и с вибрирующими перфорированными тарелками, а также центробежные экстракторы.

Колонны *с подвижными сетчатыми тарелками* (рисунок 3.27, а) отличаются тем, что в них для смешения жидкостей используют дополнительную энергию внешнего источника. Тарелки укреплены в этой колонне на подвижном штоке, подвешенном в рабочей части экстрактора и укрепленном на коленчатом валу.

При вращении вала шток сообщает тарелкам возвратно-поступательное движение вдоль оси колонны. Контактующие жидкости продавливаются через отверстия тарелок в виде струй, распадающихся на отдельные капли, при этом жидкости интенсивно перемешиваются.

По такому же принципу работают *пульсационные колонны* (рисунок 3.27, б), насадочные или с сетчатыми тарелками, где жидкость получает возвратно-поступательное движение с помощью пневматического или поршневого пульсатора, находящегося вне экстрактора.

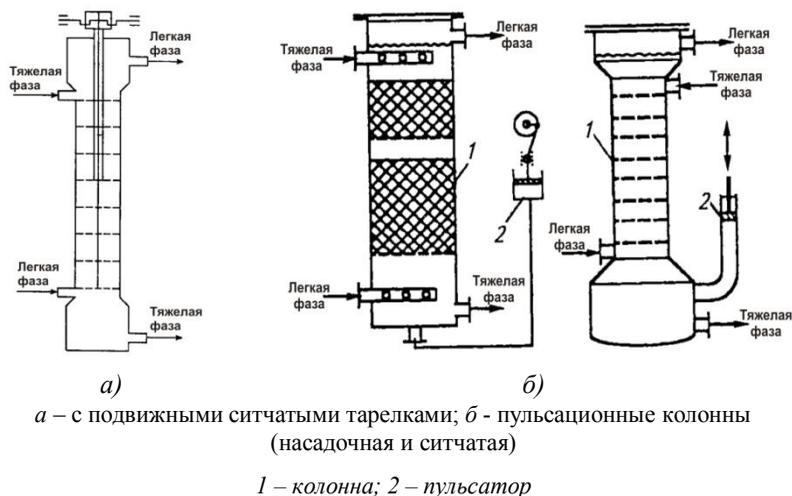


Рисунок 3.27 – Схемы экстракционных колонн с подводом внешней энергии

Высокая скорость экстрагирования достигается в *центробежных экстракторах*, в которых для создания развитой межфазной поверхности жидкости дробятся на капли при движении через отверстия контактных элементов. Тяжелую жидкость вводят в центр ротора через полость, легкую – в периферическую часть его. Разделение жидкостей в центральной и периферической частях ротора ускоряется под влиянием центробежных сил, возникающих при вращении ротора. Тяжелая фаза отводится с периферии ротора, а легкая – вблизи его оси.

3. *Установки регенерации растворителя из очищенной воды.* Растворенный в воде экстрагент обычно регенерируют путем отгонки, которая осуществляется в насадочной колонне. Сверху колонны подают подогретую воду, а снизу – острый пар. Экстрагент обычно выделяется в виде гетероазеотропной смеси с водой, расслаивается и вновь возвращается на экстракцию. Растворители, имеющие высокое давление паров, могут быть регенерированы путем отдувки воздухом или другими газами. Это позволяет снизить расход тепла на подогрев воды, а также уменьшить потери растворителя, вызванные гидролизом при повышенной температуре.

Для легкогидролизуемых растворителей может быть целесообразным применение метода реэкстракции, когда растворитель из воды экстрагируется другим более дешевым растворителем, который затем может быть легко удален из воды методом перегонки.

4. *Установки регенерации растворителя из экстракта.* Они включают теплообменник-подогреватель, одно- или двухступенчатую



Выходящий из верхней части экстрактора 3 обогащенный фенолами фено сольван регенерируется с применением вакуума в дистилляционной колонне 8. Пары фено сольвана, выходящие из этой колонны, конденсируются в конденсаторе 5 и направляются в сборник фено сольвана 9, куда добавляется свежий фено сольван. Фенолы остаются в кубовом остатке и периодически удаляются.

При регенерации фено сольвана из фазы экстракта перед дистилляционной колонной иногда устанавливают обезвоживающую колонну, из которой из обогащенного фенолами фено сольвана отгоняется вода.

### **Контрольные вопросы**

1. Использование экстракции для очистки сточных вод предприятий
2. Закон равновесного распределения
3. Экстрагенты и предъявляемые к ним требования
4. Стадии экстрагирования
5. Методы экстрагирования
6. Схема ступенчато-противоточной экстракции
7. Материальный баланс экстракции
8. Непрерывно-противоточная экстракция
9. Составляющие технологической схемы экстракции
10. Экстракционное оборудование
11. Схема экстракционного обесфеноливания сточных вод коксохимического производства фено сольваном

## **3.6 Мембранные методы**

### **3.6.1 Физико-химические основы процессов**

К мембранным методам разделения, с помощью которых можно проводить очистку воды от различных видов загрязнений, относятся:

- макрофльтрация (МАК);
- микрофльтрация (МФ);
- ультрафльтрация (УФ);
- нанофльтрация (НФ);
- обратный осмос (ОО).

*Макрофльтрация*, по существу механическая фильтрация, служит для удаления видимых твердых частиц размером 1-100 мкм, осуществляется на металлических и полимерных сетках с регенерацией обратным током очищенной воды.

*Микрофльтрация* задерживает мелкие взвеси, коллоидные частицы и микроорганизмы (бактерии) размером 0,1-1,0 мкм, которые определяют мутность или опалесценцию раствора, при рабочем давлении, не превышающем 0,02-0,3 МПа.

*Ультрафльтрация* предназначена для задержания частиц размером на порядок меньше (0,01-0,1 мкм), чем при МФ; к ним относятся протеины, коллоиды; при этом из воды выделяются крупные органические молекулы с молекулярной массой свыше 1000, а микробиологическое загрязнение воды снижается на 4-6 порядков.

*Нанофльтрация* эффективно задерживает примеси размером 0,001-0,01 мкм, органику с молекулярной массой от 300 до 500, все вирусы, при рабочем давлении от 0,3 до 2,0 МПа. НФ получила название от нанометра (н), равного  $10^{-9}$  м или 0,001 мкм.

*Обратный осмос* удаляет растворенные соли от 0,0001 до 0,001 мкм, органику с молекулярной массой до 300 при рабочем давлении до 15 МПа.

Перечисленные процессы носят название – *баромембранные*.

Достоинствами методов являются:

- отсутствие фазовых переходов;
- проведение процессов при нормальной температуре;
- простота конструкции аппаратов;
- возможность рекуперации ценных продуктов.

К недостаткам можно отнести повышенное давление в системе, явление концентрационной поляризации.

Несмотря на различия, все процессы мембранного разделения характеризуются наличием специального селективно проницаемого барьера (мембраны) между двумя фазами (рисунок 3.29).

В простейшем представлении мембранами происходит задержание частиц с размерами большими, чем размеры пор, в то время как фильтрат (пермеат), содержащий частицы растворителя и примесей меньшего размера, способен проходить через поры.

*Движущей силой* баромембранных процессов разделения является разность рабочего (избыточного) давления над исходным раствором Р и осмотического давления раствора, точнее разности осмотического давления раствора у поверхности мембраны и в фильтрате  $\Delta\pi$ :

$$\Delta P = P - \Delta\pi.$$

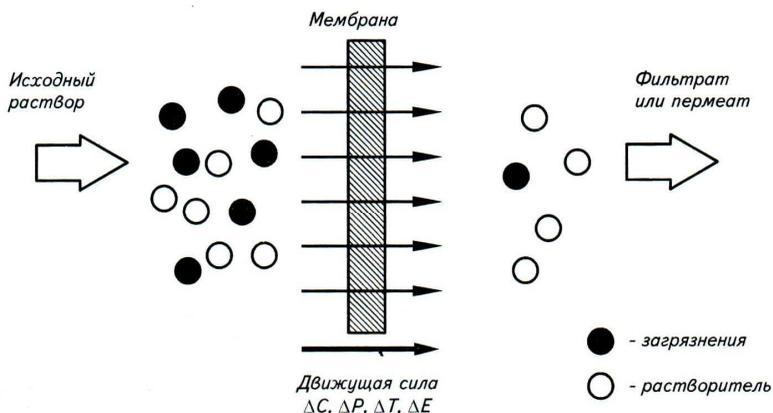


Рисунок 3.29 – Схема типичного мембранного процесса

В результате проведения этих процессов получают два раствора: один (концентрат) обогащен растворенными веществами, другой (фильтрат) представляет собой воду с небольшим количеством прошедших через мембрану примесей.

При реализации технологий мембранного разделения используют три основных приема организации процесса: 1) фронтальное, или тупиковое фильтрование, 2) то же с регенерацией обратным током фильтрата, 3) фильтрование из тангенциального потока.

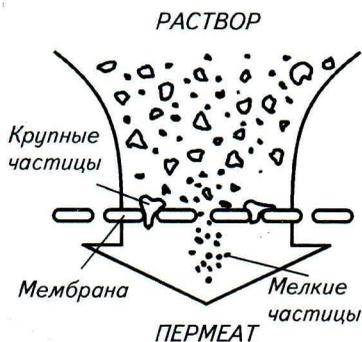


Рисунок 3.30 – Принцип работы фронтального (тупикового) фильтрования

При *тупиковом фильтровании* весь объем раствора фильтруется через мембрану, загрязнения собираются на поверхности или в объеме мембраны (рисунок 3.30). Толщина слоя загрязнений со временем растет, возрастает сопротивление, падает скорость, процесс фильтрования прекращается. Такой способ фильтрования применяется для слабоза-

грязненных растворов и возможности использования мембраны однократно.

*Тупиковое фильтрование с обратным током фильтрата* применяется для загрязненных растворов, а после забивки мембраны осуществляется ее промывка обратным током очищенной воды, что позволяет использовать мембрану в течение длительного времени.

Для продолжительной работы мембранного элемента необходим непрерывный смыв задерживаемых мембранной загрязнений. Такой способ фильтрования с постоянным отмыванием мембраны исходным потоком называется *фильтрованием из тангенциального потока* (рисунок 3.31).

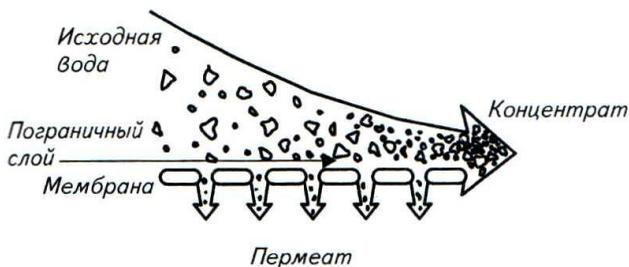


Рисунок 3.31 – Принцип работы при фильтровании из тангенциального потока

Входящий поток подается вдоль поверхности мембраны и по мере его движения разделяется на два: прошедший через мембрану очищенный раствор (пермеат) и не прошедший через мембрану концентрат, содержащий основную часть задержанных мембранной примесей.

*Тупиковое фильтрование* применяется для макро-, микро- и ультрафильтрации, фильтрование из тангенциального потока в основном в установках обратного осмоса, нанофильтрации, реже для ультрафильтрации.

В качестве *мембран* могут быть использованы мелкопористые материалы в виде полимерной бумаги, сетки, ткани, многослойной пленки, керамики, металлокерамики и т. п. К полупроницаемым мембранам предъявляются следующие требования:

- высокая селективность (разделяющая способность);
- высокая проницаемость (удельная производительность);
- минимальное гидравлическое сопротивление;
- стабильность характеристик во времени;
- химическая стойкость;
- механическая прочность;
- низкая стоимость.

Иногда возникают специфические требования для конкретного производства.

Исторически вначале появились *изотропные (симметричные) мембраны*, имеющие одинаковые поры по всей толщине мембраны. Их применяют только для технологий осветления – в микрофльтрации и частично в ультрафльтрации.

Разработка *анизотропных (ассимметричных) мембран* позволила разделить функции механической прочности и разделяющей способности между отдельными слоями: разделительным и опорным. Мембрана состоит из двух слоев, один является тонким разделительным 0,5-5 мкм, другой – опорным (несущим) для рабочего слоя.

После анизотропных мембран были созданы *многослойные композитные мембраны*, где разделительные слои размещаются между опорными поддерживающими. Такие мембраны за счет малой толщины разделительного слоя имеют высокую удельную производительность, их селективность также существенно выше, чем у анизотропных мембран, поскольку тонкие пленки можно выполнять практически однородными. Создание композитных мембран сделало возможным их эффективное применение для обессоливания.

Мембраны можно *классифицировать* по многим признакам. В зависимости от области применения – микрофльтрационные, ультрафльтрационные, для обратного осмоса, нанофльтрации. По структуре мембраны бывают изотропные, анизотропные, композитные, по пористости – пористые и непористые, по форме – плоские, трубчатые, рулонные, волоконные. Одной из наиболее важных характеристик является *материал мембраны*. Неорганические изготавливают из металла, керамики, металлокерамики, их отличает высокая механическая прочность, термическая, биологическая и химическая устойчивость. Такие мембраны используются для микро- и ультрафльтрации.

Все мембраны для нанофльтрации и обратного осмоса, а также большинство микро- и ультрафльтрационных мембран изготавливаются из органических полимеров – ацетатов целлюлозы, ароматических полиамидов, полисульфонамида, полиэтилена, полипропилена, фторопластов и др. Основное преимущество полимерных мембран – технологичность и возможность управлять их свойствами и структурой при изготовлении. Получают такие мембраны спеканием порошков или волокон, формованием из расплава или раствора, облучением пленки, вымыванием наполнителя, выщелачиванием части полимера, химической модификацией готовых мембран.

Основными показателями мембранного разделения являются: *селективность* (задерживающая способность) R:

$$R = \frac{C_{исх} - C_{фил}}{C_{исх}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{C_{фил}}{C_{исх}}\right) \cdot 100\%,$$

где  $C_{исх}$ ,  $C_{фил}$  – концентрации примесей соответственно в исходной воде и фильтрате (пермеате);

$G$  – удельная производительность (проницаемость) при данном давлении  $G$  (по фильтрату):

$$G = \frac{Q_{фил}}{S_{мем}}, \text{ л/(м}^2 \cdot \text{ч)}$$

где  $Q_{фил}$  – расход фильтрата;

$S_{мем}$  – площадь мембраны;

$\eta$  – гидравлический КПД (конверсия, степень отбора пермеата) характеризует степень полезного (целевого) использования воды и определяется как отношение расхода пермеата  $Q_{фил}$  к расходу питающей воды  $Q_{исх}$ :

$$\eta = \frac{Q_{фил}}{Q_{исх}} \cdot 100\%,$$

$CF$  – фактор концентрирования – отношение расхода питательной воды  $Q_{исх}$  к расходу концентрата  $Q_{кон}$ :

$$CF = \frac{Q_{исх}}{Q_{кон}} = \frac{1}{(1 - \eta)}.$$

### 3.6.2 Микрофильтрация и ультрафильтрация

*Микро- и ультрафильтрация* – мембранные процессы фракционирования и концентрирования видимых веществ сравнительно больших размеров от 1,0 до 0,01 мкм, которые определяют мутность, опалесцентность, цветность воды и находятся в ней в виде коллоидов, бактерий, вирусов, макромолекул и т. п. (рисунок 3.32)

В указанных процессах используются пористые перегородки с определенным размером отверстий. Механизм разделения основан на «просеивании» частиц в зависимости от их размера, т. е. происходит селективное удаление частиц с размерами большими, чем размер пор мембраны.

МФ функционирует при перепаде давлений на фильтрующей перегородке 0,02-0,03 МПа, УФ при 0,1-0,5 МПа. МФ и УФ могут быть использованы как в тупиковом, в т. ч. с регенерацией обратным током, так и в тангенциальном режимах. Применяются для промышленной водоподготовки, предварительной обработки воды перед ОО, финишной стерилизации вод в пищевой, медицинской и электронной промышленности.

Микрофильтрация  
1 – 0,1 мкм

Ультрафильтрация  
0,1 – 0,01 мкм

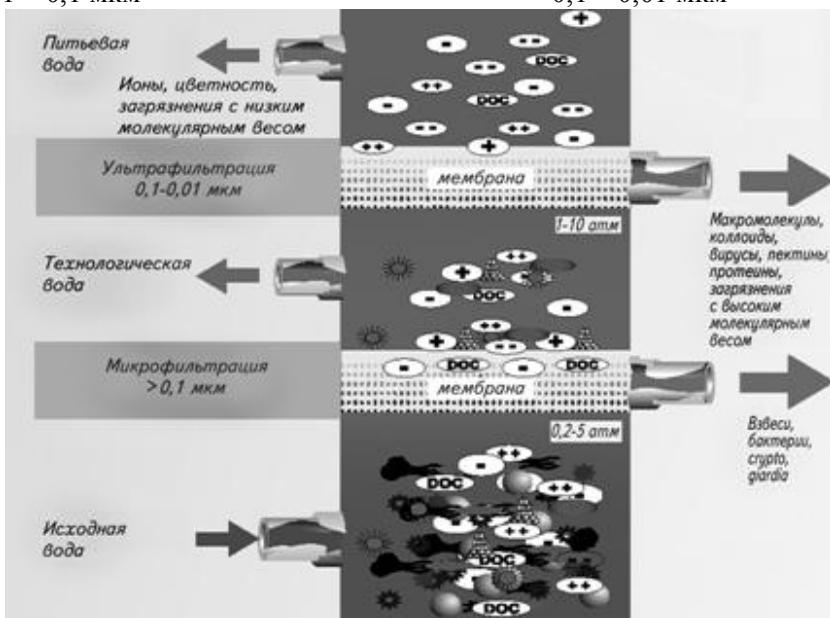


Рисунок 3.32 – Удаление загрязнений микро- и ультрафильтрацией

Тупиковая (фронтальная) фильтрация реализуется в так называемых картриджных (патронных) фильтрах, основой которых является сменный фильтрующий элемент. Мировыми и отечественными производителями разработана и выпускается огромная номенклатура картриджей. Сменные *фильтрующие элементы* бывают двух основных типов: с *объемной* и *поверхностной* фильтрацией. Объемные элементы практически не поддаются регенерации, пленочные могут быть частично регенерированы.

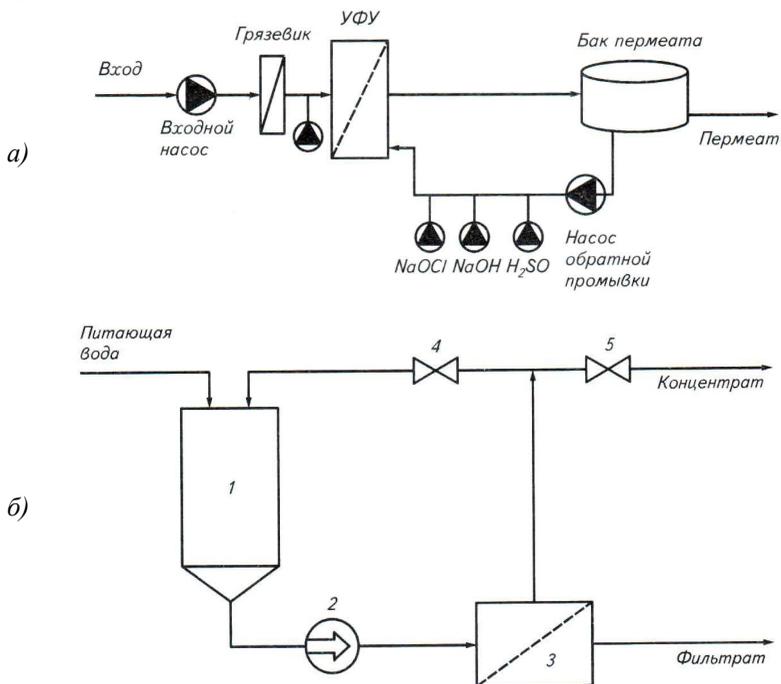
В процессе водоподготовки МФ и УФ применяется тупиковая фильтрация с *регенерацией обратным током пермеата* в аппаратах с трубчатыми и рулонными элементами и с полыми волокнами. Последний вариант нашел наибольшее распространение. Полое волокно представляет собой изотропную или анизотропную мембрану из гидрофильного полиэфирсульфона или полисульфона с расположенным внутри или снаружи разделительным слоем.

В зависимости от метода создания перепада давления на мембране существуют два варианта организации процесса разделения – *напорная* и *вакуумная* (безнапорная) фильтрация. Половолоконные элементы могут эксплуатироваться с направлением потока как изнутри –

наружу, так и снаружи – вовнутрь волокна. Набор полых волокон размещается в напорных корпусах, которые могут выдержать давление до 4-5 атм.

Мембранный элемент с полыми волокнами диаметром от 0,8 до 16 мм представляет собой пластиковый корпус со штуцерами, в которых уложен пучок из тысяч полых волокон, концы которых с двух сторон загерметизированы, а их открытые торцы выходят в концевые камеры.

Схемы УФ в тупиковом варианте с регенерацией обратным током фильтрата и в режиме тангенциальной фильтрации приведены на рисунке 3.33.



*а – тупиковая фильтрация с регенерацией обратным током фильтрата;  
б – тангенциальная фильтрация: 1 – приемная емкость; 2 – насос; 3 – модуль ультрафильтрации; 4, 5 – регулировочные вентили*

Рисунок 3.33 – Принципиальные схемы установки ультрафильтрации

В режиме тангенциальной фильтрации через мембрану проходит только часть исходной воды, а при тупиковой – весь объем. Но во втором случае при обратных промывках используется до (20-30) % объема фильтрата, что существенно уменьшает удельный съем фильтрата с мембраны; в тангенциальном потоке частота обратных промывок и

химических моек в несколько раз ниже. С точки зрения капитальных и эксплуатационных затрат тангенциальный режим более привлекателен.

### 3.6.3 Обратный осмос и нанофильтрация

*Обратный осмос* (ОО) и *нанофильтрация* (НФ) – баромембранные процессы очень близкие по механизму разделения, схеме организации, типам мембран и применяемому оборудованию. Задерживают примеси размером 0,01-0,0001 мкм.

ОО широко используется для обессоливания (опреснения) всех типов вод в установках самой разной производительности – от мелких бытовых и лабораторных до крупных промышленных. Принципиальная схема разделения методом ОО представлена на рисунке 3.34.

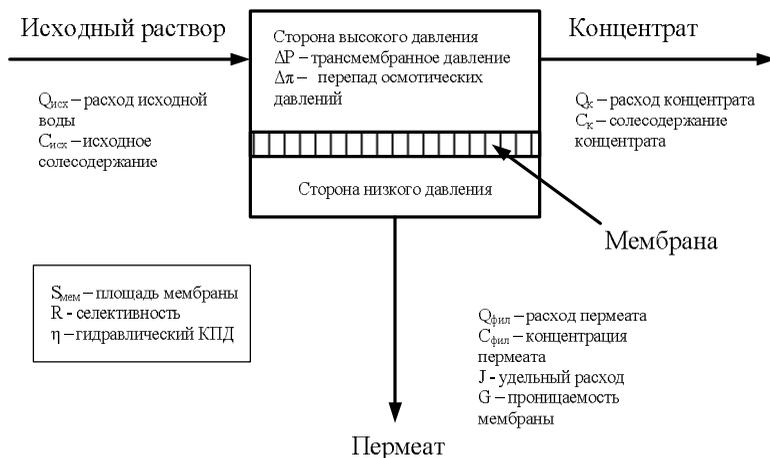


Рисунок 3.34 – Принципиальная схема разделения методом обратного осмоса

Первоначально ОО был ориентирован на опреснение морских и солоноватых вод, что требовало использования мембран с высокой селективностью, но они имели низкую проницаемость. Процесс осуществлялся при высоких входных давлениях (до 80-150 атм), необходимых для преодоления большого осмотического давления и создания требуемой производительности. Новые типы композитных мембран с относительно низкой селективностью и более высокой проницаемостью позволили реализовывать низконапорные энергосберегающие режимы работы и процесс получил название *нанофильтрация*, рабочее давление обычно лежит в пределах от 3 до 20 атм.

В НФ и ОО процессы переноса растворителя и растворенного вещества происходят на молекулярном уровне и могут быть описаны в терминах химических потенциалов, определяемых концентрацией и составом раствора, которые используются в понятии *осмотическое давление*. Величина осмотического давления раствора прямо пропорциональна концентрации компонентов в растворителе и зависит от их природы. Если избыточное давление со стороны раствора превысит осмотическое, молекулы воды из раствора начнут переходить на сторону чистой воды, т. е. поток воды будет противоположен осмотическому, что и получило название *обратный осмос*. Таким образом, получается обессоленная вода и концентрат солей.

Для длительной работы мембранного элемента необходимо обеспечить непрерывный смыв задерживаемых мембраной загрязнений, что происходит при протекании потока над мембраной и соответствует *фильтрованию из тангенциального потока*. Именно такой процесс используется во всех установках ОО и НФ.

Поскольку часть воды уходит через мембрану, у ее поверхности концентрация примесей возрастает по сравнению с ядром потока, это явление получило название *концентрационной поляризации*. При этом на мембране может происходить отложение плохо растворимых примесей, а хорошо растворимые будут повышать в приповерхностном слое осмотическое давление. Это приведет к уменьшению эффективного движущего перепада давления и понижению производительности. Ухудшится и качество очистки, т.к. локальное соледержание в примембранном слое оказывается повышенным. Для борьбы с указанным явлением необходимо турбулентное перемешивание, что достигается увеличением скорости потока и применением специальных сеток-турбулизаторов для нарушения плоскопараллельности течения в межмембранном зазоре.

Эффективность процессов ОО и НФ в значительной мере определяется свойствами применяемых мембран. Современные *обратноосмотические* и *наночелювтрационные мембраны* являются анизотропными на основе ацетатов целлюлозы или полиамида, либо композитными с разделительным слоем из ароматического полиамида, нанесенного на подложку из полисульфона.

Ацетатцеллюлозные мембраны склонны к гидролизу, имеют ограниченный диапазон рН=4-7. Альтернативой им стали полиамидные мембраны, а затем тонкопленочные композитные мембраны (ТКП) на основе полиамида. Для последних мембран характерно снижение рабочего давления в 1,7-1,9 раза, повышение селективности на 2 % и производительности на 20 %.

Современные ТКП напоминают лист обычной бумаги толщиной 160 мкм (удвоенная толщина волоса человека) и представляют собой трехслойные структуры, состоящие из барьерного слоя полиамида

толщиной до 0,2 мкм, нанесенного на подложку из полисульфона в 40 мкм. Полисульфовый слой служит в качестве дренажа для отвода пермеата из барьерного слоя и, в свою очередь, фиксируется на несущей основе из нетканого полиэфира толщиной 120 мкм. Такие мембраны могут эксплуатироваться не менее 5-6 лет практически без снижения рабочих характеристик.

Современные НФ мембраны по структуре и материалу подложки аналогичны обратноосмотическим, но имеют менее плотный и более проницаемый селективный слой и более рыхлый разделительный. Соответственно, НФ мембраны, по сравнению с ОО, имеют пониженную селективность, повышенную проницаемость и меньшее рабочее давление при заданной производительности.

Наночильтрационные мембраны эффективно снижают цветность исходной воды на (70-95) %; удаляют пестициды, соли жесткости, уменьшают окисляемость на (50-80) %, снижают микробиологические загрязнения, поэтому НФ может считаться идеальной технологией для получения питьевой воды.

Постоянно ведутся работы по повышению разделяющей способности (селективности) и удельной проницаемости (производительности) – основных характеристик мембранного разделения. На эти характеристики оказывают влияние давление, температура, солесодержание исходной воды, природа растворенного вещества.

При увеличении *рабочего давления* удельная производительность возрастает линейно, пропорционально давлению, при этом селективность также возрастает из-за увеличения расхода растворителя. Однако при высоких давлениях возможно уплотнение материала мембран, что может вызвать снижение проницаемости, которое наблюдается в первые часы работы.

С ростом *температуры* повышается подвижность ионов и молекул, *уменьшается* вязкость и плотность раствора, что способствует росту проницаемости. Однако при этом повышается осмотическое давление, которое снижает селективность. Учет температуры питающей воды учитывается коэффициентом температурной коррекции К:

$$K = \frac{Q_t}{Q_{25}},$$

где  $Q_t$ ,  $Q_{25}$  – производительности мембранного элемента при температурах  $t$  и 25 °С соответственно.

При увеличении *солесодержания* исходной воды возрастает осмотическое давление поступающего раствора и существенно слабее (в силу селективности мембраны) – осмотическое давление пермеата. Следовательно, уменьшается движущая сила ( $\Delta P - \Delta \pi$ ), что ведет к снижению производительности мембраны. Также снижается селектив-

ность из-за возрастания диффузионного потока, пропорционального концентрации.

Увеличение концентрации растворенных веществ может привести к смещению рН раствора в кислую или щелочную среду, что ускоряет гидролиз полимерных мембран, растворение мембраны, выпадение на ней в осадок малорастворимых солей.

Обратный осмос рекомендуется использовать при концентрациях электролитов: для одновалентных солей до (5-10) %, для двухвалентных от 10 % до 15 %, для многовалентных (15-20) %.

*Повышение гидравлического КПД* приводит к увеличению средней концентрации растворенных веществ, усиливает концентрационную поляризацию из-за чего повышается концентрация солей над поверхностью мембраны. Все это ведет к падению как селективности, так и удельной производительности.

*Природа* растворенного вещества оказывает определенное влияние на селективность. При одинаковой молекулярной массе неорганические вещества задерживаются лучше, чем органические. Среди родственных соединений, например, гомологов, лучше задерживаются вещества с большей молекулярной массой.

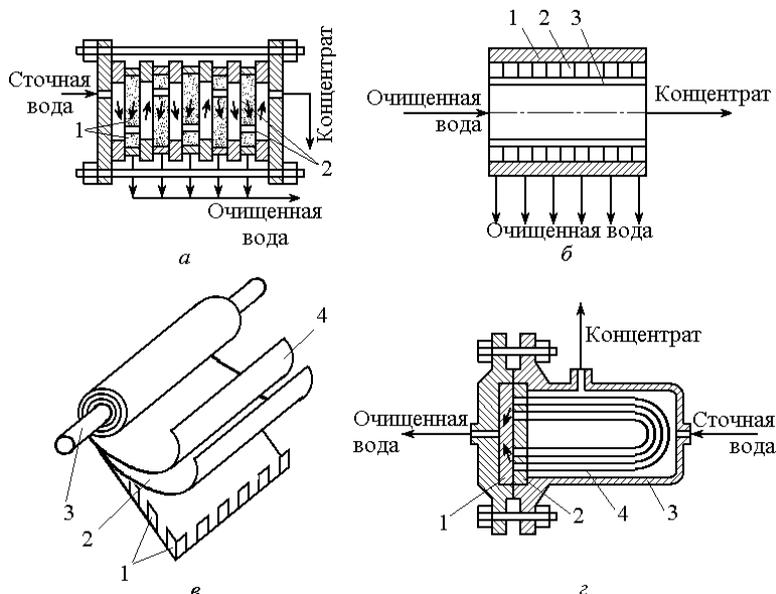
#### **3.6.4 Установки обратного осмоса и нанофильтрации**

Конструкции установок для ОО и НФ отличаются лишь типом используемых мембран и рабочим давлением. Они должны обеспечивать большую поверхность мембран в единице объема, простоту сборки и монтажа, механическую прочность и герметичность. По способу укладки мембран аппараты подразделяются на *четыре основных типа*: плоскосторонние (фильтр-пресс), трубчатые, рулонные (спирально намотанные) и с полыми волокнами (половолоконные) (рисунок 3.35).

Аппараты с *плоскокамерными фильтрующими элементами* (рисунок 3.35, *а*) применяются в установках сравнительно небольшой производительности.

В этих аппаратах мембраны 2 уложены с двух сторон плоских пористых дренажных пластин 1, которые расположены на расстоянии 2-3 мм друг от друга, образуя межмембранное пространство для потока разделяемого раствора. Между соседними мембранными элементами устанавливаются эластичные прокладки с системой каналов, обеспечивающих турбулизацию потоков. Пакет фильтрующих элементов зажимается двумя фланцами и стягивается болтами. Раствор движется параллельными потоками одновременно вдоль всех мембран. Сточная вода последовательно проходит через все элементы, концентрируется и удаляется из аппарата. Прошедший через мембрану фильтрат уходит через дренажные слои в радиальном направлении и через боковые штуцера выводится из аппарата.

Такие аппараты отличаются простотой изготовления, удобством монтажа и эксплуатации, возможностью быстрой замены мембран, но имеют самую малую удельную поверхность мембран по сравнению с другими аппаратами ( $60-300 \text{ м}^2/\text{м}^3$  объема аппарата). Кроме того они обладают большой металлоемкостью, в них происходит неравномерная усадка мембран, возможны протечки разделяемого раствора.



*а* – фильтр-пресс: 1 – пористые пластины; 2 – мембраны;  
*б* – трубчатый фильтрующий элемент: 1 – трубка; 2 – подложка; 3 – мембрана;  
*в* – рулонный фильтрующий элемент: 1 – дренажный слой; 2 – мембрана;  
 3 – трубка для отвода очищенной воды; 4 – сетка-сепаратор;  
*г* – элемент с полыми волокнами: 1 – подложка; 2 – шайба с вмонтированными концами волокон; 3 – корпус; 4 – полые волокна

Рисунок 3.35 – Схемы аппаратов для обратного осмоса и ультрафильтрации

Аппараты с *трубчатыми фильтрующими элементами* (рисунок 3.35, *б*) состоят из полупроницаемой мембраны 3 и дренажного каркаса 1, выполненного в виде трубки диаметром 6-30 мм, где мембрана может находиться на ее внутренней или наружной поверхности, а также с обеих сторон. Между мембраной располагается подложка 2. Основным достоинством таких аппаратов является малая концентрационная поляризация и незначительное загрязнение поверхности мембран ввиду высокой скорости потока (0,9-12 м/с). Кроме того они обладают малой металлоемкостью, незначительным гидравлическим

сопротивлением, механической прочностью, простотой конструкции. Основной недостаток – малая удельная рабочая поверхность мембран ( $200-300 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ), более сложная их замена. Применяются эти аппараты для очистки сильнозагрязненных вод и промышленных стоков.

Аппараты с фильтрующими элементами *рулонного типа* отличаются большой плотностью упаковки мембран ( $300-800 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ). Каждый рулонный элемент (рисунок 3.35, в) представляет собой прикрепленный к водоотводящей трубке и накрученный на нее спирально пакет (лепесток), состоящий из двух мембран 2 и расположенных между ними дренажного слоя 1 и сетки-сепаратора 4. Трубка для отвода фильтра 3 имеет продольные прорезы. Исходный раствор движется по межмембранным каналам рулонного фильтрующего элемента в продольном направлении. Проникающий через мембраны фильтрат по спирально расположенному дренажному слою поступает в фильтроводящую трубку и отводится из аппарата. В промышленных рулонных элементах мембраны состоят из множества лепестков (27-35) – пакетов.

Рулонные аппараты имеют малую металлоемкость, механизированную сборку, просты в замене элементов, но чувствительны к наличию механических загрязнений. По критерию эффективность / стоимость они являются самыми эффективными и получили наибольшее распространение.

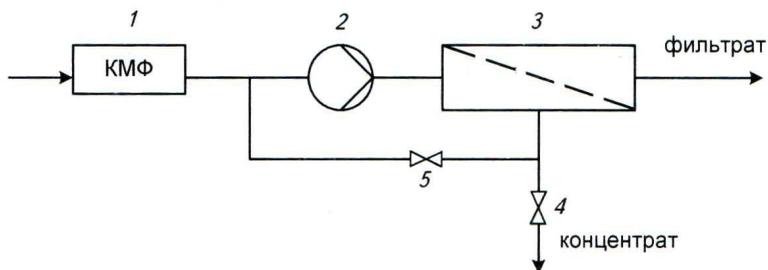
Аппараты с фильтрующими элементами в виде *полых полупроницаемых волокон* (рисунок 3.35, г) имеют очень высокую плотность укладки мембран в единице объема аппарата - до 20-30 тыс.  $\text{м}^2/\text{м}^3$ . Полые волокна 4 на основе анизотропных мембран с наружным диаметром 45-200 мкм, и стенками толщиной 10-50 мкм, способны выдержать необходимое рабочее давление. Фильтрат в этих элементах собирается с наружной поверхности волокон или отводится по капилляру полых волокон. Поэтому такие аппараты не требуют поддерживающих дренажных устройств, что значительно снижает капитальные затраты, упрощает их сборку и эксплуатацию. Они компактны и высокопроизводительны. Недостатки – трудность замены поврежденных волокон, большое сопротивление, необходимость тщательной предварительной очистки от механических примесей.

Аппараты с полыми волокнами выполняют чаще всего в виде кожухотрубчатого теплообменника 3 с линейным или U-образным (с одной решеткой) расположением волокон. Раствор движется вдоль наружной или внутренней поверхности волокон. Концы волокон с помощью эпоксидной смолы и уплотнений закреплены в трубных решетках 2.

Мембранные элементы, помещенные в корпуса-фильтродержатели, представляют собой единичный базовый элемент – модуль. Модули, в свою очередь, собираются в параллельные или последовательные схемы. Типовая схема мембранной установки ОО или УФ приведена на рисунке

3.36. Исходный раствор подвергается очистке от механических примесей в картриджном микрофилт্রে 1 и насосом высокого давления 2 подается на мембранный модуль 3.

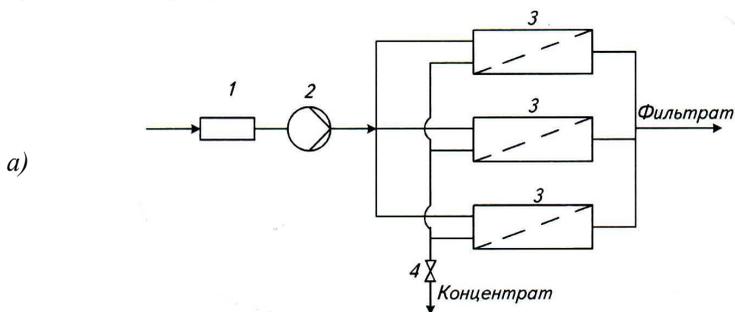
Для повышения производительности установки соединяют параллельно, для увеличения селективности последовательно.



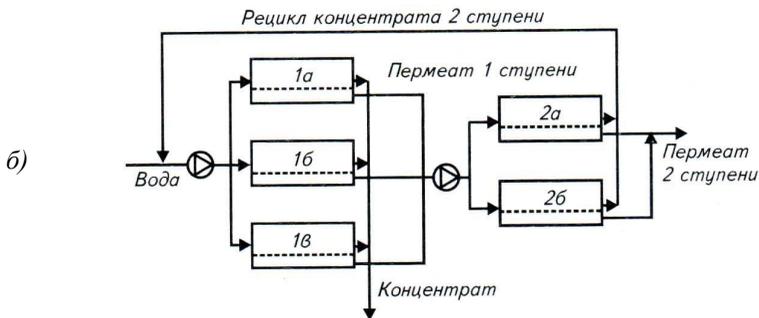
1 – картриджный микрофилтър; 2 – насос высокого давления; 3 – мембранный модуль; 4, 5 – регулировочные вентили

Рисунок 3.36 – Принципиальная схема разделения методом обратного осмоса и ультрафильтрации

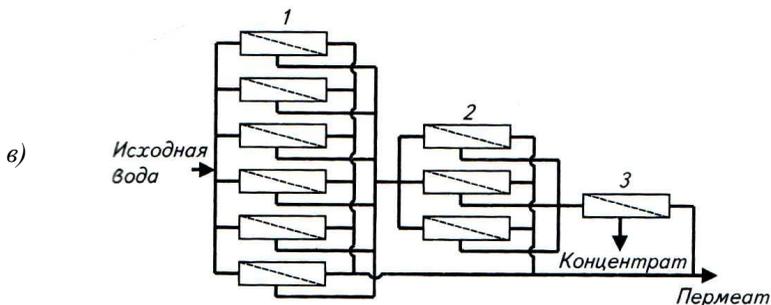
В схемах баромембранных установок вводятся понятия каскад и ступень. *Каскад* – это параллельно установленные в пределах одной ступени модули, объединенные общими коллекторами по исходной воде, пермеату и концентрату. *Ступень* – это набор модулей или каскадов, объединенных общим коллектором по пермеату. Из каскадов формируются ступени установок, которые могут быть одно- и многокаскадными, причем концентрат предыдущего каскада служит питающей водой для последующего. Примеры компоновки таких установок приведены на рисунке 3.37.



1 – картриджный микрофилтър; 2 – насос высокого давления;  
3 – мембранный модуль; 4 – вентиль



1 (а, б, в) – модули первой ступени; 2 (а, б) – модули второй ступени



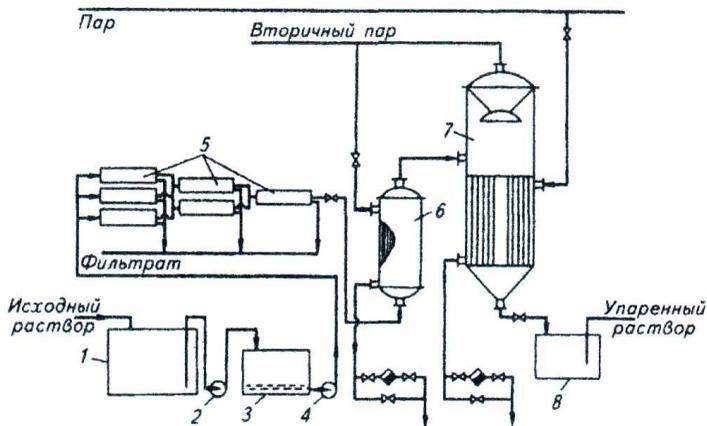
1, 2, 3 – модули соответственно первого, второго и третьего каскада

а – одноступенчатая однокаскадная с параллельными модулями;

б – двухступенчатая; в – одноступенчатая трехкаскадная

Рисунок 3.37 – Варианты компоновки баромембранных установок

Установки с мембранными аппаратами можно классифицировать по нескольким признакам. Они могут быть непрерывного и периодического действия, прямоточные и циркуляционные, каждая из которых может быть одно- или многоступенчатой. Прямоточные установки работают только непрерывно, циркуляционные бывают непрерывными и периодическими. Технологическая схема установки определяется ее назначением и зависит от исходной концентрации растворов, производительности установки и условий ее эксплуатации. На рисунке 3.38 приведена технологическая схема очистки сточных вод гальванических производств на обратноосмотической мембранной установке.



1 – емкость для исходного раствора; 2 – насос низкого давления; 3 – фильтр; 4 – насос высокого давления; 5 – аппараты обратного осмоса; 6 – теплообменник; 7 – выпарной аппарат; 8 – емкость для упаренного раствора

Рисунок 3.38 – Технологическая схема установки для концентрирования растворов с применением обратного осмоса

Исходный раствор собирается в емкости 1 и насосом 2 подается на фильтр 3 для удаления механических примесей. Далее насосом высокого давления 4 раствор направляется в одноступенчатый трехкаскадный аппарат обратного осмоса 5. В нем фильтрат отбирается с каждого каскада и возвращается в производство. Концентрат проходит последовательно каждый каскад, а после третьего нагревается в теплообменнике 6 и поступает на упаривание в выпарной аппарат 7. Упаренный раствор собирается в емкости 8, а вторичный пар идет на подогрев исходного раствора в теплообменнике 6.

### Контрольные вопросы

1. Классификация баромембранных методов, их характеристика
2. Движущая сила баромембранных процессов
3. Приемы организации процесса мембранного разделения
4. Характеристика тупиковых видов фильтрования и фильтрования из тангенциального потока
5. Требования к полупроницаемым мембранам
6. Классификация мембран
7. Виды мембран для МФ и УФ

8. Основные показатели мембранного разделения (селективность, проницаемость, гидравлический КПД, фактор концентрирования)
9. Механизм микро (МФ)- и ультрафильтрации (УФ)
10. Варианты проведения МФ и УФ
11. Механизм обратного осмоса (ОО) и нанофильтрации (НФ)
12. Мембраны для ОО и НФ
13. Факторы, влияющие на ОО и НФ
14. Типы мембранных аппаратов
15. Принципиальная схема разделения методом ОО
16. Каскады и ступени баромембранных установок
17. Схема концентрирования растворов с применением ОО

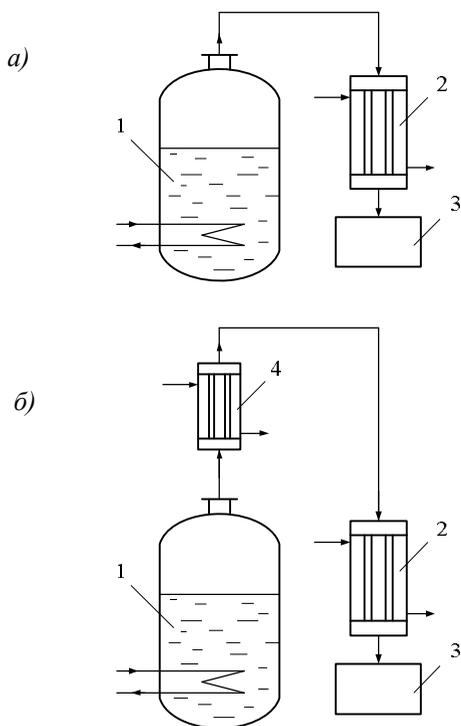
### 3.7 Перегонка и ректификация

Перегонка и ректификация являются одними из наиболее распространенных методов выделения из сточных вод растворенных органических жидкостей. Установки перегонки и ректификации сточных вод, как правило, входят в состав технологических схем основных производств. Выделенные из сточной воды примеси используются на этих же производствах.

Для очистки вод применяют простую перегонку, перегонку с водяным паром или инертными носителями, азеотропную перегонку и ректификацию в присутствии перегретого водяного пара. Специфичность процесса очистки сточных вод этими методами обуславливается относительно малыми концентрациями примесей и необходимостью практически полного выделения их из сточных вод.

#### 3.7.1 Перегонка и азеотропная отгонка

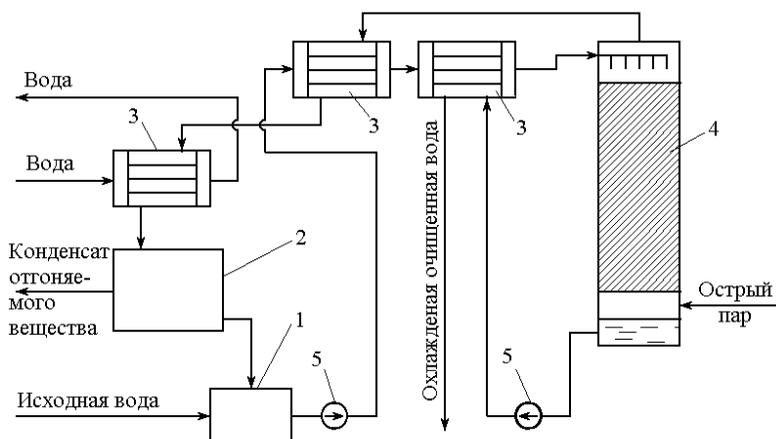
*Простую перегонку* проводят в установках периодического или непрерывного действия путем постепенного испарения сточной воды, находящейся в перегонном кубе 1. Образующиеся пары конденсируются в конденсаторе-холодильнике 2, и дистиллат поступает в сборник 3. Применяют ее для очистки сточных вод от примесей, температура кипения которых значительно ниже температуры кипения воды (ацетон, метиловый спирт и т. п.). Для более полного разделения смесей и получения концентрированного дистиллата *перегонку* проводят с *дефлегмацией*. Над перегонным кубом устанавливают трубчатый или змеевиковый дефлегматор 4, в котором пары более высококипящей воды частично конденсируются, и она в виде флегмы сливается в куб 1, а пары, обогащенные низкокипящим компонентом, направляются в холодильник-конденсатор 2. Варианты перегонных установок приведены на рисунке 3.39.



*а – простая перегонка; б – перегонка с дефлегмацией; 1 – перегонный куб; 2 – конденсатор-холодильник; 3 – сборник; 4 – дефлегматор*

**Рисунок 3.39 – Варианты перегонных установок**

В тех случаях, когда органические вещества в смеси с водой образуют нераздельно кипящую (азеотропную) смесь, для выделения указанных веществ из сточной воды может быть использована *азеотропная отгонка*. Чаще всего азеотропы характеризуются минимальной температурой кипения, поэтому их отгонка проходит при температуре, ниже температуры кипения воды при данном давлении. Многие азеотропные смеси при конденсации расслаиваются, при этом сырой органический компонент может быть легко отделен от водного насыщенного раствора. В этих случаях азеотропная отгонка загрязняющего компонента из сточной воды наиболее экономична. На рисунке 3.40 представлена схема отгонки гетерогенных азеотропов из сточной воды.



*1 – емкость; 2 – отстойник-сепаратор; 3 – теплообменники;  
4 – отгонная колонна; 5 – насос*

Рисунок 3.40 – Схема установки для азеотропной отгонки летучих органических веществ из сточной воды

Выделение азеотропной смеси осуществляется в отгонной насадочной колонне 4. В отстойнике-сепараторе 2 конденсат органического вещества отделяется от конденсата пара. Последний смешивается с исходной водой и вновь направляется на отгонку.

Исходная вода поступает в емкость 1, куда из отстойника-сепаратора 2 подается водный слой, образовавшийся при расслоении гетерогенного азеотропа. Полученная смесь насосом 5 прокачивается через теплообменники 3, где подогревается отходящими парами дистиллата и очищенной водой и поступает в отгонную насадочную колонну 4, в нижнюю часть которой подается острый пар. Азеотропная смесь паров воды и отгоняемого вещества в теплообменнике 3 отдает тепло на подогрев исходной воды и конденсируется. Конденсат поступает в отстойник-сепаратор 2, где происходит его расслаивание на водный и органический слой. Водный слой сливается в емкость 1, смешиваясь с исходной водой, а конденсат органического вещества поступает на утилизацию.

Азеотропная отгонка может быть рекомендована для выделения из воды целого ряда органических веществ, образующих с водой гетерогенные азеотропы – бензола, толуола, эфиров уксусной кислоты, четыреххлористого углерода, хлороформа и др., содержание в них органического компонента должно значительно превышать содержание воды.

Для очистки сточных вод довольно часто применяют *перегонку* в присутствии *водяного пара* или другого *инертного носителя*. Отличие ее от простой перегонки заключается во введении острого пара непосредственно в сточную воду, что упрощает конструкции перегонных аппаратов, снижает расход тепла на перегонку. Для отгонки из воды примесей могут быть использованы инертные носители, например, газы: воздух, азот, диоксид углерода, углеводородные газы и др.

### 3.7.2 Ректификация и эвапорация

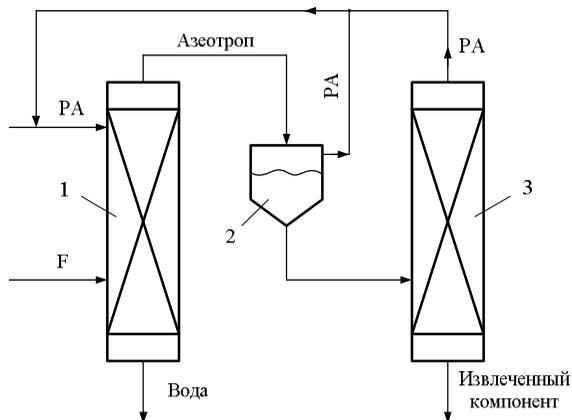
Для очистки сточных вод от многих органических соединений можно использовать простую и азеотропную ректификацию. Процесс ректификации состоит в выделении из смеси двух или нескольких жидкостей с различными температурами кипения компонентов в более или менее чистом состоянии, что достигается многократным массообменом между жидкой и паровой фазами. При этом часть легколетучего компонента (органическое вещество) переходит из жидкой фазы в паровую, а часть менее летучего (вода) – из паровой фазы в жидкую.

*Простую ректификацию* проводят в ректификационных колоннах тарельчатого или насадочного типа. В ректификационной установке непрерывного действия исходную сточную воду подают на тарелку питания, расположенную между укрепляющей и исчерпывающей частями колонны. Сточная вода с нижней тарелки колонны поступает в парциальный кипятыльник, в котором за счет подачи тепла подвергается частичному выкипанию, образуя поток паров, возвращающихся в колонну в качестве парового орошения. Остальная часть очищенной воды отводится в качестве конечного продукта (кубовый остаток).

Выходящий с верхней тарелки колонны пар легколетучего компонента конденсируется, часть его возвращается в колонну в виде флегмы (орошения), образуя поток жидкости, стекающий вниз колонны. Другая часть сконденсированного потока (дистиллат) отводится в виде конечного продукта.

При *азеотропной ректификации* применяется разделяющий агент, который образует с одним из компонентов сточной воды азеотроп (желательно гетерогенный) с минимальной температурой кипения. В результате отгоняется более летучая азеотропная смесь, а в кубовом остатке содержится практически чистый второй компонент (вода) (рисунок 3.41). Разделяющий азеотропный агент подается в колонну азеотропной ректификации 1, где в кубе выделяется очищенная вода, а сверху азеотропная смесь, направляемая на расслаивание в сепаратор 2, из которого азеотропный агент вновь подается в колонну ректификации 1. Извлеченный компонент после расслаивания в сепараторе поступает в отгонную колонну 3 для очистки от растворенного в нем азеотропного агента. В кубе колонны выделяется извлеченный

компонент, в дистиллате азеотропная добавка, которая возвращается в колонну азеотропной ректификации 1.



*F* – исходная смесь; *РА* – разделяющий агент; 1 – колонна азеотропной ректификации; 2 – сепаратор; 3 – отгонная колонна

Рисунок 3.41 – Схема азеотропной ректификации

*Пароциркуляционный метод (эвапорация или отгонка с водяным паром)* заключается в извлечении из сточных вод молекулярных примесей в отгонной (отпарной) колонне с использованием циркулирующего водяного пара. Из пара летучую примесь извлекают нагретым до температуры циркулирующего пара раствором щелочи, если отгоняемое вещество является слабой кислотой, или раствором минеральной кислоты, если отгоняемое вещество – слабое основание.

Пароциркуляционный метод применяется в основном для отгонки из сточных вод органических веществ, являющихся слабыми электролитами, при таких значениях рН, когда они находятся только в молекулярном состоянии, т. е. диссоциация извлекаемого органического вещества практически подавлена. Таким путем можно удалить крезолы, нафтолы, карбоновые кислоты. Но основное применение метод нашел в коксохимической промышленности для извлечения фенолов, степень обесфеноливания при этом составляет (85-92) %.

В основе эвапорационного метода очистки лежит закономерность распределения малых концентраций веществ между жидкой и паровой фазами, согласно *коэффициенту распределения K*:

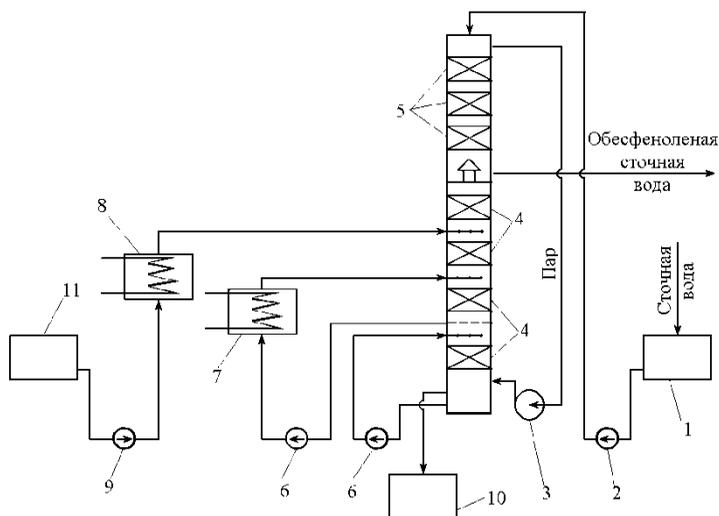
$$K = C_{\text{п}}/C_{\text{в}},$$

где  $C_{\text{п}}$ ,  $C_{\text{в}}$  – концентрации примеси соответственно в паре и воде.

Эвапорация может проводиться как в периодических, так и непрерывно действующих дистилляционных колоннах. Такая колонна делится на две части – *эвапорационную*, где происходит очистка сточ-

ных вод, и *поглотительную*, где идет регенерация пара. При движении через колонну, заполненную насадкой, навстречу оstromу пару сточная жидкость нагревается до 100 °С; находящиеся в ней летучие примеси частично переходят в паровую фазу и таким образом удаляются из раствора. Далее пар проходит через какой-либо нагретый также до температуры ~ 100 °С поглотитель, в котором удаляются захваченные им примеси (регенерация пара), освобожденный из них водяной пар снова направляется на очистку сточных вод. Процесс проходит только в *кинетических условиях*.

Схема пароциркуляционной установки для обесфеноливания сточных вод приведена на рисунке 3.42.



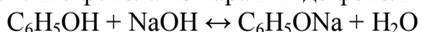
- 1 – сборник; 2 – насос для подачи сточной воды; 3 – вентилятор для рециркуляции пара; 4 – поглотительная часть колонны; 5 – эвапорационная часть колонны; 6 – насосы для циркуляции растворов фенолятов натрия; 7 – подогреватель раствора фенолята натрия; 8 – подогреватель щелочного раствора; 9 – насос для подачи щелочи; 10 – сборник фенолятов; 11 – сборник щелочи

Рисунок 3.42 – Схема обесфеноливания сточных вод коксохимического производства пароциркуляционным методом

Сточная вода, нагретая до температуры кипения, из сборника 1 насосом 2 подается в верхнюю часть обесфеноливающей колонны 5 с деревянной хордовой насадкой. Фенольная сточная вода, стекая по деревянной насадке контактирует с поднимающимся из нижней части колонны водяным паром, при этом последний насыщается парами фе-

нолов. Верхняя и нижняя части колонны разделены глухой тарелкой, оборудованной патрубком для прохода пара, циркулирующего с помощью вентилятора 3. Обесфеноленная вода отводится с глухой тарелки, а циркулирующий пар вентилятором 3 подается в нижнюю поглощительную часть колонны 4 с металлической спиральной насадкой. Верхний ярус насадки этой части колонны периодически с помощью насоса 9 орошается (8-10) % раствором подогретого в подогревателе 8 до (102-103) °С едкого натра, нижние ярусы – циркулирующим с помощью насоса 6 через теплообменник 7 раствором фенолята натрия.

В процессе абсорбции фенолов щелочно-фенолятным раствором происходит извлечение фенола из пара в виде фенолята натрия:



Обесфеноленный пар проходит слой насадки для улавливания капель щелочи и вновь поступает в эвапорационную часть колонны через патрубок.

Раствор, циркулирующий в нижнем ярусе, имеет наибольшую концентрацию фенолятов, средний орошается менее концентрированным раствором. Циркуляция растворов фенолятов натрия с помощью насоса 6 позволяет повысить их концентрацию на (20-25) %. Часть раствора фенолятов натрия собирается в сборник 10, откуда направляется на склад. Применяемая трехступенчатая схема орошения с двумя ступенями рециркуляции и периодическим орошением верхней ступени свежим раствором щелочи позволяет повысить степень извлечения фенолов из циркулирующего пара.

### Контрольные вопросы

1. Области использования перегонки и ректификации для выделения примесей из воды
2. Простая перегонка и перегонка с дефлегмацией
3. Азеотропная отгонка
4. Простая ректификация
5. Азеотропная ректификация
6. Пароциркуляционный метод (эвапорация) для отгонки примесей из сточных вод
7. Закономерность распределения малых концентраций веществ между жидкой и паровой фазами
8. Схема обесфеноливания пароциркуляционным методом

### 3.8 Обработка воды ультрафиолетом

*Ультрафиолет (УФ)* представляет собой невидимую глазом часть спектра электромагнитных волн с диапазоном от 100 до 400 нм. Волны генерируются в специальных ртутных или ксеноновых лампах и широко применяются для обеззараживания воды и воздуха.

УФ излучение уже давно и широко применяется во всем мире, в т. ч. в РФ его используют до 20 % предприятий по очистке воды. При модернизации очистных сооружений в большинстве случаев переходят на УФ обеззараживание. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (НДТ) рекомендует для обеззараживания использование именно ультрафиолета.

Обработка воды УФ излучением является безреагентным физическим методом воздействия. Облучение может быть импульсным, с широким спектром волн, и постоянным в определенном диапазоне волн.

Эффектом обеззараживания обладает только часть ультрафиолетовых лучей с длиной волны 200-300 нм. Участок волн длиной 100-200 нм называют жестким или вакуумным ультрафиолетом, их энергии хватает на разрушение молекул. Обеззараживающий (бактерицидный) эффект обусловлен фотохимическими реакциями в структуре молекул ДНК и РНК, приводящим к их необратимым изменениям. УФ излучение вызывает нарушения в структуре мембран и клеточных стенок микроорганизмов.

Для обеззараживания воды могут быть использованы *аргонортутные* лампы низкого давления («бактерицидные») и *ртутно-кварцевые* лампы высокого давления. Последние обладают более высокой мощностью и наряду с бактерицидным эффектом имеют окислительное воздействие. Механизм такого воздействия заключается в образовании свободных радикалов и пероксида водорода при фотолизе, распад последнего в воде сопровождается появлением вторичных свободных радикалов, участвующих в процессах окисления загрязняющих веществ. Ртутно-кварцевые лампы высокого давления излучают большое количество концентрированной бактерицидной энергии и используются для обезвреживания больших масс воды с небольшим бактерицидным загрязнением.

*Эффективность обеззараживания* (доля погибших под воздействием УФ облучения микроорганизмов), пропорциональна интенсивности излучения ( $\text{мВт/см}^2$ ) и времени его воздействия (с). Произведение этих величин называется *дозой облучения* ( $\text{мДж/см}^2$ ) и является мерой бактерицидной энергии, т. е. один и тот же эффект может быть получен при малой интенсивности облучения, но большой его продолжительности и, наоборот, при большой интенсивности облучения и малой продолжительности.

Фотохимические процессы практически не зависят от рН и температуры воды, незначительно зависят от ее химического состава. Однако на них оказывает влияние цветность воды, ее мутность и содержание железа.

Преимуществом УФ обработки воды является то, что, в отличие от окислительных способов, здесь не образуются вторичные токсины, отсутствуют изменения физических и химических характеристик воды.

*Достоинства* УФ метода:

- универсальность и эффективность воздействия на различные микроорганизмы;
- отсутствие побочных токсичных продуктов;
- независимость эффекта обеззараживания от состава сточных вод;
- относительная простота эксплуатации;
- экологичность и безопасность для человека;
- исключение коррозии технологического оборудования;
- невысокие эксплуатационные (энергопотребление) и капитальные (минимальная занимаемая площадь, компактность оборудования) затраты;
- простота обслуживания, легкий и простой контроль.

*Недостатком* УФ обеззараживания является отсутствие последствия, т. е. возможность загрязнения воды при транспортировке и последующих стадиях очистки и невозможность использования метода для вод с повышенной мутностью и цветностью.

Поэтому эффективность УФ обеззараживания может быть повышена сочетанием с другими физическими воздействиями и методами обеззараживания. Например, обработка кавитацией или ультразвуком. Аналогичное действие дает введение малых доз озона пероксида водорода, активного хлора, обработка воды серебром, медью, йодом. Для систем централизованного водоснабжения используют УФ в сочетании с постхлорированием, что позволяет снизить дозу хлора. УФ обеззараживание можно использовать как дополнительную ступень после достаточно эффективной мембранной очистки, например, нанофильтрации.

Технологическая схема очистки воды с использованием УФ обеззараживания приведена на рисунке 3.43. Она включает отстойники, камеры озонирования, песчаные фильтры, микрофильтрацию (МК) и нанофильтрацию (НФ). УФ обеззараживание используется как дополнительная ступень после уже достаточно эффективной очистки, что позволяет очищенную речную воду довести до качества питьевой воды.



Рисунок 3.43 – Технологическая схема подготовки питьевой воды с использованием УФ установки

*Бактерицидная установка (камера) УФ обеззараживания воды* приведена на рисунке 3.44. Она состоит из камеры обеззараживания и пульта управления.

*Камера обеззараживания* представляет собой корпус из нержавеющей стали с патрубками для ввода и вывода воды, пробоотборниками и датчиком УФ излучения. Внутри корпуса устанавливают прочные кварцевые трубки (чехлы), в которые помещают бактерицидные лампы (ртутные или ксеноновые). Вода относительно тонким слоем обтекает источники бактерицидного излучения, при этом исключается непосредственный контакт ламп с водой, что обеспечивает их замену без опорожнения аппарата. Конструкция похожа на кожухотрубчатый теплообменник.

Производительность установок колеблется от нескольких литров (для бытовых систем), до нескольких тысяч кубометров в час для городских систем.

Количество ламп в установке зависит от ее производительности, предназначения, типа и состава обрабатываемой воды. Длина корпуса определяется типом применяемых ламп. Ресурс ламп разных типов колеблется от 4 тысяч до 12 тысяч часов, после чего лампы подлежат замене.

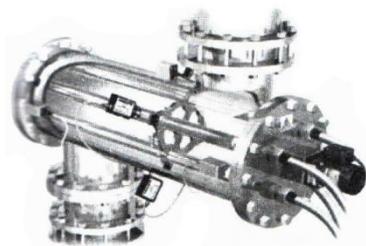
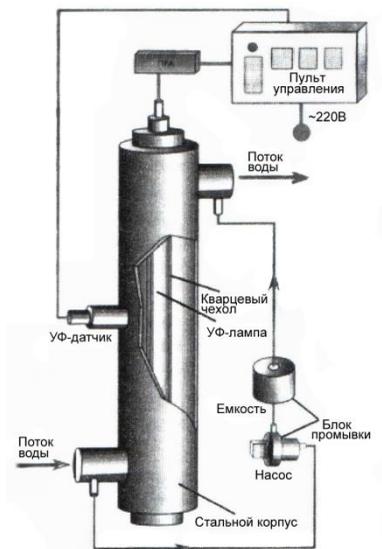


Рисунок 3.44 – Установка для УФ обеззараживания воды

Ламповые блоки (модули) могут иметь различное число ламп, расположенных вертикально или горизонтально и размещаться в поперечном сечении канала, образуя одну или несколько последовательных секций (лотковый тип оборудования). Возможно использование корпусного типа оборудования в напорных и безнапорных системах водоотведения.

Расположение УФ установок на очистных сооружениях может быть как в начале, так и в конце технологической цепочки и определяется для конкретных очистных сооружений по результатам технологических исследований. Однако в большинстве случаев обработку воды целесообразно проводить перед подачей ее потребителю.

Если при обработке воды УФ непосредственно в камере ультрафиолетового облучателя разместить ультразвуковой излучатель, в воде возникают короткоживущие парогазовые каверны (пузырьки), которые

появляются в момент снижения давления в воде и схлопываются при сжатии воды. Скорость схлопывания очень высока, при этом возникают экстремальные параметры – огромная температура и давление. В результате уничтожается патогенная микрофлора. Кроме того ультразвуковой излучатель создает колебание воды, отмывающие поверхности аппарата. Использование такого воздействия намного эффективнее простой раздельной обработки облучением и кавитацией.

Жесткое УФ излучение 100-200 нм вызывает образование озона из растворенных в воде молекул кислорода и непосредственно воздействует на молекулы органических соединений. При использовании мощных импульсных ксеноновых ламп возможна глубокая фотохимическая очистка воды от загрязнения нефтепродуктами, пестицидами, токсичными циклическими органическими соединениями, а также окисление двухвалентного железа, сероводорода и т. п.

### **Контрольные вопросы**

1. Характеристика УФ метода обработки воды
2. Устройства для обеззараживания воды
3. Эффективность обеззараживания
4. Достоинства и недостатки УФ метода
5. Бактерицидная установка
6. Совместная обработка воды УФ и ультразвуковым облучением
7. Схема подготовки питьевой воды с УФ установкой

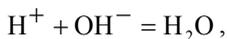
## ГЛАВА 4. ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Основными методами химической очистки являются нейтрализация, окисление и восстановление. Химическая очистка может применяться как самостоятельный метод перед подачей производственных сточных вод в систему оборотного водоснабжения, перед спуском их в водоем или в городскую водоотводящую сеть, так и совместно с другими методами. В качестве предварительной химическая очистка может использоваться перед биологической или физико-химической. Она находит также применение и как метод глубокой очистки сточных вод с целью их дезинфекции, обесцвечивания или извлечения из них различных компонентов. Химические методы применяют для удаления растворимых веществ в замкнутых системах водоснабжения, позволяют полностью извлечь примеси из воды, но связаны с использованием различных реагентов, наличием большого реагентного хозяйства и поэтому дороги.

### 4.1 Нейтрализация

Производственные сточные воды многих отраслей промышленности содержат кислоты и щелочи. В большинстве кислых сточных вод присутствуют соли тяжелых металлов, которые необходимо выделить из этих вод. С целью предупреждения коррозии материалов, оборудования и сооружений, нарушения биохимических процессов, а также осаждения из сточных вод солей тяжелых металлов, кислые и щелочные сточные воды перед сбросом их в водоем, подачей на биологические очистные сооружения или повторном использовании в технологическом процессе должны быть нейтрализованы.

*Нейтрализация* – это химическая реакция между веществами, имеющими свойства кислоты и основания, которая приводит к потере характерных свойств обоих соединений:



при этом активная реакция водной среды приближается к  $\text{pH}=7$ . Практически нейтральными считаются воды с  $\text{pH}=6,5-8,5$ . Кислые воды ( $\text{pH}<6,5$ ) встречаются чаще, чем щелочные ( $\text{pH}>8,5$ ) и представляют большую опасность.

Наиболее часто сточные воды загрязнены минеральными кислотами: серной  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , азотной  $\text{HNO}_3$ , соляной  $\text{HCl}$ , а также их смесями. Реже встречаются фосфорная  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , сернистая  $\text{H}_2\text{SO}_3$ , сероводородная  $\text{H}_2\text{S}$ , плавиковая  $\text{HF}$ , хромовая  $\text{H}_2\text{CrO}_4$ , а также органические кислоты. Концентрация их обычно не превышает 3 %, но иногда может достигать 40 % и более.

При химической очистке применяют следующие *способы нейтрализации*:

- 1) *взаимная нейтрализация* кислых и щелочных сточных вод;
- 2) *нейтрализация реагентами* (растворы кислот, негашеная известь  $\text{CaO}$ , гашеная известь  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , кальцинированная сода  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , каустическая сода  $\text{NaOH}$ , аммиак  $\text{NH}_4\text{OH}$ );
- 3) *фильтрация через нейтрализующие материалы* (известь, известняк  $\text{CaCO}_3$ , доломит  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ , магнезит  $\text{MgCO}_3$ , обожженный магнезит  $\text{MgO}$ , мел  $\text{CaCO}_3$ ).
- 4) *нейтрализация щелочных вод дымовыми газами*, содержащими  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  и др.

Выбор способа нейтрализации зависит от вида и концентрации кислот или щелочей, загрязняющих сточные воды, расхода и режима поступления сточных вод, наличия и стоимости реагентов, местных условий и т. п.

#### **4.1.1 Нейтрализация смешиванием**

Наиболее простым и дешевым способом нейтрализации сточных вод является смешение кислых сточных вод со щелочными. Этот метод применяют, если на одном или на соседних предприятиях имеются кислые и щелочные воды, не загрязненные другими компонентами. Их смешивают в емкости с мешалкой или путем подачи воздуха. При переменной концентрации загрязнений в сточных водах предусматривают усреднитель. Расчет соотношения сточных вод проводят по стехиометрическим уравнениям.

При избытке каких-либо сточных вод добавляют соответствующие реагенты. Нейтрализованную воду используют в производстве, а осадок обезвоживают на шламовых площадках или вакуум-фильтрах.

#### **4.1.2 Нейтрализация добавлением реагентов**

При наличии на предприятии сточных вод одного вида применяют реагентный метод нейтрализации, особенно для кислых сточных вод. Для нейтрализации минеральных кислот чаще всего используют известь в виде пушонки или известкового молока  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и карбонаты кальция  $\text{CaCO}_3$  или магнезия  $\text{MgCO}_3$  в виде суспензии. Эти реагенты сравнительно дешевы и общедоступны, но усложняют реагентное хозяйство (необходимы усреднители, затруднено регулирование дозы реагента).

Соду  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и гидроксид натрия  $\text{NaOH}$  следует использовать, если они являются отходами производства. Можно применять и другие отходы. Например, шлаки сталеплавильного, феррохромового и доменного производств.

Реагенты выбирают в зависимости от состава и концентрации кислой сточной воды с учетом возможности образования в процессе ней-

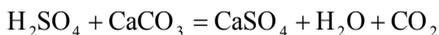
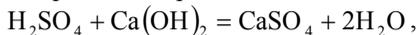
трализации осадка. Различают *три вида* сточных вод, содержащих кислоты:

1) серную  $H_2SO_4$  и сернистую  $H_2SO_3$  кислоты; кальциевые соли этих кислот плохо растворимы в воде и выпадают в осадок;

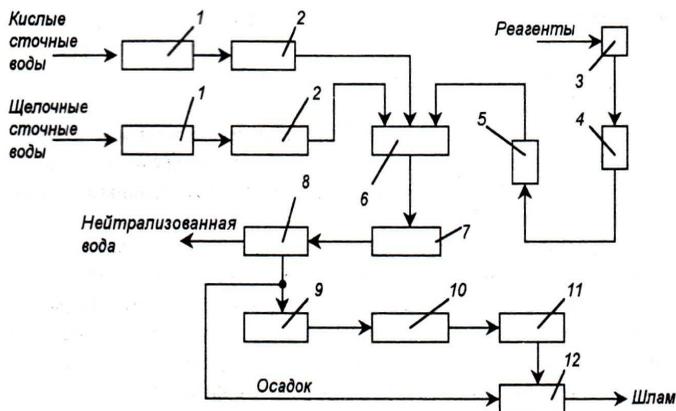
2) сильные кислоты ( $HNO_3$ ,  $HCl$ ); соли этих кислот хорошо растворимы в воде;

3) слабые кислоты ( $H_2CO_3$ ,  $CH_3COOH$ ).

При нейтрализации стоков, содержащих серную кислоту, в зависимости от реагента происходят реакции:



Образующийся при нейтрализации сульфат кальция (гипс) при высокой концентрации выпадает в осадок, тогда необходимо устраивать отстойники-шламонакопители. Принципиальная схема нейтрализационной установки приведена на рисунке 4.1.



- 1 – песколовки; 2 – усреднители; 3 – склад реагентов; 4 – растворный бак;  
 5 – дозатор; 6 – смеситель; 7 – нейтрализатор; 8 – отстойник; 9 – осадкоуплотнитель; 10 – вакуум-фильтр; 11 – накопитель обезвоженных осадков;  
 12 – шламовая площадка

Рисунок 4.1 – Схема станции реагентной нейтрализации

Гашеная известь, применяемая для нейтрализации, готовится в виде известкового молока 5% концентрации по активному оксиду кальция («мокрое» дозирование), но может использоваться и в виде сухого порошка («сухое» дозирование).

Для гашения извести используют шаровые мельницы мокрого помола, в которых одновременно происходят тонкое измельчение и гашение. Для перемешивания реагента со сточной водой применяют

гидравлические (дырчатые, перегородчатые, вихревые) смесители, используют механические мешалки или барботирование воздухом.

В кислых и щелочных сточных водах всегда присутствуют ионы тяжелых металлов, поэтому дозу реагента следует определять с учетом выделения в осадок солей этих металлов.

Для нейтрализации органических жирных кислот применяют известь, содержащую не менее (25-30) % активного оксида кальция, или смесь извести с 25 % технической аммиачной водой.

Нейтрализация щелочных сточных вод осуществляется  $H_2SO_4$ .

### **4.1.3 Нейтрализация фильтрованием кислых вод через нейтрализующие материалы**

В этом случае проводят фильтрование кислых вод через слой магнезита, доломита, известняка, твердых отходов (шлак, зола).

Процесс ведут в фильтрах-нейтрализаторах, которые могут быть вертикальными или горизонтальными. Для вертикальных фильтров используют куски известняка или доломита размером 30-80 мм. Высота слоя материала – от 1 до 2 м, скорость – не более 5 м/ч для вертикальных фильтров, 1-3 м/ч – для горизонтальных, продолжительность контакта не менее 10 мин. Вода фильтруется сверху вниз или снизу вверх.

Ограничение применения нейтрализующих фильтров связано с наличием в сточных водах солей тяжелых металлов, т. к. при  $pH > 7$  они будут выпадать в осадок в виде труднорастворимых соединений, которые полностью забивают поры фильтра.

Установка для нейтрализации состоит из усреднителя сточных вод, оборудования для классификации загрузки, дозаторов, насосов для перекачки промывных вод и сооружений для удаления взвешенных веществ из промывных вод.

### **4.1.4 Нейтрализация дымовыми газами**

Для нейтрализации щелочных сточных вод можно использовать отходящие газы, содержащие  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_3$  и др. Применение кислых газов позволяет не только нейтрализовать сточные воды, но и одновременно производить высокоэффективную очистку самих газов от вредных компонентов, а также резко снизить стоимость процесса.

Нейтрализация проводится в реакторах с мешалками или абсорберах пленочного, тарельчатого, распылительного типов. Колонные аппараты должны иметь большое свободное сечение для предотвращения образования карбонатных отложений.

Кислые сточные воды можно нейтрализовать абсорбцией ими аммиака из газовой фазы.

## 4.2 Окисление

Химическое окисление промышленных сточных вод относится к деструктивным методам и применяется для обезвреживания токсичных примесей, например, цианидов, растворенных соединений мышьяка, сероводорода, сульфидов, а также органических загрязнений. Такие сточные воды встречаются в машиностроительной (гальванопокрытые), горнодобывающей, нефтехимической, целлюлозно-бумажной, химической и других отраслях промышленности.

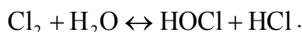
Для обезвреживания сточных вод используют различные окислители: газообразный и сжиженный хлор, гипохлориты кальция и натрия, хлорную известь, хлорат кальция, пирролюзит, диоксид хлора, озон, технический кислород и кислород воздуха. В ряде случаев могут применяться пероксид водорода, оксиды марганца, перманганат и бихромат калия (для окисления фенолов, крезолов, цианосодержащих соединений).

В процессе окисления токсичные соединения, содержащиеся в сточных водах, в результате химических реакций переходят в менее токсичные и удаляются из воды. Очистка окислителями связана с большим расходом реагентов, поэтому ее применяют только тогда, когда загрязняющие вещества нецелесообразно или нельзя извлечь другими способами.

### 4.2.1 Окисление газообразным хлором и хлорсодержащими агентами

Метод окисления примесей хлором и его соединениями - один из самых распространенных способов очистки от ядовитых цианидов, а также сероводорода, сульфидов, метилмеркаптана, фенолов и др. Хлорирование применяется для обеззараживания очищенных вод, борьбы с биологическими обрастаниями на сооружениях.

Хлор, как окислитель, в зависимости от реакции среды может находиться в водном растворе в виде различных соединений (рисунков 4.2). В сильноокислой среде возможно присутствие только молекулярного хлора, т. к. равновесие реакции взаимодействия хлора с водой сдвинуто влево:



В воде образуются хлорноватистая HOCl и соляная HCl кислоты. Далее происходит диссоциация хлорноватистой кислоты, степень которой зависит от pH среды. При pH = 4 молекулярный хлор практически отсутствует:



По мере уменьшения кислотности появляется хлорноватистая кислота HOCl, а в щелочной среде – гипохлориты.

В качестве реагентов, содержащих гипохлорит-ион  $\text{OCl}^-$ , служит хлорная известь, гипохлорит кальция  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  или гипохлорит натрия  $\text{NaOCl}$ , хлорат натрия  $\text{NaClO}_2$ . Товарная хлорная известь содержит около (30-35)% активного хлора, а гипохлорит кальция – (30-45)%. Сумма  $\text{Cl}_2 + \text{HOCl} + \text{OCl}^-$  называется свободным «активным» хлором, который является основным обеззараживающим веществом. Хлорная известь содержит:  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  в различных соотношениях.

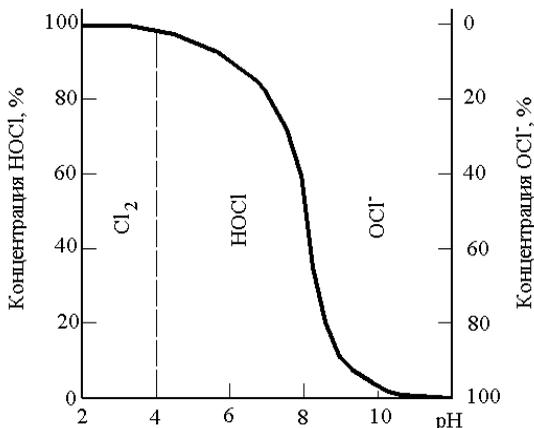
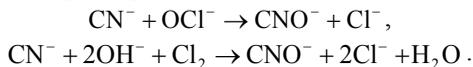


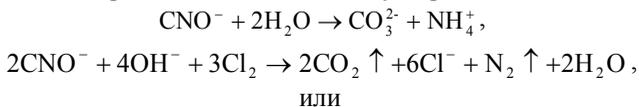
Рисунок 4.2 – Концентрация  $\text{HOCl}$  и  $\text{OCl}^-$  в воде при изменении pH

В присутствии аммонийных соединений в воде образуется хлорноватистая кислота, хлорамин  $\text{NH}_2\text{Cl}$  и дихлорамин  $\text{NHCl}_2$ . Хлор в виде хлорамина называется связанным «активным» хлором.

Окисление цианидов гипохлоритами или хлором производят только в щелочной среде ( $\text{pH} \geq 10$ ):

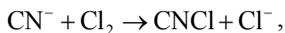


Образующиеся цианаты легко гидролизуются в воде или окисляются до элементарного азота и диоксида углерода:



Окисление цианидов, а также сероводорода протекает быстро (1-3 мин.) и полно. Образующиеся цианаты постоянно гидролизуются.

При понижении pH среды возможно протекание реакции прямого хлорирования цианида с образованием токсичного хлорциана:



поэтому очень важно при окислении цианидов поддерживать щелочную среду.

Хлор обладает бактерицидной реакцией, которая носит физиологический характер. Он вступает во взаимодействие с протеинами и аминокислотами, которые содержатся в оболочке бактерии и ее внутриклеточном веществе. Результатом таких взаимодействий является химическое изменение внутриклеточного вещества, распад структуры клетки и прекращение жизнедеятельности бактерий.

Высокой окислительной способностью обладает диоксид хлора  $\text{ClO}_2$ . Водные растворы  $\text{ClO}_2$  относительно устойчивы в течение длительного времени, при обработке сточных вод диоксидом не образуются токсичных продуктов прямого хлорирования (хлорциана, хлорфенола и др.) в любом диапазоне pH.

Окисление цианидов диоксидом хлора протекает по уравнению:



и наиболее интенсивно идет в щелочной среде при  $\text{pH} \geq 10$ . До тех пор, пока концентрация цианидов в растворе остается высокой, окисления до азота и диоксида углерода не происходит; цианаты начинают окисляться, когда остаточное содержание цианидов достигает 2,5-3 мг/л при дозе  $\text{ClO}_2$ , близкой к теоретической.

В зависимости от агрегатного состояния вводимых в воду хлора или хлорсодержащих реагентов определяется технология обработки сточных вод и аппаратное оформление процесса. Если в воду добавляют газообразный хлор или диоксид хлора, процесс проводят в абсорберах; если реагенты находятся в растворе, то их подают в смеситель и далее в контактный резервуар.

Установки для хлорирования сточных вод с использованием жидкого хлора состоят из узлов испарения жидкого хлора, дозирования газообразного хлора и образования хлорной воды. Хлор (элементарный) поступает на канализационные сооружения в жидком виде в специальной таре. Поскольку ввод газообразного хлора непосредственно в воду повышает его расход и нарушает безопасные условия, его растворяют в воде, испаряя жидкий хлор в емкостных или змеевиковых испарителях, а сточные воды обеззараживают хлорной водой. Ввод хлорной воды в обрабатываемые стоки осуществляют через диффузоры, которые обеспечивают смешение хлорной воды со стоками и уменьшают проскоки хлора в атмосферу. Для хлорирования газообразным хлором наиболее широко применяются вакуумные хлораторы производительностью по хлору от 0,08 до 125 кг/ч.

В случае использования хлорсодержащих реагентов хлораторные установки включают складское хозяйство и устройства для дозирования. Необходимы также растворные и расходные баки, смесители, ка-

меры реакций, отстойники и другие сооружения. Рабочий раствор реагента готовят обычно в виде 5 % раствора по активному хлору.

#### 4.2.2 Окисление кислородом воздуха

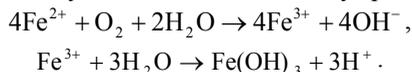
Кислород с успехом может применяться для окисления сероводорода и сульфидов в нефтехимической и целлюлозно-бумажной промышленности. Его используют при очистке воды от железа для окисления соединений двухвалентного железа в трехвалентное с последующим отделением от воды гидроксида железа. Им разрушают фенолы и нефтепродукты.

Промышленное применение нашел способ окисления в жидкой фазе кислородом воздуха под давлением. Окисление проводят при аэрировании воздуха через сточную воду в башнях с хордовой насадкой или путем распыления воды сверху в распылительной колонне и подачей снизу диспергированного воздуха.

Использование колонн с кусковой насадкой или кольцами Рашига нецелесообразно, т. к. происходит зарастание насадки.

Возможен процесс упрощенной аэрации, когда воду разбрызгивают над поверхностью фильтрующей загрузки. При контакте капель воды с воздухом происходит окисление железа.

При окислении двухвалентного железа идут реакции:



Образующийся гидроксид железа отстаивают в контактном резервуаре, а затем отфильтровывают.

Окисление гидросульфидной и сульфидной серы сточных вод целлюлозных, нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов происходит через ряд последовательных стадий:



В процессе окисления сера изменяет свою валентность с -2 до +6.

Основным продуктом окисления  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NaHS}$  является тиосульфат  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ , сульфид  $\text{S}^{2-}$  окисляется до сульфита  $\text{SO}_3^{2-}$  и сульфата  $\text{SO}_4^{2-}$ . С повышением температуры и давления скорость реакции и глубина окисления сульфидов и гидросульфидов увеличивается.

#### 4.2.3 Озонирование сточных вод

*Озонирование* является универсальным методом обработки воды с целью ее обеззараживания, улучшения органолептических свойств, обесцвечивания. Озонирование применяется в водоподготовке и для очистки сточных вод от фенолов, нефтепродуктов, сероводорода, соединений мышьяка, ПАВ, цианидов, красителей, канцерогенных ароматических углеводородов, пестицидов и др.

Обеззараживающее действие озона основано на высокой окислительной способности, обусловленной легкостью отдачи им активного атома кислорода ( $O_3 = O_2 + O$ ). Озон значительно активнее хлора по отношению к вирусам, так как он действует непосредственно на протоплазму клетки; под действием хлора бактерии отмирают постепенно, а при введении озона практически мгновенно. При обработке воды озоном происходит разложение органических веществ и обеззараживание воды.

*Озон  $O_3$  является универсальным реагентом*, поскольку может быть использован для обеззараживания, обесцвечивания, дезодорации воды, для удаления железа и марганца. Озон разрушает соединения, не поддающиеся воздействию хлора, не придает воде запаха и привкуса. Но при этом обладает сильными коррозионными свойствами и кратковременным действием. Поэтому все элементы озонаторных установок и трубопроводы, контактирующие с озоном или его водными растворами, должны изготавливаться из нержавеющей стали и алюминия, а после обеззараживания озоном воду хлорируют для образования в воде требуемого остаточного хлора.

При нормальных температуре и давлении озон представляет собой газ бледно-фиолетового цвета, превращающийся при температуре  $-111,9\text{ }^\circ\text{C}$  в нестойкую жидкость темно-синего цвета, температура плавления озона  $-192,5\text{ }^\circ\text{C}$ .

Чистый озон взрывоопасен, поскольку при его разложении высвобождается значительное количество энергии. Нижний предел взрываемости озono-воздушной смеси в объемных единицах составляет около 5 % - 3 %. В водном растворе, особенно в слабощелочном, озон диссоциирует быстрее, чем в воздухе, в кислотных растворах озон проявляет большую стойкость. Озон токсичен и может поражать органы дыхания, его максимальная концентрация в воздухе рабочей зоны  $0,0001\text{ г/м}^3$ .

По сравнению с другими окислителями, например, хлором, озон имеет ряд *преимуществ*. Его можно получать непосредственно на очистных установках, причем сырьем служит технический кислород или атмосферный воздух. Использование озона не приводит к увеличению солевого состава очищаемых вод, не загрязняет их продуктами реакции. В процессе обработки воды озон подается в виде озono-воздушной или озono-кислородной смеси с концентрацией озона около 3 %.

С гигиенической точки зрения, озонирование – один из лучших способов обеззараживания питьевой воды, при этом обеспечиваются наилучшие органолептические показатели и отсутствие высокотоксичных и канцерогенных продуктов в очищенной воде.

Существенными *недостатками* метода являются: отсутствие длительного пролонгированного действия вследствие быстрого разру-

шения озона; возможность образования побочных продуктов (органические кислоты, альдегиды, кетоны и др.), а также дополнительных осадков, что требует фильтрования воды через активированный уголь.

В основе промышленного получения озона лежит реакция расщепления молекулы кислорода на атомы под действием тихого (коронного) электрического разряда с последующим присоединением к молекуле одного атома кислорода:



На практике озон получают в специальных аппаратах – *озонаторах* (генераторах озона), в которых воздух с определенной скоростью пропускается между электродами, соединенными с источником переменного тока высокого напряжения (5-25 кВ). Конструктивно электроды выполняются в виде двух концентрично расположенных цилиндров разного диаметра или в виде двух параллельных пластин (рисунок 4.3).

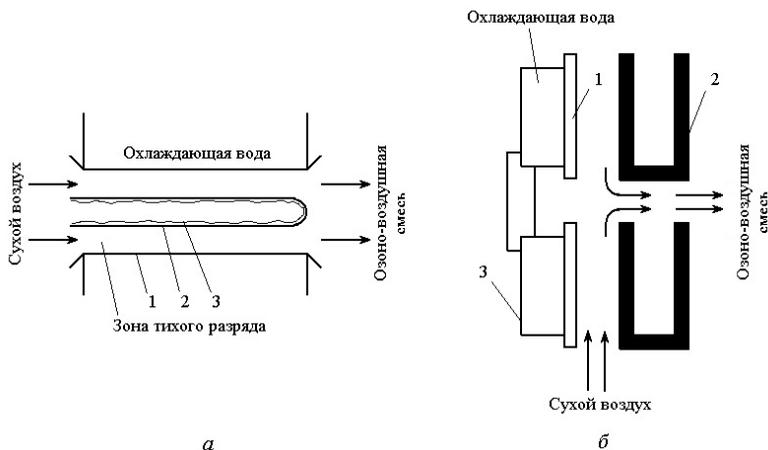
Для получения тихого разряда электроды озонаторов разделяются диэлектриком с возможно большим удельным поверхностным сопротивлением, исключающим образование искрового или дугового разряда и обуславливающим равномерную структуру тихого разряда. В качестве диэлектриков используют обычное или боросиликатное стекло, эмаль, пластмассы.

Трубчатые электроды выполняют из стекла, внутренняя поверхность их покрыта металлической амальгамой. Ее слой является электродом высокого напряжения, а само стекло диэлектрическим барьером.

В пластинчатых электродах диэлектриком является пластинка из обычного стекла, электрод низкого напряжения представляет собой полую пластину из листового алюминия, а электрод высокого напряжения – профилированную пластинку.

Разряд образуется в узком газовом пространстве между двумя электродами. Воздух движется вдоль оси озонирующих элементов в кольцевом пространстве между концентрически расположенными электродами трубчатого озонатора или двумя параллельными электродами пластинчатого озонатора.

(85-95) % потребляемой озонатором электроэнергии затрачивается на тепловыделение, поэтому электродную систему необходимо охлаждать, тем более что озон при повышенной температуре быстро разлагается.



*а* – трубчатый озонатор: 1 – трубка из нержавеющей стали (электрод низкого напряжения); 2 – стеклянная трубка (диэлектрик); 3 – фольга (электрод высокого напряжения)  
*б* – пластинчатый озонатор: 1 – пластинка из обычного стекла (диэлектрик); 2 – профилированные пластинки (высоковольтный электрод); 3 – полая пластинка из листового алюминия (электрод низкого напряжения)

Рисунок 4.3 – Размещение электродов и диэлектрика в озонаторе

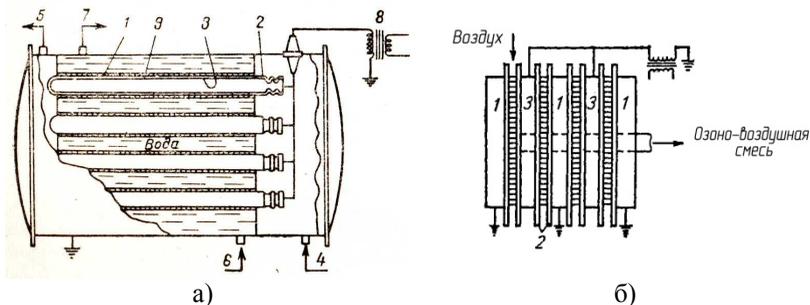
Производительность озонатора и расход электроэнергии на получение озона зависят от влагосодержания поступающего воздуха, его температуры, содержания кислорода, а также от конструкции озонатора. Наиболее сильно на синтез озона влияет наличие в исходном газе водяного пара, даже небольшая влажность заметно понижает концентрацию озона. Производительность озонатора значительно возрастает при обогащении воздуха кислородом, для чего применяют цеолиты, селективно сорбирующие из него азот. При этом одновременно с обогащением кислородом происходит и глубокая осушка воздуха.

*Промышленные генераторы озона* подразделяются на *цилиндрические* с трубчатыми горизонтальными или вертикальными электродами, *плоские* с пластинчатыми электродами и центральным коллектором или продольной циркуляцией. Более совершенными считаются трубчатые аппараты, на них в настоящее время производится основное количество озона. Производительность таких аппаратов достигает 20 кг озона в час.

*Трубчатый озонатор* с горизонтально расположенными электродами 1 (низкого напряжения) и 3 (высокого напряжения) (рисунок 4.4, *а*) представляет собой аппарат, состоящий из цилиндрического корпуса и съемных сферических днищ. Для закрепления размещаемого

в корпусе озонатора пакета электродов и разделения его на три секции в нем установлены вертикальные опорные решетки.

Схема пластинчатого озонатора представлена на рисунке 4.4, б.



а) трубчатый:

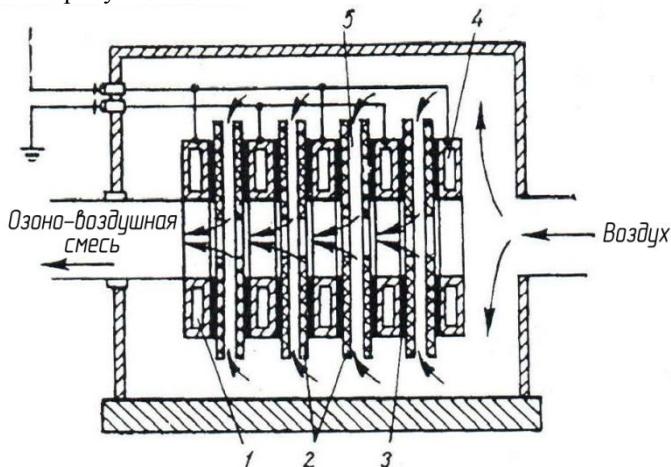
1 – электрод низкого напряжения (трубка из нержавеющей стали); 2 – диэлектрик (стеклянная трубка); 3 – электрод высокого напряжения (фольга);

б) пластинчатый:

1 – полые бруски (электрод низкого напряжения); 2 – стеклянные пластины (диэлектрик); 3 – высоковольтные электроды

Рисунок 4.4 – Аппараты для озонирования

Схема пластинчатого озонатора Отто и его внешний вид представлены на рисунке 4.5.

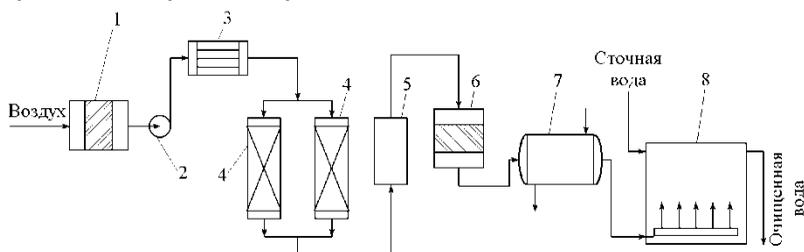


1 – пустотелый алюминиевый или чугунный элемент; 2 – стеклянные пластины; 3 – фольга или металлическая краска; 4 – высоковольтный электрод; 5 – разрядная полость

Рисунок 4.5 – Схема пластинчатого озонатора Отто

*Пластинчатый озонатор Отто* (рисунок 4.5) выполнен из прямоугольных параллельно размещенных пустотелых алюминиевых или чугунных элементов 1, между которыми установлены попарно стеклянные пластины 2 на расстоянии 3 мм друг от друга. К наружной поверхности элементов плотно прилегает слой фольги или металлической краски 3, выполняющий роль электрода. Элементы заземлены и охлаждаются циркулирующей в них водой. Элементы 1 и 4 являются высоковольтными электродами, находящимися под напряжением 20000 В при частоте 500 Гц. Воздух поступает в кожух озонатора, проходит через разрядные полости 5 и отводится выпускной трубой. Расход электроэнергии на 1 кг озона 18,1 кВтч.

Озонирование воды – достаточно сложный процесс, требующий объединения в одной установке устройств для компрессирования и кондиционирования воздуха, получения озона, смешения его с водой, рекуперации или разложения непрореагировавшего озона. Принципиальная *технологическая схема* озонирования (рисунок 4.6) состоит из двух основных узлов: получения озона и очистки сточных вод.



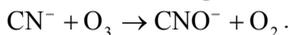
1 – воздушный фильтр; 2 – компрессор или воздуходувка; 3 – охлаждающее устройство; 4 – адсорберы для осушки воздуха; 5 – воздушонагреватель; 6 – пылевые фильтры; 7 – озонаторы; 8 – контактная камера

Рисунок 4.6 – Схема установки озонирования воды

Атмосферный воздух подают на фильтр 1, где он очищается от пыли, после чего воздуходувками 2 направляется на охлаждающее устройство 3 для отделения капельной влаги, а затем осушается на адсорбционных установках 4. Осушка воздуха является одним из основных этапов его подготовки перед получением озона и осуществляется в две ступени. На первой происходит предварительное охлаждение воздуха до (7-8) °С в холодильной установке рассолом, подаваемым от фреоновой холодильной установки. На второй воздух сушат в адсорберах с силикагелем или оксидом алюминия, здесь происходит также сорбция азота из воздуха и обогащение его кислородом. Осушенный воздух подвергается тонкой очистке от пыли в фильтре 6, а

затем направляется в озонатор 7, полученная озонозоооздушная смесь поступает в контактный резервуар 8.

Озонирование представляет собой процесс абсорбции, сопровождаемый химической реакцией в жидкой фазе:



Для усиления процесса окисления озонозоооздушную смесь диспергируют в воде на мельчайшие пузырьки газа.

В обрабатываемую воду озон вводят *различными способами*: барботированием воздушно-озонозооозвухи смеси в слое воды через фильтросные пластины или пористые трубки; смешением воды с озонозооозвухи смесью в эжекторах или механических роторных смесителях, в абсорберах различных конструкций. Время контакта 5-20 мин. Эффективность озонирования зависит от количества и свойств загрязняющих воду веществ, температуры и рН среды, от дозы озона и метода его диспергирования.

При водоподготовке доза озона составляет 0,75-3 мг/л, при доочистке сточных вод – 2-4 мг на 1 мг загрязнителя (нефтепродуктов, фенолов, ПАВ).

С целью предотвращения выбросов в атмосферу непрореагировавшего в контактных аппаратах озона, предусматривают установку деструкторов остаточного озона на выпуске отработанной озонозооозвухи смеси. Наибольшее применение нашли термические и термокаталитические методы разложения озона. В аппаратах термической деструкции газ нагревают до температуры от 340°C до 350°C в течение 3 с. Термокаталитический метод основан на разложении озона на кислород O<sub>2</sub> и атомарный кислород O при температуре от 60 ° C до 120 °C в присутствии катализаторов.

#### 4.2.4 Радиационное окисление

*Радиационное окисление* происходит под действием излучения высоких энергий. При этом в разбавленных водных растворах возникает большое число окислительных частиц, обуславливающих радиационно-химическое превращение примесей сточных вод.

Ионизирующее (проникающее) излучение, или радиация, представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение: рентгеновские и γ-лучи, высокоэнергетические заряженные частицы – электроны, протоны, α-частицы и др., а также быстрые нейтроны – частицы, не имеющие заряда.

В относительно разбавленных водных растворах радиационно-химические превращения протекают не за счет радиолитического загрязнения воды веществ, а за счет реакции этих веществ с продуктами радиолитического разложения воды: OH<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, H<sup>+</sup>, гидратированного электрона и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (в

присутствии кислорода). Окислителями являются  $\text{OH}^-$ ,  $\text{HO}_2^-$  и  $\text{H}_2\text{O}_2$ , а восстановителями  $\text{H}^+$  и гидратированный электрон.

В зависимости от условия проведения процесса примеси сточных вод могут вступать с продуктами радиолиза воды в различные реакции: окисления, восстановления, присоединения, отщепления и т. д., причем основным процессом глубокой очистки является радиационное окисление.

В качестве *источников излучения* могут использоваться продукты радиоактивного распада: радиоактивные  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), радиационные контуры, ускорители электронов, а также смеси продуктов деления, извлеченных из отработанных ТВЭЛов, т. е. *изотопные источники*. Радиоактивный  $^{60}\text{Co}$  считается наиболее удобным источником благодаря большой проникающей способности его излучения и практически любой форме источника, в которой он может быть изготовлен.  $^{60}\text{Co}$  получают нейтронным облучением высокочистого  $^{59}\text{Co}$  в атомном реакторе. Изготавливаются отдельные излучатели  $^{60}\text{Co}$  в виде стержней диаметром 11 мм и длиной 80 мм с удельной активностью 17-70 гэкв/г. Из таких стержней собирается установка-облучатель с любой расстановкой стержней в пространстве в зависимости от задачи, которая ставится при ее использовании.

Благодаря большой проникающей способности *кобальтовый источник* должен находиться в изолированном помещении, вне рабочего положения облучатель хранится в изолированной камере или под слоем воды, при этом должна обеспечиваться полная радиационная безопасность на рабочем месте. Специальные устройства позволяют легко перемещать облучатель из рабочего положения в хранилище и обратно. Кобальтовые источники не требуют сложного обслуживания, они долгое время могут находиться как в хранилище, так и в рабочем положении.

*Радиоактивный  $^{137}\text{Cs}$*  является одним из продуктов деления ядерного горючего. Он может быть выделен из отработанных и выдержанных в течение нескольких месяцев тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) ядерных реакторов. Благодаря более низкой энергии проникающая способность излучения  $^{137}\text{Cs}$  меньше, чем у  $^{60}\text{Co}$ , но тем не менее вполне достаточна для использования в целях очистки воды. Зато защита от излучения  $^{137}\text{Cs}$  значительно проще. Длительный период полураспада также является одним из положительных качеств этого источника.

*ТВЭЛы*, извлеченные из активной зоны реактора, имеют высокую температуру и очень высокую, изменяющуюся во времени по энергии и интенсивности  $\gamma$ -активность. После отработки ТВЭЛы выдерживают в течение некоторого времени для снижения активности, именно тогда они могут быть использованы в качестве источника излучения. При-

менение ТВЭЛов в этих целях требует довольно сложного технического оформления, но при хорошей организации производства ТВЭЛы могут стать одним из наиболее дешевых излучателей.

В отличие от рассмотренных выше изотопных источников, в которых поток излучения является следствием радиоактивного распада, протекающего самопроизвольно, *ускорители* представляют собой *источники машинного типа*, позволяющие получать или прекращать поток заряженных частиц по желанию человека. При помощи ускорителей можно получать пучок любых заряженных частиц – электронов, протонов и т. д., для целей очистки имеют значение только ускоренные электроны.

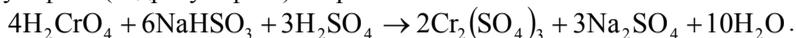
Радиоактивное излучение можно использовать для очистки от различных органических и неорганических соединений: фенолов, ПАВ, красителей, инсектицидов, лигнина, цианидов и др. Продукты разложения этих соединений не оказывают отрицательного влияния на биологическую очистку, а облученные сточные воды радиационно-безопасны. Кроме того, при радиационной очистке происходит обеззараживание воды, снятие цветности, устранение привкусов и запахов.

Радиационная очистка обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами. Невысокие капитальные затраты и малые производственные площади, небольшая продолжительность контакта с водой, возможность обработки осадков, высококонцентрированных сточных вод и их обеззараживание, простота аппаратного оформления, очистка от самых различных видов загрязнений, сочетание с другими методами.

### 4.3 Восстановление

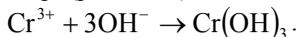
Процесс *восстановления* примесей при очистке сточных вод от токсичных соединений применяется в тех случаях, когда эти соединения являются легко восстанавливаемыми веществами. Метод широко используется для удаления соединений ртути, хрома, мышьяка.

Очистка сточных вод, содержащих *шестивалентный хром*, основана на восстановлении его до трехвалентного с последующим осаждением в виде гидроксида в щелочной среде. Для восстановления могут быть использованы активный уголь, диоксид серы, сульфат закисного железа, бисульфит натрия, водород, пиритный огарок и др. На практике для восстановления чаще всего используют растворы бисульфита (гидросульфита) натрия:

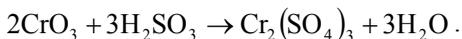
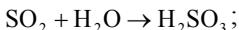


Реакция протекает быстро при pH=3-4 и избытке  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Для осаждения *трехвалентного хрома* применяют щелочные реагенты:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$  и др. (pH=8-9,5):



Восстановление диоксидом серы происходит по реакциям:



Оптимальные условия при  $\text{pH}=2-2,5$ . В последнем случае можно использовать отходящие газы, содержащие  $\text{SO}_2$ . Восстановление проводится в колонном аппарате. При этом происходит не только удаление из сточных вод токсичных соединений хрома, но и очистка отходящих газов от  $\text{SO}_2$ .

При очистке сточных вод *от ртути* ее восстанавливают до металлической, а затем отделяют от воды отстаиванием, фильтрованием, флотацией. Для восстановления ртути и ее соединений используют сульфид железа, гидросульфид натрия, сероводород, железный порошок, алюминиевую пудру и др.

*Мышьяк*, находящийся в сточных водах в виде кислородосодержащих молекул и анионов, а также анионов тиосолей  $\text{AsS}_2^-$ ,  $\text{AsS}_3^{3-}$ , осаждают в виде труднорастворимых соединений. Для этого используют диоксид серы, который восстанавливает мышьяковую кислоту  $\text{H}_3\text{AsO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  до мышьяковистой  $\text{H}_3\text{AsO}_3$ . Мышьяковистая кислота имеет небольшую растворимость в кислой и нейтральной средах и осаждается в виде триоксида мышьяка. Применяют также известковое молоко, сульфид натрия, сероводород.

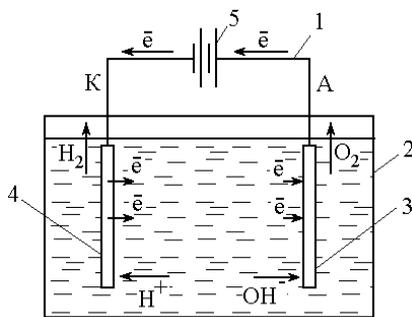
### Контрольные вопросы

1. Нейтрализация сточных вод, реакция нейтрализации
2. Способы нейтрализации
3. Нейтрализация реагентами
4. Основное оборудование станции нейтрализации
5. Схема нейтрализации
6. В каких случаях применяется химическое окисление
7. Состояние хлора и хлорсодержащих соединений в водной среде
8. Хлорсодержащие реагенты
9. Окисление цианидов хлором или гипохлоритами
10. Когда используется окисление кислородом воздуха
11. Обработка воды озоном, свойства озона
12. Конструктивное выполнение электродов озонаторов
13. Конструкции промышленных озонаторов
14. Факторы, влияющие на получение озона
15. Схема озонирования воды
16. Источники излучения при радиационном окислении примесей
17. Преимущества и недостатки радиационной очистки
18. Удаление примесей восстановлением
19. Реагенты-восстановители
20. Апаратурное оформление процесса восстановления

## ГЛАВА 5. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

### 5.1 Физико-химические основы методов

При погружении в воду электродов и подводе к ним достаточного напряжения начинается процесс переноса электрического тока движущимися к электродам ионами в электролите, которым является вода, и электронами во внешней цепи (электролиз). Устройства, в которых проводят те или иные процессы *электрохимического воздействия* на водные растворы, имеют общее название – *электролизеры* (рисунок 5.1).



1 – внешняя цепь; 2 – емкость; 3 – анод; 4 – катод; 5 – источник питания

Рисунок 5.1 – Схема электролизера

Вода поступает в емкость 2, в которую погружены два электрода: 3 – анод, 4 – катод, соединенные с источником постоянного тока 5. Под действием электрического поля положительно заряженные ионы мигрируют к отрицательному электроду – катоду 4, а отрицательно заряженные ионы – к положительному электроду – аноду 3. На электродах происходит переход электронов. Катод отдает электроны в раствор, и в прикатодном пространстве происходят процессы *восстановления*. В прианодном пространстве протекают процессы переноса электронов от реагирующих частиц к электроду – *окисление*.

При *электролизе* сточных вод на катоде выделяется газообразный водород и разряжаются растворенные в воде ионы металлов с образованием катодных осадков соответствующих металлов, происходит восстановление некоторых присутствующих в воде ионов и органических веществ с образованием новых соединений. На аноде из веществ, не подвергающихся электролитическому растворению, в зависимости от солевого состава сточных вод и условий электролиза выделяются кислород и галогены, окисляются некоторые присутствующие в сточных водах ионы и молекулы с образованием других ионов и молекул.

Иногда электроды отделяют один от другого полупроницаемой перегородкой (диафрагмой или ионообменной мембраной) на анодное и катодное пространство. Тогда вода либо последовательно проходит через каждую из образовавшихся камер, либо циркулирует в одной из них.

В зависимости от природы процессов, протекающих в таких аппаратах и обеспечивающих извлечение или обезвреживание загрязняющих компонентов, они подразделяются на *анодное окисление* и *катодное восстановление*, *электрокоагуляцию*, *электрофлотацию*, *электродиализ*. Одновременно в межэлектродном пространстве происходят процессы электролиза, поляризации, электрофореза и др. Продукты электролиза могут взаимодействовать друг с другом с образованием нерастворимых солей. Все эти процессы протекают на электродах при пропускании через сточную воду постоянного электрического тока.

*Аноды* из железа, алюминия и некоторых других металлов под действием постоянного электрического тока подвергаются электролитическому растворению с образованием нерастворимых в воде оксигидратов или основных солей соответствующих металлов, способных к коагуляции.

Электрохимические методы *позволяют извлекать* из воды ценные продукты при относительно простой автоматизированной технологической схеме очистки, без использования химических реагентов. Установки компактны, просты в эксплуатации. *Недостатки* – большой расход электроэнергии и металла, загрязнение поверхности электродов, что требует их очистки.

В процессе *электрохимической очистки* токсичные вещества могут превращаться в нетоксичные или малотоксичные соединения, переходить в газообразное состояние, выпадать в осадок, флотироваться в виде пены, осаждаться на катодах (металлические осадки).

Методом *электродиализа* можно удалять из сточных вод соли, кислоты и щелочи с одновременной их регенерацией. Электрохимические методы очистки сточных вод различных производств от цианидов, роданидов, нитросоединений, аминов, спиртов, альдегидов, сульфидов, меркаптанов, красителей и других основаны на анодном окислении указанных веществ. Катодное извлечение металлов применяют на предприятиях цветной металлургии, металлообработки, химической промышленности.

*Электрокоагуляция* и *электрофлотация* используются для обработки сточных вод, содержащих эмульгированные частицы масел, жиров и нефтепродуктов, хроматы, фосфаты.

Электролиз проводят в проточных или контактных условиях. Проточные электролизеры могут быть непрерывного или периодического действия, с многократной циркуляцией сточных вод или без нее.

*Эффект очистки* электрохимическими методами зависит от исходных свойств сточной воды (рН, температуры, общего содержания солей), а также от применяемых материалов для электродов и расстояния между ними, плотности тока, расхода электроэнергии, наличия диафрагм и их материала, а также интенсивности массообмена (перемешивания) в процессе электролиза.

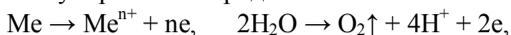
Применение электрохимических методов целесообразно при относительно высокой электропроводности сточных вод, обусловленной наличием в них неорганических кислот, щелочей или солей (при минимальной концентрации солей, равной 0,5 г/л).

## 5.2 Электрокоагуляция и электрофлотация

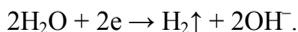
Метод очистки сточных вод в электролизере с *растворимыми электродами* называется *электрокоагуляцией*. Для изготовления анодов используют железо (сталь), алюминий, магний, часто и катоды выполняют из такого же материала, что позволяет повысить ресурс работы аппарата, периодически изменяя полярность электродов (реверс тока).

Электроды бывают трех типов: *пластинчатые, объемнопористые и псевдооживленные*. В первых двух типах раствор проходит через каналы электродов. *Пластинчатый электрод* представляет собой блок из пластин с зазором для протекания раствора в направлении, перпендикулярном протеканию электрического тока. К *объемнопористым (насыпным) электродам* относятся кассеты из полимерного материала (полипропилена), загруженные отходами металла, например, металлической стружкой, которую добавляют по мере ее расходования. *Псевдооживленные электроды* представляют собой подвижные слои электропроводного материала (металла, графита) с расположенными в объеме слоя токосборниками.

Процессы, протекающие в электрокоагуляторах на электродах и в объеме раствора, определяются природой материала электродов, рН раствора и примесей, содержащихся в воде. При наложении электрического поля *металлический анод растворяется* (ионизируется), на нем выделяются пузырьки кислорода:

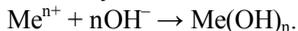


на *катоде* происходит преимущественно *разряд молекул* воды и образование водорода:



Выделяющиеся на электродах пузырьки газа флотируют примеси и *одновременно с электрокоагуляцией идет процесс электрофлотации*.

Перешедшие в воду катионы железа или алюминия, встречаясь с гидроксильными группами, образуют гидроксиды металлов в виде хлопьев, наступает интенсивная коагуляция:



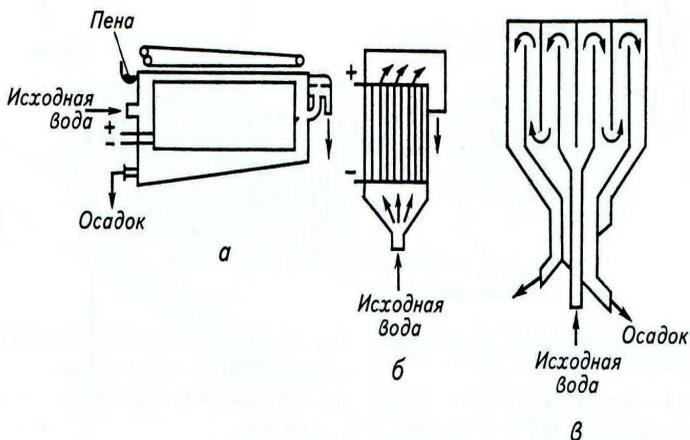
Одновременное образование хлопьев коагулянтов и пузырьков газа определяет *совместное протекание процессов коагуляции и флотации*, поэтому такие установки называются электрокоагуляционно-флотационными. При небольших объемах сточных вод (10-15 м<sup>3</sup>/ч) установки могут быть однокамерными, при больших – двухкамерными или многокамерными.

*На процессы электрокоагуляции и электрофлотации оказывает также влияние* расстояние между электродами, скорость движения воды между электродами, ее температура и состав, напряжение и плотность тока. С повышением концентрации взвешенных веществ более 100 мг/л эффективность электрокоагуляции снижается. С уменьшением расстояния между электродами уменьшается расход энергии на анодное растворение металла. Степень использования металла электродов составляет (50-90) % и зависит от конструкции коагуляторов, материала анода и состава очищаемой воды.

Теоретический расход электроэнергии и плотность тока зависят от материала электродов. Расстояние между электродами: для стальных 5-10 мм, алюминиевых – 12-15 мм; плотность тока – 150-250 А/м<sup>2</sup> для стальных и 80-120 А/м<sup>2</sup> для алюминиевых электродов; скорость движения воды между электродами от 0,03 до 0,5 м/с.

*Электрокоагулятор* представляет собой корпус прямоугольной или цилиндрической формы, в который помещают электродную систему – ряд электродов. Обработанная вода протекает между электродами, которые обычно располагаются вертикально, бывают плоскими и цилиндрическими. С внешней стороны к корпусу на изоляторах крепят две токоподводящие медные шины, которые соединяют с электродами.

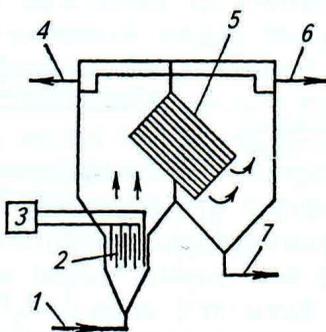
На рисунке 5.2 приведены различные варианты конструкций электрокоагуляторов в зависимости от направления и количества потоков, расположения электродов.



*a* – однопоточный; *б* – многопоточный с вертикальным движением воды; *в* – многопоточный со смешанным движением воды

Рисунок 5.2 – Виды электрокоагуляторов

Как правило, электрокоагулятор служит только для образования гидроксидов металлов и агрегации частиц; процесс разделения фаз происходит в отстойниках или гидроциклонах. Однако есть аппараты, в которых эти процессы протекают одновременно в одной камере. Электрокоагулятор, совмещенный с тонкослойным отстойником, приведен на рисунке 5.3.



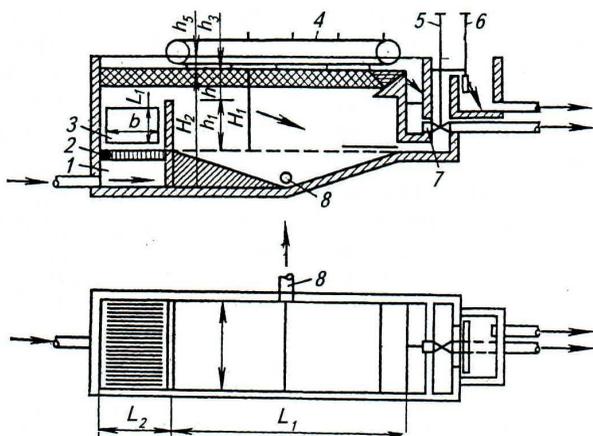
1 – ввод исходной сточной воды; 2 – электродный блок; 3 – выпрямитель; 4 – отвод уловленных нефтепродуктов; 5 – тонкослойный блок; 6 – отвод очищенной воды; 7 – отвод осадка

Рисунок 5.3 – Электрокоагулятор, совмещенный с тонкослойным отстойником

Исходная вода 1 поступает в электродный блок 2, а затем в тонкослойный блок 5 отстойной зоны. Нефтепродукты всплывают вверх и отводятся через лоток 4, очищенная вода собирается водосборным лотком и выводится через регулятор уровня 6. Отвод осадка 7 производится снизу.

*Электрофлотаторы* разделяют по направлению движения воды и флотирующихся газов на прямо- и противоточные, по расположению электродов – на горизонтальные и вертикальные.

Двухкамерная установка горизонтального типа, состоящая из электродного отделения и отстойной части, приведена на рисунке 5.4.



- 1 – впускная камера; 2 – решетка-успокоитель; 3 – электродная система;  
4 – скребки; 5 – регулятор отвода шлама; 6 – регулятор уровня на выпуске  
воды; 7 – шламоприемник; 8 – отвод осадка

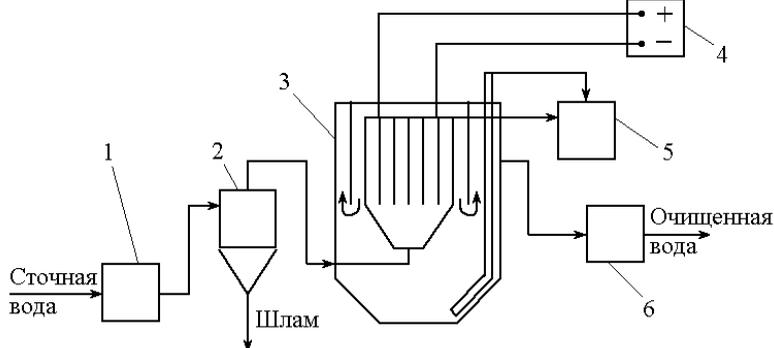
Рисунок 5.4 – Горизонтальный электрофлотатор

Исходная вода через впускную камеру 1 и решетку-успокоитель 2 проходит через электродную систему 3 и далее поступает в отстойную часть. Скребками 4 сгребаются всплывшие примеси и отводятся через регулятор 5 в шламоприемник 7. Осадок отводится через трубу 8 внизу отстойника, очищенная вода – через регулятор 6 в верхней части.

Метод электрокоагуляции может быть применен для очистки вод при невысоком содержании коллоидных примесей и низкой устойчивости загрязнений, например, эмульгированных частиц масел, жиров и нефтепродуктов (с алюминиевыми электродами), хроматов (со стальными электродами), тяжелых металлов, фосфатов, некоторых полимеров и др. Реакция среды при этом должна быть нейтральной или слабокислой.

Начальная концентрация при очистке электрокоагуляцией масло-содержащих сточных вод (отработанных смазочно-охлаждающих

жидкостей) – не более 10 г/л; шестивалентного хрома и ионов цветных металлов до 100 мг/л, при концентрации каждого из ионов металлов до 30 мг/л, взвешенных веществ до 50 мг/л. *Эффективность очистки* от масел (54-68) %, от жиров (92-99) %. На рисунке 5.5 приведена технологическая схема установки очистки сточных вод электрокоагуляцией.



1 – механический фильтр; 2 – гидроциклон; 3 – электрокоагулятор-отстойник; 4 – источник тока; 5 – сборник нефтепродуктов; 6 – фильтр

Рисунок 5.5 – Электрокоагуляционная установка для очистки сточных вод от нефтепродуктов

Обрабатываемая вода проходит сначала предварительную грубую очистку в механическом фильтре 1 и гидроциклоне 2. Процесс электрокоагуляции происходит в электрокоагуляторе-отстойнике 3 со встроенной в него электродной системой, к которой подается постоянный электрический ток от источника 4. Часть скоагулированных примесей флотируется, другая осаждается в нижней части аппарата. Флотируемые продукты из верхней части аппарата и осадок из нижней отводятся в сборник 5, откуда направляются на дальнейшую переработку. Осветленная вода, пройдя фильтр 6, используется в оборотной системе водоснабжения.

### 5.3 Электрохимическое окисление и восстановление

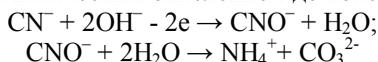
*Анодное окисление и катодное восстановление* составляют основу процесса электролиза, происходящего в электролизере. Электрохимическую обработку целесообразно применять при очистке концентрированных органических загрязнений, растворенных неорганических соединений, ионов тяжелых металлов при небольших расходах сточных вод. При этом из воды могут быть удалены цианиды, роданиды, амины, спирты, альдегиды, нитросоединения, сульфиды, меркаптаны, ионы тяжелых металлов  $Pb^{2+}$ ,  $Sn^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $As^{3+}$  и др. На

положительном электроде – *аноде* – ионы отдают электроны, т. е. протекает *реакция электрохимического окисления*. В процессах электрохимического окисления органические вещества, находящиеся в сточной воде, полностью распадаются с образованием  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  (или  $\text{N}_2$ ) и воды или образуют простые и нетоксичные вещества, которые можно удалить другими методами. При *электрохимическом восстановлении на отрицательном электроде – катоде* – происходит присоединение электронов, т.е. протекает *реакция восстановления*.

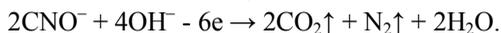
В качестве *анодов* используют различные электролитически нерастворимые материалы: графит, магнетит, диоксиды свинца, марганца и рутения, которые наносятся на титановую основу. В качестве *катодов* обычно применяют легированную сталь, сплавы вольфрама с железом или никелем, цинк, свинец.

Чтобы предотвратить смешение продуктов электролиза, особенно газов, которые могут образовывать взрывоопасные смеси (водорода и кислорода), применяют керамические, полиэтиленовые, асбестовые и стеклянные диафрагмы, разделяющие катодное и анодное пространство.

Процесс *анодного окисления* осуществляется в электролитических ваннах, разделенных на несколько отсеков, в которых обрабатываемые воды перемешиваются сжатым воздухом. При электролизе щелочных вод, содержащих цианиды (не менее 100 мг/л), на *аноде* происходит *окисление* цианид-ионов с образованием цианат-ионов и дальнейшим их электрохимическим окислением до конечных продуктов:

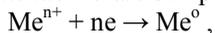


или

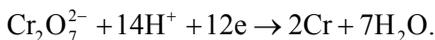


В целях повышения электропроводности сточных вод, снижения расхода электроэнергии и интенсификации процесса окисления в сточные воды добавляют минеральные соли, чаще всего  $\text{NaCl}$  (до 30 г/л).

*Катодное восстановление* металлов происходит по схеме:



при этом металлы осаждаются на катоде и могут быть рекуперированы. Например, реакция восстановления хрома протекает следующим образом:



Частицы металла отрываются от катода под действием сил тяжести и оседают в нижнюю часть аппарата.

На процесс электролиза влияет анодная плотность тока (100-150  $\text{A}/\text{m}^2$ ), межэлектродное пространство (3 см для анодного окисления), скорость движения воды, pH, конструкция электродов.

Как и в электрокоагуляции при электрохимическом окислении и восстановлении используют плоские и объемные электроды. Последние имеют преимущество при извлечении металлов из сильно разбавленных растворов.

*Эффект очистки* рассмотренными методами составляет (80-100) %. Локальные установки по электрохимическому окислению и восстановлению применяются на предприятиях машиностроительной, приборостроительной, химической, нефтехимической целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности.

## 5.4 Электродиализ

Процесс очистки сточных вод *электродиализом* основан на разделении ионизированных веществ под действием электродвижущей силы, создаваемой в растворе по обе стороны мембран. Этот процесс широко применяется для опреснения высокоминерализованных природных вод. В последнее время его начали использовать для очистки производственных сточных вод.

Электродиализ осуществляется в многокамерных *электродиализаторах* под действием постоянного электрического тока, направленного перпендикулярно плоскости мембран. В простейшем случае электродиализатор состоит из двух-трех камер, разделенных перегородками (диафрагмами). Одна мембрана – анионитовая, отделяет камеру, где помещают анод, другая катионитовая, камеру с катодом (рисунок 5.6).

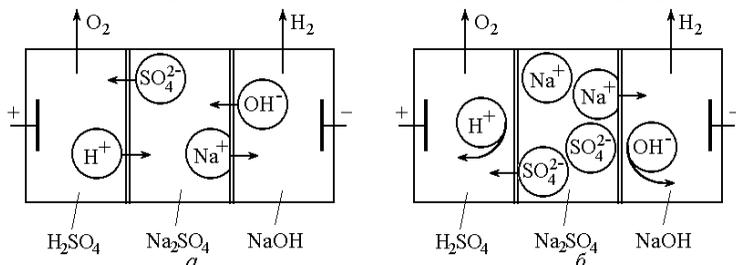


Рисунок 5.6 – Схемы электродиализаторов с пористыми инертными диафрагмами (а) и ионитовыми мембранами (б)

Двухкамерные электролизеры имеют катодную и анодную камеры, трехкамерные – катодную, анодную и межэлектродную. Обрабатываемая вода поступает в одну из камер, а в других камерах находятся растворы электролитов (кислот, щелочей или солей).

В трехкамерном электродиализаторе под воздействием постоянного тока катионы, двигаясь к катоду, проникают через катионитовые мембраны, но задерживаются анионитовыми, а анионы, двигаясь

в направлении анода, проходят через анионитовые мембраны, но задерживаются катионитовыми. При этом на аноде выделяется кислород и образуется кислота, на катоде – водород и образуется щелочь. В многокамерных электролизерах в результате переноса ионов через мембраны удаляются из воды минеральные соли, кислоты и щелочи с одновременным концентрированием их в отдельных камерах. По мере прохождения тока концентрация солей в средней камере уменьшается до тех пор, пока не станет близкой к нулю.

Для диафрагм используются *инертные пористые* природные и синтетические *материалы* (асбест, стеклоткань, уплотненная хлориновая ткань, мипор и др.), а также *электрохимически активные селективные ионитовые мембраны*. Катионитовые мембраны изготавливают на основе катионитовых ионообменных смол, анионитовые – на основе анионообменных смол. Для повышения прочности ионитовые мембраны армируют капроновой или лавсановой сеткой.

В случае использования инертных мембран за счет диффузии в среднюю камеру поступают ионы  $H^+$  и  $OH^-$ , образуя воду и замедляя процесс переноса ионов соли к соответствующим электродам.

*Мембраны для электродиализа* изготавливают в виде гибких листов прямоугольной формы или рулонов из термопластичного полимерного связующего и порошка ионообменных смол. Применяют *гомогенные* и *гетерогенные мембраны*. Гомогенные состоят только из одной смолы и имеют малую механическую прочность; гетерогенные представляют собой порошок ионита, смешанный со связующим веществом - каучуком, полиэтиленом, полистиролом и др.

При использовании электрохимически активных (ионообменных) диафрагм повышается эффективность процесса и снижается расход электроэнергии. Ионообменные мембраны проницаемы только для ионов, имеющих заряд того же знака, что и у подвижных ионов. Катоды и аноды изготавливают из стойких к окислению материалов: платины, магнетита, графита, платинированного титана.

Обычно *электродиализаторы* для очистки воды состоят из 100-200 камер с чередующимися катионо- и анионопроницаемыми мембранами. Расстояние между мембранами составляет 1-2 мм. Расход энергии  $-7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$  при снижении соледержания с 250 до 5 мг/л. Установки собирают из нескольких блоков, количество которых зависит от расхода сточных вод. Число ступеней обессоливания в блоке (последовательно установленных аппаратов) определяется необходимой степенью снижения соледержания. Основной недостаток процесса – концентрационная поляризация, приводящая к осаждению солей на поверхности мембраны и снижающая показатели очистки.

*Технологические схемы* электродиализаторных установок (ЭДУ) состоят из следующих узлов: 1) аппаратов предварительной подготовки воды для очистки от взвешенных и коллоидных частиц; 2) собст-

венно электродиализной установки; 3) кислотного хозяйства и системы сжатого воздуха; 4) фильтров, загруженных активированным углем, бактерицидных установок.

Электродиализные опреснительные установки разделяются на *прямоточные* и *циркуляционные*. В одно- и многоступенчатых прямоточных установках заданное опреснение воды происходит в процессе ее протекания через ячейки ванны. В циркуляционных – опресняемая вода многократно пропускается через ячейки ванны до тех пор, пока содержание в ней солей не снизится до заданного, они бывают периодического и непрерывного действия. Выбор установки осуществляется на основе технико-экономических расчетов.

Достоинством электродиализного метода является отсутствие агрегатного изменения воды, проведение процесса при температуре окружающей среды.

### **Контрольные вопросы**

1. Общая характеристика электрохимических методов очистки вод, их классификация
2. Схема электролизера
3. Очистка сточных вод электрокоагуляцией, протекающие при этом процессы
4. Типы электродов
5. Совмещенные процессы электрокоагуляции и электрофлотации
6. Виды электрокоагуляторов
7. Схема электрокоагуляционной установки
8. Анодное окисление
9. Катодное восстановление
10. Электродиализ, его применение
11. Мембраны для электродиализа
12. Технологические схемы электродиализаторных установок

## ГЛАВА 6. ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

*Термические методы* используются для удаления из сточных вод как минеральных примесей, так растворенных и нерастворенных органических веществ.

Для обезвреживания *минерализованных стоков* применяют методы, позволяющие выделить из них соли с получением воды, пригодной для оборотного водоснабжения. Процесс удаления минеральных веществ из воды может быть проведен в *две стадии: концентрирование* сточных вод и *выделение сухих веществ*. Для этого используют установки *термического концентрирования* растворов: *испарительные* (выпарные и адиабатные), *вымораживающие* (вакуумные и с холодильным агентом), *кристаллогидратные* (холодильные и теплоиспользующие). Выделение сухого продукта происходит в основном сушкой. Нередко вторую стадию заменяют захоронением концентрированных растворов.

К *термоокислительным методам* обезвреживания сточных вод, содержащих органические примеси, относятся *парофазное окисление* (огневой или плазменный метод), *жидкофазное окисление*, *парофазное каталитическое окисление*. Сущность этих методов состоит в окислении примесей кислородом воздуха при повышенной температуре до нетоксичных соединений. По теплотворной способности сточные воды подразделяются на способные гореть самостоятельно и воды, для термоокислительного обезвреживания которых необходимо добавлять топливо. Последние имеют энтальпию ниже 8400 кДж/кг.

Установки термического обезвреживания сточных вод должны обеспечивать снижение концентрации вредных веществ в очищенной воде до значений, меньших ПДК, иметь незначительную чувствительность к составу стоков, обеспечивать надежность и экономичность в работе, иметь высокую производительность.

Выбор метода зависит от объема сточных вод, их состава, теплотворной способности, коррозионной активности, экономичности процесса, требований, предъявляемых к очищенным водам. Термические методы энергоемки, для их проведения требуется оборудование из нержавеющей сталей и титана, как правило, применяют их для обезвреживания небольших количеств концентрированных сточных вод.

### 6.1 Концентрирование минерализованных сточных вод

Концентрирование минерализованных сточных вод проводится в *испарительных, вымораживающих и кристаллогидратных* установках непрерывного и периодического действия (рисунки 6.1).



Рисунок 6.1 – Классификация установок термического концентрирования растворов

В качестве испарительных установок для концентрирования растворов в промышленности наиболее распространены трубчатые выпарные аппараты различных конструкций, с естественной и принудительной циркуляцией. Они могут быть одно- и многоступенчатыми, чаще 4-5 корпусными.

Применяются *выпарные аппараты* с трубчатыми греющими камерами с естественной или принудительной циркуляцией специальным насосом, с внутренней или вынесенной зоной кипения.

В аппаратах с *естественной циркуляцией* движение раствора осуществляется благодаря разности плотностей парожидкостной смеси в зоне кипения и раствора вне ее. В аппаратах с внутренней зоной кипения греющая камера размещается внутри корпуса (рисунок 6.2).

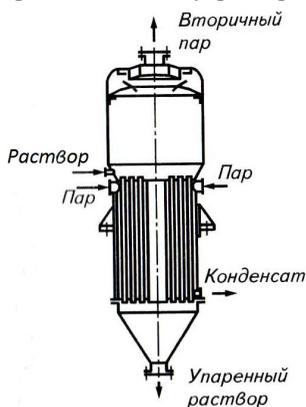
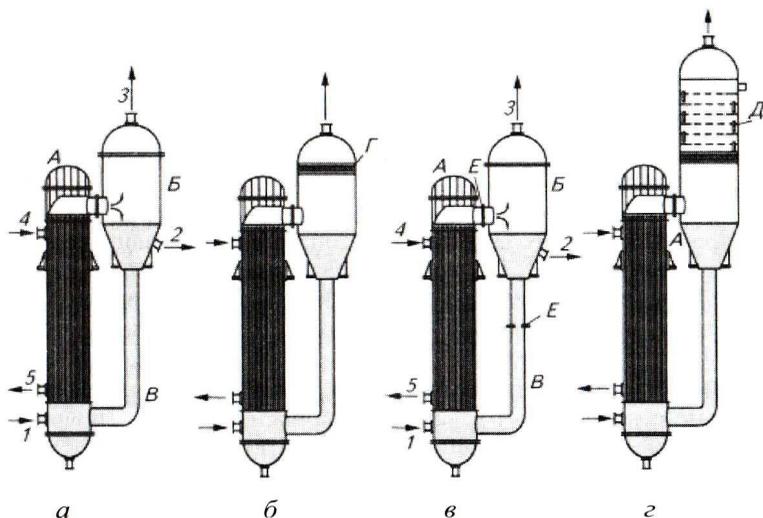


Рисунок 6.2 – Выпарной аппарат с центральной циркуляционной трубой

В аппаратах с *вынесенной зоной кипения* над греющей камерой установлена дополнительная подъемная труба, в которой происходит кипение. Для предотвращения капельного уноса жидкости используются сепараторы, в которых происходит разделение упаренного раствора и вторичного пара. Для очистки пара от мелких капель применяют жалюзийные отбойники. При более глубокой очистке паров используют барботажные устройства в виде насадочных или тарельчатых колонн. При значительном пенообразовании применяют гидродинамический способ разрушения пены. Все варианты рассмотренных аппаратов с выносной греющей камерой приведены на рисунке 6.3. Выпарка происходит благодаря подводу теплоты извне, как правило, используют водяной пар давлением 1,2 МПа.



*a* – стандартный вариант; *б* – с жалюзийным отбойником;  
*в* – с дросселированием пены; *г* – с ректификационной колонной;

1 – подача исходного раствора; 2 – выход упаренного раствора; 3 – выход вторичного пара; 4 – ввод греющего пара; 5 – отвод конденсата греющего пара;

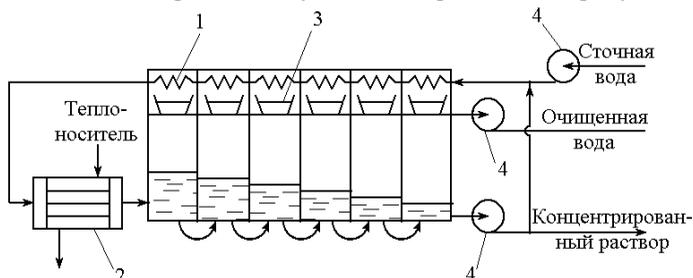
А – греющая камера; Б – сепаратор с кубовой частью; В – циркуляционная труба; Г – жалюзийный отбойник; Д – колонна тарельчатая ректификационная; Е – дроссель

Рисунок 6.3 – Выпарные аппараты с выносной греющей камерой

Применяются *пленочные аппараты* с падающей или восходящей пленкой. В зоне упаривания на валу закрепляются скребки, которые удаляют загустевший концентрат со стенок аппарата.

Новое поколение испарительного оборудования представлено *установками мгновенного вскипания* (УМИ), которые могут быть вер-

тикальными и горизонтальными, они относятся к *адиабатическим испарителям*. В них исходная вода проходит последовательно через каскад трубчатых теплообменников-конденсаторов, встроенных непосредственно в камеры испарения, в которых ее доводят до кипения и за счет тепла конденсации вторичных паров нагревают до температуры (82-85) °С. Затем воду направляют в головной подогреватель, где при подводе внешнего тепла она нагревается до (102-104) °С и попадает последовательно в ряд камер низкого давления, где происходит мгновенное вскипание и испарение жидкости. Схема многоступенчатой адиабатической испарительной установки приведена на рисунке 6.4.



1 – ступень испарения; 2 – подогреватель; 3 – поддон-сборник; 4 – насосы

Рисунок 6.4 – Схема многоступенчатой адиабатической испарительной установки

Сточная вода насосом 4 перекачивается через ступени испарения 1, где предварительно нагревается образующимися при испарении парами, и подается в подогреватель 2, из которого направляется в камеру испарения. Жидкость испаряется при переходе из одной камеры в другую. Из последней камеры раствор насосом 4 частично подается на рециркуляцию. Дистиллат, стекающий в поддон 3, насосом направляется потребителю. Такие установки нашли широкое применение для опреснения морской воды.

Многоступенчатые установки с испарителями-конденсаторами также, как и адиабатные испарительные установки, относятся к *дистилляционным опреснителям*. Основная функция их состоит в испарении воды с последующей конденсацией пара, которая приводит к получению чистой воды. Такие установки получили наибольшее распространение при высоком солевом содержании.

Высокий экономический эффект достигается при упаривании сточных вод в *скрубберах*, герметичных полых цилиндрах с коническим днищем. Сточная вода подается под давлением 0,5-0,6 МПа в распыливающие форсунки, расположенные в верхней части скруббера. Снизу поступают дымовые газы, имеющие температуру (900-1000) °С.

Для уменьшения высоты скруббера и обеспечения его устойчивой работы устанавливают вытяжные вентиляторы.

Для нагрева воды могут быть использованы *газообразные, жидкие и твердые теплоносители*. Чаще всего применяют водяной пар. На практике распространение получили *контактные аппараты*: с погружными горелками, барботажные, тарельчатые, насадочные, полочные, форсуночные. В аппаратах с погружными горелками упариваемая сточная вода нагревается при непосредственном контакте (барботаже) с дымовыми газами, полученными при сжигании газообразного или жидкого топлива в горелках, частично или полностью погруженных в жидкость. Стоимость выпаривания в таких аппаратах примерно в два раза ниже, чем в обычных выпарных аппаратах.

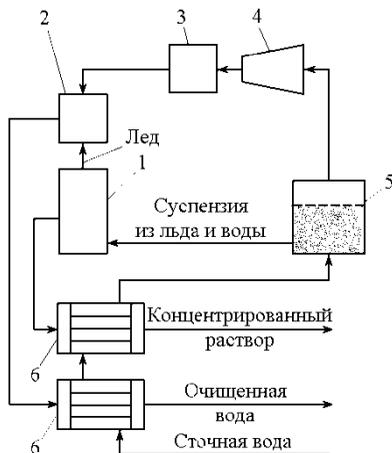
В выпарных установках с *гидрофобным теплоносителем* нагревание и испарение сточных вод происходит вследствие контакта их с жидким гидрофобным теплоносителем. В них возможно упаривать сточные воды до высоких концентраций, избежать отложения солей на теплообменных поверхностях, уменьшить коррозию оборудования. В качестве теплоносителей можно использовать парафины различных типов, минеральные масла, силиконы и др. Гидрофобный теплоноситель должен быть практически нерастворим в воде, не образовывать эмульсий, не сорбировать растворенные в воде соли, хорошо отделяться от воды, быть термически устойчивым и иметь высокую теплоемкость.

В *установках вымораживания* концентрирование минерализованных вод основано на том, что концентрация солей в кристаллах льда значительно меньше, чем в растворе. Процесс вымораживания заключается в том, что при температуре ниже температуры замерзания чистая вода образует кристаллы пресного льда, а рассол с растворенными в нем солями, размещается в ячейках между этими кристаллами. Температура замерзания рассола всегда ниже температуры замерзания чистой воды и зависит от концентрации растворенных солей. Вымораживание может происходить *под вакуумом* либо при помощи *специального холодильного агента (контактное вымораживание)*. Схема концентрирования растворов вымораживанием под вакуумом представлена на рисунке 6.5.

Лед образуется в кристаллизаторе 5 при подаче в него предварительно охлажденной в теплообменнике 6 исходной воды. Кристаллы льда и суспензия разделяются в промывной колонне 1, концентрированный раствор идет на охлаждение сточной воды, а лед плавится в конденсаторе-плавителе 2. Для создания вакуума в кристаллизаторе 5 и сжатия водяного пара до давления, отвечающего насыщению чистой воды при температуре ее замораживания, используют компрессор 4. Далее пары охлаждаются во вспомогательной холодильной установке 3 и конденсируются в конденсаторе-плавителе 2. Очищенная вода,

как и концентрированный раствор, поступает на охлаждение исходной воды.

При *контактном вымораживании* охлажденную воду направляют в кристаллизатор, куда добавляют не смешивающийся с водой хладагент (аммиак, диоксид углерода, бутан, пропан, хладоны и др.). Замораживание охлажденного раствора происходит при прямом контакте с хладагентом, который при испарении отделяется от суспензии льда в концентрированном растворе. Пары хладагента сжимают, подают в конденсатор-плаватель, где они конденсируются. Туда же поступает лед, отделенный от концентрированного раствора в плавителе. Воду и жидкий хладагент разделяют за счет разности их плотностей.



1 – промывная колонна; 2 – конденсатор-плаватель; 3 – вспомогательная холодильная установка; 4 – компрессор; 5 – кристаллизатор; 6 – теплообменники

Рисунок 6.5 – Схема установки концентрирования растворов вымораживанием под вакуумом

*Кристаллогидратный процесс* состоит в концентрировании воды с гидратообразующим агентом (аммиак, пропан, хлор, фреоны,  $\text{CO}_2$  и др.) и образовании кристаллогидратов. При переходе молекулы воды в кристаллогидраты концентрация растворенных веществ в воде повышается. При плавлении кристаллов образуется вода, из которой выделяются пары гидратообразующего агента. Процесс может происходить при температуре ниже и выше температуры окружающей среды, в первом случае необходимо применение холодильных установок, во втором - нет.

*Достоинством* вымораживающих и кристаллогидратных установок является низкий расход энергии и возможность обезвреживания

вод различного состава. *Недостатки*: дорогостоящие теплоносители, сложные технологические схемы, невысокая степень концентрирования растворов из-за трудности разделения кристаллов льда и вязкой суспензии и др. Поэтому указанные методы не нашли широкого применения в промышленности.

## 6.2 Термоокислительные методы обезвреживания жидких отходов

При использовании термоокислительных методов все органические вещества, загрязняющие сточные воды, полностью окисляются кислородом воздуха при высоких температурах до нетоксичных соединений.

Метод термоокислительного *жидкофазного обезвреживания* сточных вод (*мокрого сжигания*) состоит в окислении кислородом воздуха органических примесей сточных вод при температуре (100-350) °С и давлении, обеспечивающем нахождение воды в жидкой фазе (2-28 МПа). При высоких давлениях растворимость в воде кислорода значительно возрастает, что способствует ускорению процесса окисления органических веществ.

В зависимости от температуры и времени контакта окисление органических примесей происходит полностью или частично (до карбоновых и дикарбоновых кислот или других промежуточных продуктов). Вещества, летучие при условиях процесса, окисляются в основном в парогазовой фазе, а нелетучие – в жидкой. С увеличением концентрации органических примесей в воде экономичность процесса возрастает. Скорость реакций окисления растет с увеличением температуры.

Сточную воду смешивают с воздухом, нагнетаемым компрессором, подогревают очищенной водой в теплообменниках I и II ступени и подают в реактор, где происходит процесс окисления, сопровождаемый выделением тепла. Продукты окисления (пар, газ, зола) и воду направляют в сепаратор, где газы отделяются от жидкости и идут на утилизацию тепла. Вода с золой подогревают исходную смесь сточной воды с воздухом. Затем воду отделяют от золы.

С увеличением концентрации органических примесей в воде, экономичность процесса возрастает, т. к. исключается необходимость подогрева воды в теплообменниках, кроме пускового периода.

Конечные продукты жидкофазного окисления имеют высокую температуру и давление и, следовательно, обладают большой энергией, которую можно использовать для выработки электроэнергии и пара. Среди *достоинств* метода – возможность очистки большого количества сточных вод без предварительного концентрирования, отсутствие в продуктах окисления вредных веществ, универсальность, безопасность и др. *Недостатки*: неполное окисление некоторых веществ,

высокая стоимость оборудования, образование накипи на теплопередающих поверхностях, коррозия. Метод используется в целлюлозно-бумажной, фармацевтической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности.

Метод *парофазного каталитического окисления* заключается в каталитическом окислении кислородом воздуха при повышенной температуре в парогазовой фазе летучих органических веществ сточных вод. Применение этого метода целесообразно при выводе воды из технологического процесса в виде пара (из ректификационных колонн, выпарных аппаратов и др.). Водяной пар вместе с летучими органическими веществами подогревается в теплообменнике теплом парогазовой смеси, выходящей из контактного аппарата, и направляется в этот аппарат, загруженный катализатором. Процесс окисления протекает весьма интенсивно в паровой фазе при температурах (300-500) °С в присутствии меднохромового, цинкохромового, медномарганцевого или другого *катализатора*. Экономическая эффективность повышается в случае использования тепла, выделяющегося при окислении органических веществ. Очищенная вода (конденсат), как правило, может быть использована в системах оборотного водоснабжения. Установки парофазного каталитического окисления имеют большую производительность и высокую степень обезвреживания (до 99,8 %). Однако в них возможно отравление катализатора соединениями серы, фосфора, фтора.

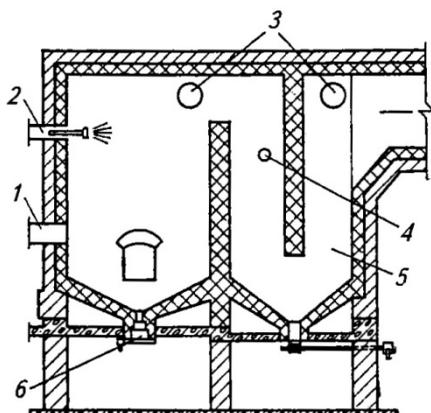
Самым эффективным и универсальным из термических методов обезвреживания сточных вод является *огневое (парофазное окисление) обеззараживание*. Сущность его заключается в распылении сточных вод в топочные газы, нагретые до температуры (900-1000) °С. Вода при этом полностью испаряется, а органические примеси сгорают. Минеральные примеси при этом образуют твердые или оплавленные частицы, которые выводятся из рабочей камеры печи или уносятся дымовыми газами.

Применение огневого метода целесообразно при обезвреживании небольшого количества сточных вод, содержащих высокотоксичные органические примеси, извлечение и обезвреживание которых другими методами невозможно или экономически нецелесообразно; при наличии горючих производственных отходов, которые могут быть использованы вместо топлива (кубовые остатки, сбрасываемые газы и т. п.); при извлечении растворенных ценных минеральных примесей. Метод отличается высоким расходом топлива и перегревом водяного пара.

При сжигании сточных вод различного состава могут образовываться оксиды щелочных и щелочноземельных металлов (CaO, MgO; BaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O и др.); органические соединения, содержащие серу, фосфор, галогены; газы SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, HCl, Cl<sub>2</sub> и др. Эти вещества

вызывают коррозию аппаратуры. Из сточных вод, содержащих нитросоединения, могут выделяться оксиды азота  $N_xO_y$ . В газовой фазе эти вещества вступают в сложные взаимодействия с образованием новых соединений, в т. ч. токсичных, что необходимо учитывать при удалении газов в атмосферу.

Для сжигания применяют *печи самых различных конструкций*: камерные, шахтные, циклонные, барабанные, с псевдоожиженным слоем. Простейшим аппаратом для огневого обезвреживания жидких отходов является *камерная печь* (рисунок 6.6), оборудованная горелочными устройствами для сжигания жидкого или газообразного топлива, форсунками для распыления жидких отходов 2 и соплами для подачи топлива 1. Печь представляет собой прямоугольную камеру из шамотного кирпича с тепловой изоляцией, разделенную двумя перевальными стенками на камеру сжигания и камеру для осаждения летучей золы из газовой фазы.

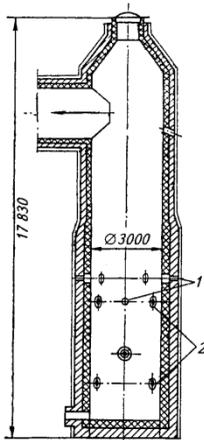


- 1 – форсунка для подачи мазута; 2 – форсунка для распыления стоков;  
 3 – взрывной клапан; 4 – люк для термопары; 5 – камера для осаждения  
 летучей золы; 6 – затвор для удаления жидкой золы

Рисунок 6.6 – Схема камерной печи

*Шахтные печи* представляют собой вертикальную цилиндрическую камеру, оборудованную горелочными устройствами 2 для жидкого и газообразного топлива (рисунок 6.7). Вода на сжигание подается через форсунки 1.

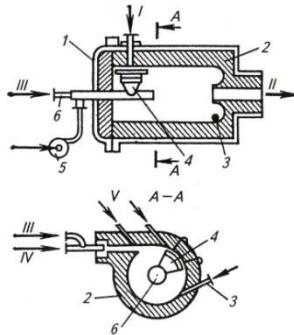
Камерные и шахтные печи более громоздки, менее производительны, требуют больших капитальных затрат. Используют их для сжигания сульфидных щелоков, сточных вод анилино-красочной промышленности, производств фенолоформальдегидных смол, капролактама, пластмасс и др.



1 – форсунки для подачи жидких отходов; 2 – горелки для жидкого и газообразного топлива

Рисунок 6.7 – Схема шахтной печи ГИАП

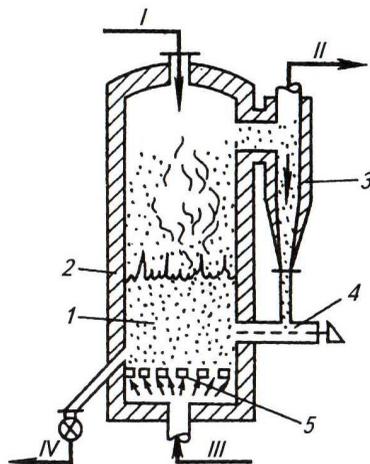
Наиболее эффективными и универсальными для огневого обезвреживания сточных вод являются *циклонные печи*. В них благодаря вихревому характеру газового потока создается интенсивный тепло- и массообмен между каплями сточной воды и газообразными продуктами (рисунок 6.8). Такие печи работают при больших удельных нагрузках, они могут быть горизонтальными и вертикальными. Воздух V тангенциально вводится в печь и совершает вращательное движение, перемещаясь вдоль оси цилиндра по спирали. Сточная вода IV подается форсункой тангенциально вместе с потоком топлива III, распыливается и сгорает. Недостаток – большой унос солей с газовым потоком.



I – вторичный воздух; II – дымовые газы; III – топливо; IV – сточная вода; V – воздух; 1 – крышка; 2 – корпус; 3 – штуцер для подачи вторичного воздуха; 4 – экран; 5 – воздуходувка; 6 – горелка

Рисунок 6.8 – Циклонная печь

В *псевдооживленных печах* газ III поступает под газораспределительную решетку 5, а вода I навстречу ему (рисунок 6.9). Обезвреживание сточных вод происходит в слое инертного нагретого до (800-900) °С твердого материала 1, в качестве которого используют кварцевый песок с размерами частиц 1-5 мм. Дымовые газы II проходят циклон 3 для очистки от твердых частиц оксидов металлов, которые отводятся шнеком 4 вместе с инертным материалом псевдооживленного слоя.

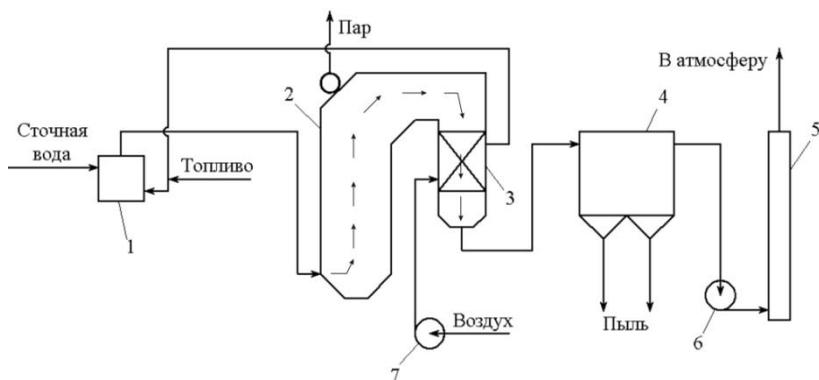


I – сточная вода; II – дымовые газы; III – псевдооживляющий газ; IV – твердый продукт; 1 – псевдооживленный слой; 2 – корпус печи; 3 – циклон; 4 – шнек; 5 – решетка

Рисунок 6.9 – Печь с псевдооживленным слоем

Разработан ряд технологических схем по *огневому обезвреживанию сточных вод*. Есть установки как с утилизацией тепла, так и без нее, с очисткой отходящих газов и без очистки. На рисунке 6.10 приведена *схема огневого обезвреживания сточных вод с котлом-утилизатором тепла и сухой газоочисткой*.

Сточная вода поступает в печь 1, куда газодувкой 7 подается предварительно подогретый в воздухоподогревателе 3 воздух и распыливается топливо. Топочные газы направляются в котел-утилизатор тепла 2, где нагревают сначала воду для получения технологического пара, а затем в теплообменнике 3 воздух. Охлажденные дымовые газы поступают в циклон 4 для сухой очистки от твердых частиц оксидов щелочных и щелочноземельных металлов. Далее очищенные газы дымососом 6 подаются в дымовую трубу 5 и выбрасываются в атмосферу.



1 – печь; 2 – котел-утилизатор; 3 – воздухоподогреватель; 4 – аппарат сухой очистки газов; 5 – труба; 6 – дымосос; 7 – воздуходувка

Рисунок 6.10 – Схема установки огневого обезвреживания сточных вод

### Контрольные вопросы

1. Классификация установок термического концентрирования минерализованных растворов
2. Испарительные установки для очистки минерализованных вод – выпарные и адиабатные
3. Вымораживающие установки концентрирования минерализованных вод – вакуумные и с холодильным агентом
4. Кристаллогидратный процесс
5. Жидкофазное обезвреживание сточных вод (мокрое сжигание), условия проведения
6. Парофазное каталитическое окисление
7. Огневое обезвреживание (парофазное окисление), условия проведения
8. Конструкции печей для сжигания
9. Основное оборудование установки огневого обезвреживания сточных вод
10. Схема установки огневого обезвреживания сточных вод

## ГЛАВА 7. БИОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

### 7.1 Сущность метода биохимической очистки

*Биологическое окисление* – широко применяемый на практике метод очистки сточных вод, позволяющий удалить из них самые разнообразные органические и некоторые неорганические (сероводород, сульфиды, аммиак, нитриты и др.) вещества. *Биохимическая очистка* сточных вод основана на естественных процессах жизнедеятельности гетеротрофных микроорганизмов, способных использовать растворенные и коллоидные органические загрязнения в качестве источника питания, которым является углерод. Микроорганизмы обладают рядом *особых свойств*, из них для целей водоочистки следует выделить три основных.

1. Способность потреблять в качестве источников питания органические и некоторые неорганические соединения для получения энергии и своего функционирования.

2. Быстрое размножение, за 30 минут происходит удвоение бактериальных клеток, и только ограниченность источников питания не позволяет нарушить сложившееся природное экологическое равновесие.

3. Способность образовывать колонии и скопления, которые затем можно отделить от очищенной воды.

Биологическим путем обрабатываются, подвергаясь частичной или полной деструкции, многие виды органических загрязнений городских и производственных сточных вод.

Контактируя с органическими веществами, микроорганизмы частично разрушают их, превращая в воду, диоксид углерода, нитрит- и сульфат-ионы и др. Оставшаяся часть вещества идет на образование биомассы.

Широкое использование биохимического метода обусловлено его *достоинствами*: возможностью удалять из сточных вод разнообразные органические и некоторые неорганические соединения, находящиеся в воде в растворенном, коллоидном и нерастворенном состоянии, в т.ч. токсичные; простотой аппаратного оформления, относительно невысокими эксплуатационными затратами, глубиной очистки. К *недостаткам* следует отнести высокие капитальные затраты, необходимость строгого соблюдения режима очистки, токсичное действие на микроорганизмы ряда органических и неорганических соединений, необходимость разбавления сточных вод в случае высокой концентрации примесей.

Для определения возможности подачи промышленных сточных вод на биохимические очистные сооружения устанавливают *максимальные концентрации* токсичных веществ, которые не влияют на процессы биохимического окисления ( $MK_6$ ) и на работу очистных сооружений ( $MK_{6oc}$ ) ( $MK_{6oc} > MK_6$ ). При отсутствии таких данных возможность биохимического окисления устанавливается по *биохимическому показателю* БПКп/ХПК.

При соотношении БПКп/ХПК от 1,0 до 0,5 вещества хорошо поддаются биохимическому окислению (сюда входят бытовые и некоторые промышленные стоки). При этом необходимо, чтобы очищаемая вода не содержала ядовитых веществ, примесей солей тяжелых металлов.

По биохимическому показателю и токсичности промышленные сточные воды делятся на четыре группы:

I – БПКп/ХПК  $> 0,2$ ;

II – БПКп/ХПК =  $0,1-0,02$ ;

III – БПКп/ХПК =  $0,01-0,001$ ;

IV – БПКп/ХПК  $< 0,001$ .

Первую группу составляют сточные воды предприятий пищевой промышленности, прямой перегонки нефти, производства синтетических жирных кислот, они могут быть напрямую подвергнуты биохимической очистке, т. к. их загрязнения не токсичны для микроорганизмов. Вторую группу составляют азотноудобные, коксохимические, газосланцевые, содовые заводы и третью – предприятия черной металлургии, тяжелого машиностроения, производства ПАВ, сернокислотные заводы. Сточные воды указанных групп должны быть вначале подвергнуты механической и физико-химической очистке, и только затем отправлены на биохимическое окисление. Для четвертой группы стоков (горнодобывающие и рудообогатительные предприятия) биологическая очистка неприемлема.

Биохимическую очистку считают полной, если БПКп очищенной воды составляет менее 20 мг/л и неполной, если БПКп  $> 20$  мг/л. Такое определение условно, т.к. даже при полной биохимической очистке происходит лишь частичное освобождение воды от суммы находящихся в ней примесей.

Известны аэробные и анаэробные методы биохимической очистки. *Аэробные методы*, получившие наибольшее распространение, основаны на использовании аэробных групп микроорганизмов, для жизнедеятельности которых необходим постоянный приток кислорода и температура от 20 °С до 40 °С. При изменении температурного и кислородного режимов состав и число микроорганизмов меняются. При аэробной очистке микроорганизмы культивируются в активном или биопленке. *Анаэробные методы* протекают без доступа кислоро-

да, их используют, главным образом, для обработки осадков, в ряде случаев для денитрификации сточных вод.

Всю совокупность *сооружений биологической очистки* можно разделить на *три группы* по признаку расположения в них активной биомассы:

1) активная биомасса закреплена на неподвижном материале, а сточная вода тонким слоем скользит по загрузке;

2) активная биомасса находится в воде в свободном (взвешенном) состоянии;

3) сочетание обоих вариантов расположения биомассы.

Первую группу сооружений составляют биофильтры; вторую – аэротенки, циркуляционные окислительные каналы, окситенки; третью – погружные биофильтры, биотенки, аэротенки с заполнителями. Все эти сооружения работают в *искусственных условиях*.

Биологическая очистка может также осуществляться в *естественных условиях* на сооружениях почвенной очистки и в биологических прудах.

## 7.2 Активный ил и биопленка

Биологическое окисление осуществляется *сообществом микроорганизмов (биоценозом)*, включающим множество различных бактерий, простейших, а также водорослей, дрожжей, грибов, червей, личинок насекомых и т. д., связанных между собой в единый комплекс различных биотических отношений. Этот биоценоз организмов, развивающихся на органических загрязнениях сточных вод в аэробных условиях, называется *активным илом*. Доминирующая роль в нем принадлежит *бактериям* – одноклеточным подвижным микроорганизмам с достаточной прочной внешней мембраной, способным самоорганизовываться в колонии-хлопья, которые сравнительно легко можно отделить от воды. Активный ил состоит из живых микроорганизмов и твердого субстрата (отмершая часть водорослей и различных твердых остатков) и по внешнему виду напоминает хлопья коагулянта с цветом от белесо-коричневого до темно-коричневого. Скопления бактерий в активном иле окружены слизистым слоем (капсулами) и называются *зооглеями*. Они способствуют улучшению структуры ила, его осадению и уплотнению.

Хлопьеобразующая способность активного ила зависит главным образом от наличия питательных веществ: при слишком высоком их содержании происходит рассеивание колонии, при их недостатке размеры хлопьев уменьшаются и ухудшаются их седиментационные свойства.

Активный ил представляет собой *амфотерный коллоид*, имеющий в интервале значений  $pH=4-9$  отрицательный заряд, и обладаю-

щий большой адсорбционной способностью за счет развитой суммарной поверхности бактериальных клеток. Адсорбционная способность активного ила с течением времени понижается из-за насыщения загрязненными сточной воды. Процесс восстановления идет за счет жизнедеятельности микроорганизмов, заселяющих активный ил, и называется *регенерацией*.

Несмотря на существенные различия очищаемых сточных вод, *элементный химический состав* активных илов достаточно близок, хотя и не идентичен. Это сходство есть результат общности его основы – бактериальных клеток.

В состав клеток входят Н, N, S, С, О, Р, зола, белок, а также *различные микроэлементы* – В, V, Fe, Со, Mn, Мо, Сu и др.

*Н, N, С и О* образуют группу *органогенных веществ*, эти элементы входят в бактериальные клетки в виде *воды, белков, жиров и углеводов*; (80-85) % веса микробов составляет вода.

*Сухое вещество* активного ила представляет собой комплекс минеральных от 10 % до 30 % и органических от 70 % до 90 % веществ. Основную массу органических соединений составляют белки, в состав зольных частей клеток входят микроэлементы. Кроме того для построения бактериальной клетки необходимы *биогенные элементы* – *фосфор, азот, калий*.

Качество ила определяется скоростью его осаждения и степенью очистки воды. Состояние ила характеризует *иловый индекс*, представляющий собой отношение объема осаждаемой части активного ила (V) к массе высушенного осадка (G) (в граммах) после отстаивания в течение 30 минут. Чем больше иловый индекс, тем хуже оседает ил. Крупные хлопья оседают быстрее, чем мелкие.

Кроме активного ила в процессе аэробной очистки может участвовать *био пленка*, которая растет на наполнителе биофильтра в виде слизистых обрастаний толщиной 1-2 мм. Биопленка как и активный ил состоит из бактерий, грибов, дрожжей и других простейших и имеет аналогичный активному илу элементный состав.

### 7.3 Закономерности распада органических веществ

В живой микробиальной клетке непрерывно и одновременно протекают два процесса: распад молекул (катаболизм +ΔН) и их синтез (анаболизм -ΔН), составляющие в целом *процесс обмена веществ – метаболизм*. Процессы деструкции микроорганизмами органических соединений неразрывно связаны с процессами биосинтеза новых микробиальных клеток, на проведение которых расходуется энергия, получаемая клеткой в результате потребления питательных веществ (углеводы, жиры, белки, спирты и т. д.), примесей воды в аэробных и анаэробных условиях.

*Механизм изъятия* веществ из сточных вод и их потребление микроорганизмами весьма сложен, носит многоступенчатый характер и определяется типом питания и дыхания бактерий. В целом этот процесс может быть условно разделен на *три стадии*:

1) сорбционное изъятие вещества из воды и его накопление на поверхности клетки за счет молекулярной и конвективной диффузии;

2) диффузионное перемещение через клеточную оболочку самого вещества, или продуктов его гидролиза непосредственным растворением в веществе стенки мембраны, либо комплекса проникающего вещества и белка-переносчика вследствие разности концентраций вещества в клетке и вне ее;

3) метаболическая трансформация поступивших внутрь клетки питательных веществ с выделением энергии и синтезом нового клеточного вещества.

Скорость протекания *первой стадии* определяется законами диффузии и гидродинамическими условиями в сооружении биохимической очистки. Турбулентность потока вызывает распад хлопьев активного ила на мельчайшие колонии микробов и приводит к быстрому обновлению поверхности раздела между микроорганизмами и средой.

Процесс *переноса вещества* через полупроницаемые мембраны клеток (*вторая стадия*) объясняется либо растворением диффундирующего вещества в материале мембраны, благодаря чему оно проходило внутрь клетки, или присоединением проникающего вещества к специфическому белку-переносчику, являющемуся компонентом мембраны клетки, растворением образующегося комплекса и диффузией его внутрь клетки, где комплекс распадается и белок-переносчик высвобождается для совершения нового цикла.

Основную роль в очистке сточных вод играют *метаболические процессы (третья стадия)* превращения вещества внутри клеток микроорганизмов, частично в такие конечные продукты, как диоксид углерода, вода, сульфаты, нитраты (окисление органического вещества), частично в новые микробиальные клетки (процесс синтеза биомассы) в аэробных условиях. В анаэробных условиях могут образовываться различные промежуточные продукты, метан, аммиак, сероводород, а также другие новые клетки.

Современные представления перемещения вещества через клеточную мембрану предполагают наличие в ней *гидрофильного «канала»*, через который внутрь клетки могут проникать гидрофильные субстраты. Перемещение субстрата происходит путем передачи его молекул от одной функциональной группы к другой, а субстрат, как ключ, открывает соответствующий для его проникновения канал.

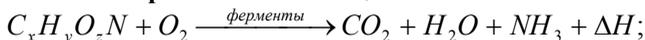
Вторая альтернативная модель предполагает наличие *гидрофобного мембранного переносчика*, который проводит субстрат с внешней на внутреннюю сторону мембраны, где гидрофобный комплекс распа-

дается. Белок-переносчик высвобождается и возвращается на ее поверхность для совершения нового цикла переноса.

*Скорость химических превращений* и их последовательность определяют *ферменты*, выполняющие роль катализаторов и представляющие собой сложные белковые соединения с молекулярной массой до сотен тысяч и миллионов. Их активность зависит от температуры, pH и присутствия в сточной воде различных веществ.

*Суммарные реакции биохимического окисления в аэробных условиях* схематично можно представить в следующем виде:

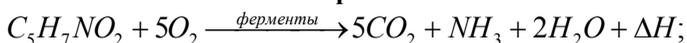
**окисление органического вещества**



**синтез бактериальных клеток**



**окисление клеточного материала**



где  $C_xH_yO_zN$  – все органические вещества сточных вод;

$C_3H_7NO_2$  – среднее соотношение основных элементов в клеточном веществе бактерий;

$\Delta H$  – энергия.

Белковый азот в результате аммонизации разлагается до аммонийного, который и используется при очистке сточных вод в качестве источника азота. Наиболее интенсивно азот потребляется в период роста клеток, а в период их распада освобождается в виде  $NH_3$ , окисляясь затем до нитритов и нитратов.

*Химические превращения являются источником* необходимой для микроорганизмов *энергии*. Живые организмы способны использовать только связанную химическую энергию. Универсальным переносчиком энергии в клетке является аденозинтрифосфорная кислота (АТФ).

Микроорганизмы способны окислять многие органические вещества, но для этого требуется различное время адаптации. Легко окисляются многие спирты, гликоли, бензойная кислота, ацетон, глицерин, сложные эфиры и др. Плохо окисляются нитросоединения, некоторые ПАВ и хлорпроизводные органические соединения.

Наличие двойной связи может облегчать биологическое разложение. С увеличением молекулярной массы вещества скорость биологического окисления уменьшается. Быстрее окисляются растворенные вещества, чем коллоидные и мелкодисперсные.

В процессе *аэробного окисления потребляется кислород*, растворенный в воде. Для насыщения сточной воды кислородом проводят

процесс аэрации, разбивая воздушный поток на пузырьки, которые, по возможности, равномерно распределяются в сточной воде. Из пузырьков воздуха кислород абсорбируется водой, а затем переносится к микроорганизмам. Этот процесс происходит в два этапа. На первом идет перенос кислорода из воздушных пузырьков в основную массу жидкости, на втором – перенос абсорбированного кислорода к клеткам микроорганизмов, в основном под действием турбулентных пульсаций.

Наиболее надежный способ увеличения подачи кислорода в сточную воду – повышение интенсивности дробления газового потока, т. е. уменьшение размеров газовых пузырьков. Скорость потребления кислорода зависит от многих взаимосвязанных факторов: величины биомассы, скорости роста и физиологической активности микроорганизмов, вида и концентрации питательных веществ, накопления токсичных продуктов обмена, количества и природы биогенных элементов, содержания кислорода в воде.

#### **7.4 Влияние различных факторов на процесс биохимической очистки**

Эффективность биологической очистки зависит от целого ряда факторов, одни из которых поддаются изменению и регулированию в широких диапазонах, регулирование же других, таких, как например, состав поступающих на очистку сточных вод, практически исключено. К основным факторам, определяющим пропускную способность системы и степень очистки сточной воды, относятся: наличие кислорода в воде, равномерность поступления сточной воды и концентрация в ней примесей, температура, рН среды, перемешивание, присутствие токсичных примесей и биогенных элементов, концентрация биомассы и др.

Наиболее *благоприятные условия очистки* заключаются в следующем.

1. *Концентрация* в очищаемых сточных водах биохимически окисляемых веществ не должна превышать допустимую величину  $MK_6$  или  $MK_{60c}$ , которая устанавливается обычно опытным путем. Сточные воды с более высокой концентрацией необходимо подвергать разбавлению. Максимально допустимые концентрации веществ при поступлении на сооружения биологической очистки приведены в справочной литературе.

2. Снабжение сооружений биохимической очистки *кислородом* воздуха должно быть непрерывным и в таком количестве, чтобы в очищенной сточной воде, выходящей из вторичного отстойника, его было не менее 2 мг/л. Перенос кислорода к клеткам микроорганизмов происходит в два этапа: на первом – из воздушных пузырьков в основ-

ную массу жидкости, на втором – из жидкости к клеткам микроорганизмов. Скорость растворения кислорода в воде не должна быть ниже скорости его потребления микроорганизмами. В начальный период окисления скорость потребления кислорода может в десятки раз превышать ее в конце процесса, она зависит от характера загрязнения воды и пропорциональна количеству биомассы.

3. *Оптимальной температурой* для аэробных процессов, происходящих в очистных сооружениях, считается (20-30) °С, хотя температурный оптимум бактерий различных групп варьируется в широких пределах, от -8 °С до +85 °С. Повышение температуры за пределы физиологической нормы микроорганизмов приводит к их гибели, а понижение лишь снижает активность микроорганизмов. С повышением температуры уменьшается растворимость кислорода в воде, поэтому в теплое время года надо проводить более интенсивную аэрацию, а в зимнее – поддерживать более высокую концентрацию микроорганизмов в циркулирующем иле и увеличивать продолжительность аэрации.

4. *Оптимальной реакцией среды* для значительной части бактерий является нейтральная или близкая к ней, хотя есть виды, хорошо развивающиеся в кислой (грибы, дрожжи) или слабощелочной среде (актиномицеты).

5. Для нормального процесса синтеза клеточного вещества, а следовательно, и для эффективного процесса очистки сточных вод должна быть *достаточная концентрация всех элементов питания* – органического углерода (*БПК*), *азота, фосфора, калия*. Недостаток азота тормозит окисление органических загрязнений и приводит к образованию труднооседающего ила. Недостаток фосфора инициирует развитие нитчатых бактерий, что является основной причиной вспухания активного ила, плохого оседания и выноса его из очистных сооружений, замедления роста ила и снижения интенсивности окисления. Биогенные элементы лучше всего усваиваются в форме соединений, в которой они находятся в микробных клетках: азот – в форме  $\text{NH}_4^+$ , а фосфор – в виде солей в фосфорных кислотах. При нехватке азота, фосфора, калия в сточную воду вносят различные азотные, калийные и фосфорные удобрения. Эти элементы содержатся в бытовых сточных водах, поэтому при их совместной очистке с промышленными стоками добавлять биогенные элементы не надо.

6. Кроме основных элементов клетки (С, О, N, H) для ее построения необходимы в незначительных количествах и другие компоненты – *микроэлементы* (Mn, Cu, Zn, Mo, Mg, Co и др.). Содержание указанных элементов в природных водах, из которых образуются сточные, обычно достаточно для биохимического окисления.

7. Многие химические вещества, прежде всего *соли тяжелых металлов*, могут оказывать на микроорганизмы токсичное воздействие, нарушающее их жизнедеятельность. Такие вещества (Sb, Ag, Cu,

Co, Hg, Pb, Cr, Zn, Cd, Fe и др.), попадая в бактериальную клетку, взаимодействуют с ее компонентами и нарушают их функции. Снижается биохимическая активность ила и происходит его вспухание из-за интенсивного развития нитчатых форм бактерий.

8. Количество *взвешенных частиц* не должно быть более 100 мг/л для биологических фильтров и 150 мг/л для аэротенков.

9. Интенсивность и эффективность очистки сточных вод зависят не только от условий обитания микроорганизмов, но и от их количества, т. е. *дозы активного ила*, которая поддерживается в аэротенках обычно равной 2-4 г/л. Повышение концентрации микроорганизмов в сточной воде позволяет ускорить процесс биологической очистки, но при этом одновременно необходимо увеличивать количество растворенного в воде кислорода, что ограничено состоянием насыщения, а также улучшать условия массообмена. При биологической очистке необходимо применять «молодой» активный ил с возрастом 2-3 суток. Он не вспухает, более вынослив к колебаниям температуры, pH среды, мелкие хлопья его лучше осаждаются. Важным условием улучшения биологической очистки и уменьшения объема очистных сооружений является регенерация активного ила, заключающаяся в его аэрации при отсутствии питательного субстрата.

10. Для создания наиболее благоприятных условий массопередачи питательных веществ и кислорода к поверхности микробных клеток необходимо *перемешивание сточной воды и активного ила*, что обеспечивает его нахождение во взвешенном состоянии. При этом турбулизация жидкости приводит к разрушению хлопьев активного ила, обновлению их поверхности, лучшему снабжению клеток питательными веществами и кислородом, создает более благоприятные условия обитания микроорганизмов.

## 7.5 Аэробные методы очистки в естественных условиях

В *естественных условиях* очистка происходит на полях орошения, полях фильтрации и биологических прудах. Их отличают сравнительно низкие строительные и эксплуатационные затраты, буферная способность при залповых сбросах сточных вод, колебаниях pH, температуры, достаточная степень изъятия из воды биогенных элементов. К недостаткам относится сезонность работы, низкая скорость окисления загрязнений, наличие застойных зон, большая занимаемая площадь, трудность очистки.

*Поля орошения и поля фильтрации* относятся к почвенным методам очистки и в зависимости от производительности разделяются на малые, средние и крупные.

Почва – это сложный комплекс органических и неорганических веществ, заселенный большим числом различных микроорганизмов. В

почве отсутствуют благоприятные условия для развития патогенной микрофлоры, вследствие чего она представляет собой надежный и мощный фактор обезвреживания сточных вод. В результате почвенной очистки одновременно решаются две задачи – *минерализация* органических веществ и *обеззараживание*.

Очистка на полях орошения и полях фильтрации используются преимущественно для бытовых и городских (смешанных) сточных вод.

*Поля орошения* являются сельскохозяйственными угодьями, специально предназначенными для очистки сточных вод и одновременно выращивания растений.

Очистка сточных вод на полях орошения основана на воздействии почвенной микрофлоры, кислорода воздуха, солнца и жизнедеятельности растений, в ней в той или иной степени участвует активный слой грунта толщиной 1,5-2 м. В почве полей орошения находятся актиномицеты, дрожжи, грибы, водоросли, простейшие и беспозвоночные животные. Сточные воды содержат в основном бактерии. Минерализация органического вещества происходит как правило в верхнем полуметровом слое почвы. При этом повышается плодородие почвы, что связано с обогащением ее нитратами, фосфором и калием. Однако общий солевой состав стоков не должен превышать 4-6 г/л для предотвращения засоления почвы. На полях орошения применяют различные виды распределения очищаемой воды: сплошной залив, залив по бороздам и полосам, дождевание, подпочвенное орошение; последнее считается наиболее эффективным по всем показателям (санитарно-техническим, эпидемиологическим, водохозяйственным, агроэкономическим и др.)

Сточные воды подаются на поля орошения периодически с интервалом 5 дней. В зимний период для местностей с холодной зимой на них производится намораживание сточных вод. Для сбора сточной воды, используемой на полях орошения, служат *пруды-накопители* вместимостью, равной шестимесячному накоплению в них воды.

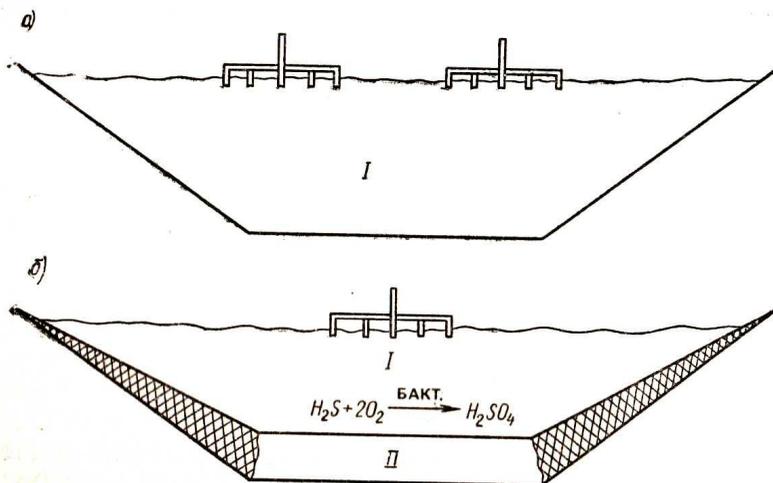
На *полях фильтрации* очистка производится без использования растений. Они применяются в основном в качестве резервных участков для принятия сточных вод, когда невозможна подача воды на поля орошения, или для доочистки сточных вод.

При использовании почвенных методов очистки необходимо учитывать тип грунта, лучше подойдут песчаные, суглинистые и черноземные почвы; тяжелые грунты – глины, суглинки, плотные известняки – исключаются; рельеф местности, уровень залегания грунтовых вод и другие почвенно-климатические условия.

*Биологические пруды* – искусственно созданные или естественные водоемы, в которых очистка сточных вод идет под воздействием природных процессов самоочищения. Они могут применяться как для самостоятельной очистки поверхностных, так и для глубокой доочист-

ки городских и производственных сточных вод, прошедших биологическую очистку. Биологические пруды представляют собой неглубокие водоемы (0,5-1 м), хорошо прогреваемые солнцем и заселенные водными организмами.

В процессах, протекающих в биопрудах, наблюдается полный природный цикл разрушения органических загрязнений. Воздействие на работу прудов различных факторов может создавать в них как аэробные, так и аэробно-анаэробные условия. *Пруды*, постоянно работающие в аэробных условиях, называются *аэрируемыми*, а пруды с переменными условиями — *факультативными* или аэробно-анаэробными (рисунок 7.1).



а – аэрируемый; б – аэробно-анаэробный;

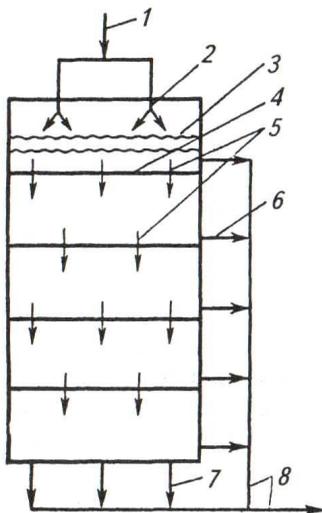
I – зона аэробная; II – зона анаэробная

Рисунок 7.1 – Биологические пруды

Аэробные условия в прудах могут поддерживаться либо за счет естественного поступления кислорода из атмосферы и фотосинтеза, либо за счет принудительной подачи воздуха в воду. Поэтому различают *пруды с естественной и искусственной аэрацией*. Время пребывания воды в прудах с естественной аэрацией составляет от 7 до 60 суток. Вместе со сточными водами выносятся активный ил, который является посевным материалом. Эффективность очистки в прудах определяется временем года, в холодный период она резко снижается.

Пруды с искусственной аэрацией имеют значительно меньший объем и требуемая степень очистки в них обычно достигается за 1-3

суток. Аэрирующие устройства могут быть механического и пневматического типов. Существуют разные варианты устройства прудов: *серийные или каскадные* и *непроточные*. Как правило, в *серийных* прудах устраивают от двух до пяти последовательно работающих секций, из которых последняя предназначена для отделения ила (рисунок 7.2).



1 – подача сточных вод; 2 – впуск; 3 – поперечные стенки из фашин или плетня; 4 – разделительные валики; 5 – перепускные лотки; 6 – запасные выпуски для опорожнения прудов; 7 – выпуски очищенных сточных вод; 8 – отводная канава

Рисунок 7.2 – Схема пятиступенчатого биологического пруда

В биологических прудах необходимо присутствие водных растений, которые оказывают благоприятное влияние на процесс очистки. Иногда в последних ступенях серийных прудов разводят рыбу, что позволяет избежать образования ряски.

В *непроточные* пруды сточная вода подается после отстаивания и разбавления. Продолжительность пребывания воды в них составляет 20-30 суток. Качество очистки в непроточных прудах выше, чем в серийных.

В зимнее время пруды обычно опорожняются и могут быть использованы как накопители. Один раз в два-три года рекомендуется производить перепашку дна и посадку растительности.

Биологические пруды обладают небольшой стоимостью строительства и невысокими эксплуатационными расходами, буферной способностью при залповых сбросах, колебаниях pH, температуры, в то же время они отличаются низкой окислительной способностью, сезон-

ностью работы, большой занимаемой площадью, неуправляемостью, наличием застойных зон, трудностью очистки.

## 7.6 Аэробные методы очистки в искусственных условиях

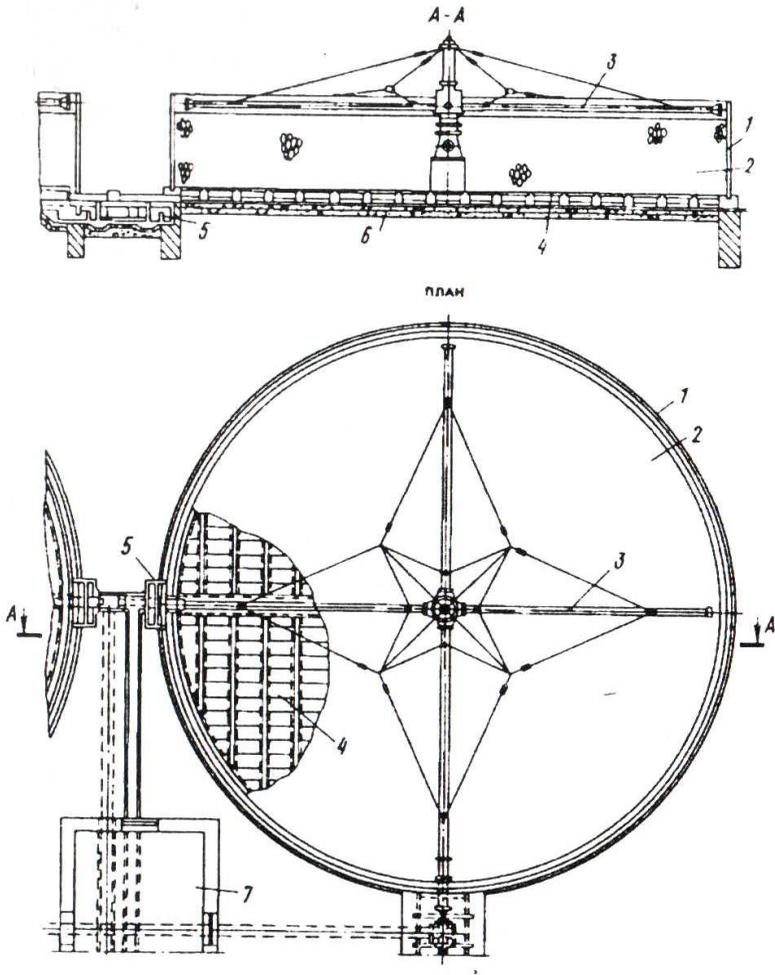
### 7.6.1 Биофильтры

*Биофильтры* – искусственные сооружения биологической очистки – представляют собой круглые, шестиугольные, или прямоугольные в плане сооружения из кирпича или железобетона, загруженные фильтрующим материалом, на поверхности которого развивается биопленка. Сточная вода фильтруется через слой загрузки, покрытой пленкой из микроорганизмов, за счет жизнедеятельности которых осуществляется очистка. Микроорганизмы окисляют органические вещества, используя их как источники питания и энергии, т. е. биопленка выполняет такие же функции, как и активный ил. Отработанная (омертвевшая) биопленка смывается протекающей сточной водой и выносятся из биофильтра.

По типу загрузочного материала биофильтры делятся на две категории: с объемной (зернистой) и плоской загрузкой. В качестве зернистой загрузки используют щебень, гравий, гальку, шлак, керамзит, керамические и пластмассовые кольца, кубы, шары, цилиндры и т. п. Плоская загрузка – это металлические, тканевые и пластмассовые сетки, решетки, блоки, гофрированные листы, пленки и т. п., нередко свернутые в рулоны; высота слоя загрузки может колебаться от 1 м до 16 м.

Для орошения насадки загрязненная вода подается периодически или непрерывно через неподвижные разбрызгиватели (спринклеры) или реактивные вращающиеся распределители с циклической подачей воды в течение 5-10 мин.

Биофильтры с объемной загрузкой подразделяются на капельные, высоконагружаемые, башенные. *Капельные биофильтры* наиболее просты по конструкции, загружаются материалом мелких фракций (20-30 мм) высотой 1-2 м и имеют производительность до 1000 м<sup>3</sup>/сут., на них достигается высокая степень очистки. В *высоконагружаемых фильтрах (аэрофильтрах)* применяется больший размер кусков загрузки (40-60 мм), ее высота составляет 2-4 м, они очищают в 10-15 раз больше воды, чем капельные (рисунок 7.3). Высота загрузки в *башенных фильтрах* достигает 8-16 м, крупность загрузочного материала 60-80 мм. Два последних вида фильтров применяются при расходах сточных вод до 50 тыс.м<sup>3</sup>/сут. как для полной, так и неполной биологической очистки. Башенные биофильтры в отечественной практике широкого распространения не получили.



1 – корпус; 2 – загрузка; 3 – реактивный ороситель; 4 – дренажная решетка; 5 – гидравлический затвор; 6 – сплошное днище; 7 – вентиляционная камера

Рисунок 7.3 – Высоконагружаемый биофильтр

По принципу поступления воздуха в толщу аэрируемой загрузки биофильтры могут быть с *естественной* и *принудительной* аэрацией.

В пусковой период биологических фильтров на кусках загрузки вырастает *биологическая пленка*. Основным агентом этой пленки является микробное население. Микроорганизмы биопленки используют органические примеси сточных вод как источники питания и ды-

хания, при этом масса биопленки увеличивается. По мере утолщения пленки происходит ее отмирание и смыв протекающей сточной водой. Очищенная в биофилт্রে вода вместе с частицами отмершей биопленки поступает во вторичный отстойник. Рециркуляцию биологически активного материала обычно не предусматривают, что обусловлено высокой удерживающей способностью сооружения массы биопленки.

При поступлении сточных вод с  $\text{БПК}_n \geq 300$  мг/л во избежание частого заиливания поверхности биофилтра предусматривается рециркуляция – возврат части очищенной воды для разбавления исходной сточной воды. Рециркуляция увеличивает содержание растворенного кислорода в смеси, поддерживается более равномерная гидравлическая нагрузка, выравнивается концентрация биопленки по высоте сооружения. Однако при этом возрастает потребность в объемах отстойников, увеличивается расход энергии на перекачивание воды.

Применение биофилтров ограничивается возможностью их заиливания, снижением окислительной мощности\* в процессе эксплуатации, появлением неприятных запахов, трудностью равномерного наращивания пленки.

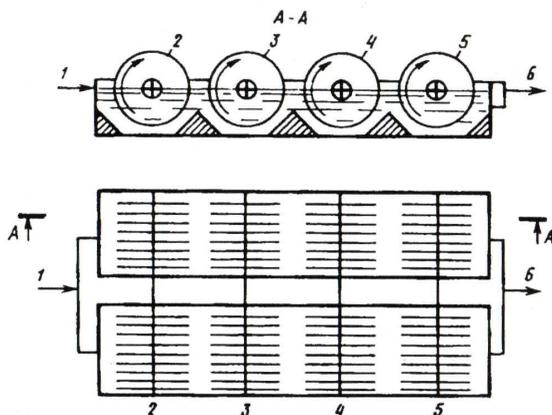
Промежуточное положение между аэротенками и биофилтрами занимают комбинированные сооружения – погружные биофилтры и биотенки-биофилтры.

*Погружные биофилтры* могут быть дисковыми, барабанными, шнековыми, трубчатыми.

*Погружные дисковые биофилтры* представляют собой резервуар, в котором на вращающемся валу насажены диски, попеременно контактирующие со сточной водой и воздухом. Диаметр дисков 1-5 м, толщина 1-10 мм, расстояние между ними 10-20 мм, изготавливаются из металла, пластмассы, асбестоцемента, ткани. Они собираются в пакеты от 30 до 180 штук (рисунок 7.4).

---

\* Окислительная мощность (ОМ) – это скорость реакций окисления загрязнений, г  $\text{O}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ ; к ней близко понятие окислительной способности (ОС), которая определяет скорость растворения кислорода в процессе аэрации полностью обезкислороженной воды при атмосферном давлении и температуре 20°C, г  $\text{O}_2/\text{ч}$ .



1 – подача сточных вод; 2-5 – соответственно первая, вторая, третья и четвертая ступени погружного дискового биофильтра; 6 – выпуск обработанных сточных вод

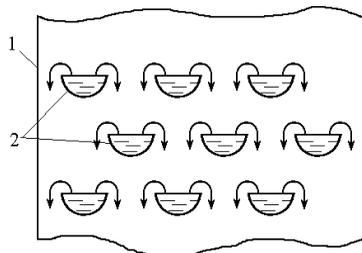
Рисунок 7.4 – Схема погружного дискового биофильтра

Сточная вода через распределительный лоток поступает в резервуар погружного биофильтра, где постоянно вращаются пакеты биодисков. На поверхности дисков образуется биопленка, состоящая из колонии микроорганизмов. При нахождении дисков в воде осуществляется процесс сорбции на их поверхности нерастворимых, коллоидных и растворенных органических соединений из обрабатываемой воды. При вращении дисков биопленка оказывается на воздухе, где происходит поглощение кислорода и окисление сорбированных загрязнений. Часть биопленки отрывается от поверхности дисков и находится в воде во взвешенном состоянии, т. е. окисление органических загрязнений происходит как биопленкой, аналогично биофильтру, так и активным илом во взвешенном состоянии в объеме воды, как в аэротенке.

*Барабанные погружные биофильтры* представляют собой барабаны диаметром 2-2,5 м, длиной 2-3 м, закрепленные на вращающемся горизонтальном валу и помещенные в резервуары, куда поступает сточная вода. Жесткий корпус барабана обтягивается сеткой, внутри него помещаются засыпные загрузочные элементы, на которых развивается биопленка.

*Биотенк-биофильтр* (рисунок 7.5) представляет собой корпус, в котором заключены лотковые элементы загрузки, представляющие собой полуцилиндры диаметром 80 мм, расположенные в шахматном порядке. Эти элементы орошаются сверху водой, которая наполняя их стекает через края вниз. На наружных поверхностях элементов образуется биопленка, внутри – биомасса, напоминающая активный ил. Кон-

струкция обеспечивает высокую производительность и эффективность очистки.



1 – корпус; 2 – элементы загрузки

Рисунок 7.5 – Биотенк-биофильтр

## 7.6.2 Аэротенки

### 7.6.2.1 Технологические схемы аэротенков

Аэробная биологическая очистка больших объемов сточных вод осуществляется в *аэротенках* – железобетонных аэрируемых сооружениях с постоянно протекающей сточной водой и свободно плавающим в объеме обрабатываемой воды активными илом, бионаселение которого использует загрязнения сточных вод для своей жизнедеятельности.

Аэротенки можно *классифицировать* по следующим признакам:

1) *по гидродинамическому режиму* (структуре потока) – аэротенки-вытеснители, аэротенки-смесители и аэротенки с рассредоточенным впуском сточных вод (промежуточного типа);

2) *по способу регенерации активного ила* – аэротенки с отдельно стоящими или совмещенными регенераторами ила;

3) *по нагрузке на активный ил* – высоконагружаемые (для неполной очистки), обычные и низконагружаемые (с продленной аэрацией);

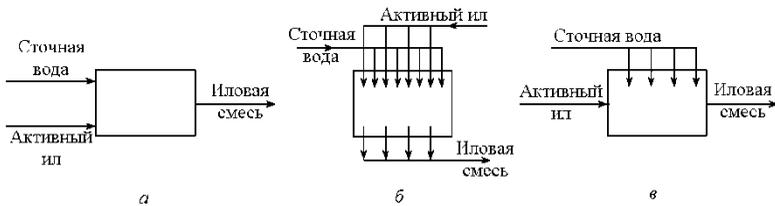
4) *по числу ступеней* – одно-, двух- и многоступенчатые;

5) *по режиму ввода сточных вод* – проточные, полупроточные, с переменным рабочим уровнем, контактные;

6) *по типу аэрации* – пневматическая, механическая, комбинированная, пневмомеханическая, эжекционная и др.;

7) *по конструктивным признакам* – прямоугольные, круглые, комбинированные, шахтные, фильтротенки, флототенки, аэротенки-отстойники, ячеистые, аэротенки-осветлители и др.

Наиболее распространены коридорные аэротенки, которые различаются структурой потоков сточной воды и возвратного активного ила (рисунок 7.6).

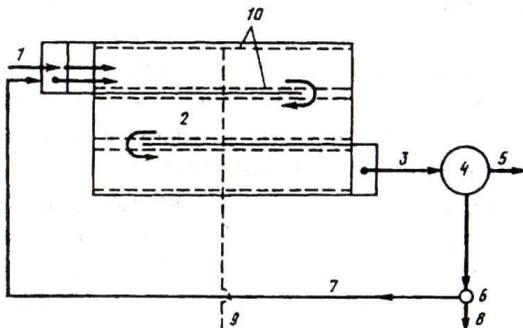


*a* – аэротенк-вытеснитель; *б* – аэротенк-смеситель; *в* – аэротенк с рассредоточенной подачей воды

Рисунок 7.6 – Схемы аэротенков

Аэротенки используются в чрезвычайно широком диапазоне расходов сточных вод от нескольких сот до миллионов кубометров в сутки.

В *аэротенках-вытеснителях* (рисунок 7.7) нагрузка загрязнений на ил и скорость их окисления изменяются от наибольших значений в начале сооружения до наименьших в его конце. Вода 1 и ил 7 подаются в начало сооружения, иловая смесь 3 отводится в конце его во вторичный отстойник 4. Теоретически режим потока поршневой, без продольного перемешивания, на практике такое перемешивание возможно. Вода и ил последовательно проходят коридоры аэротенка 2, в которые из воздуходувок 9 подается воздух. Активный ил в иловой камере 6 делится на циркуляционный 7, возвращаемый в аэротенк, и избыточный 8, отводимый на утилизацию.

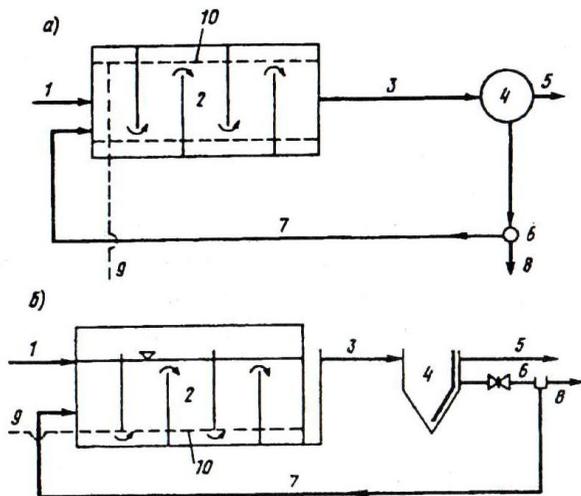


1 – сточная вода; 2 – аэротенк; 3 – иловая смесь; 4 – вторичный отстойник; 5 – очищенная вода; 6 – иловая камера; 7, 8 – циркуляционный и избыточный активный ил соответственно; 9 – воздух из воздуходувок; 10 – аэрационная система

Рисунок 7.7 – Аэротенк-вытеснитель

Для исключения перемешивания активного ила с водой предлагается продольное секционирование аэротенков поперечными перегородками, не достигающими либо до дна, либо до противоположной сте-

ны (рисунок 7.8). Такие перегородки делят аэротенк на пять-шесть последовательно проточных секций (ячеистые аэротенки, секционированные окситенки). Аэротенки-вытеснители применяются для окисления малоконцентрированных вод ( $BPK_n$  до 300 мг/л), если происходит достаточно легкая адаптация активного ила. Повышенная концентрация загрязнений в начале сооружения обеспечивает высокую скорость окисления, которая снижается по длине аэротенка из-за изменения состава воды.



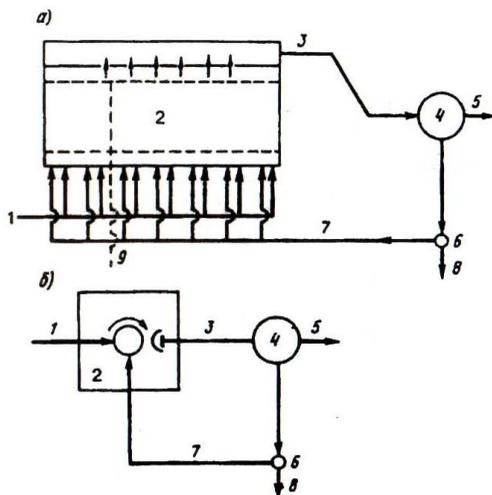
с перегородками:

*а* – не доходящими до противоположной стены;

*б* – не доходящими до дна или уровня воды в аэротенке  
позиции те же, что на рисунке 7.7

Рисунок 7.8 – Продольное секционирование аэротенков поперечными перегородками

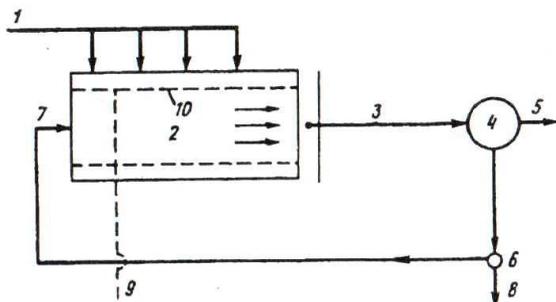
В *аэротенках-смесителях* (рисунок 7.9) нагрузка на ил и скорость окисления загрязнений практически неизменны по длине сооружения. В них воду 1 и ил 7 вводят равномерно вдоль длинной стороны коридора аэротенка или непосредственно в центр аэротенка в аэрационную зону. Полное смешение ила и воды обеспечивает выравнивание концентраций загрязнений и скоростей процесса биохимического окисления. Они наиболее пригодны для очистки концентрированных ( $BPK_n$  до 1000 мг/л) производственных сточных вод при значительных колебаниях их расхода и концентрации загрязнений.



*а* – с рассредоточенным подводом воды и ила вдоль сооружения;  
*б* – с центральным подводом воды и ила в аэрационную зону  
 позиции те же, что на рисунке 7.7

Рисунок 7.9 – Аэротенк-смеситель

В аэротенках с рассредоточенной подачей воды (рисунок 7.10) по его длине единичные нагрузки на ил уменьшаются и становятся равномерными. Воду 1 в них подают в нескольких точках по длине аэротенка, возвратный ил 7 – в начало сооружения, иловая смесь 3 отводится из торцевой части. Такие аэротенки занимают промежуточное положение между вытеснителями и смесителями и используются для очистки смесей промышленных и городских сточных вод.

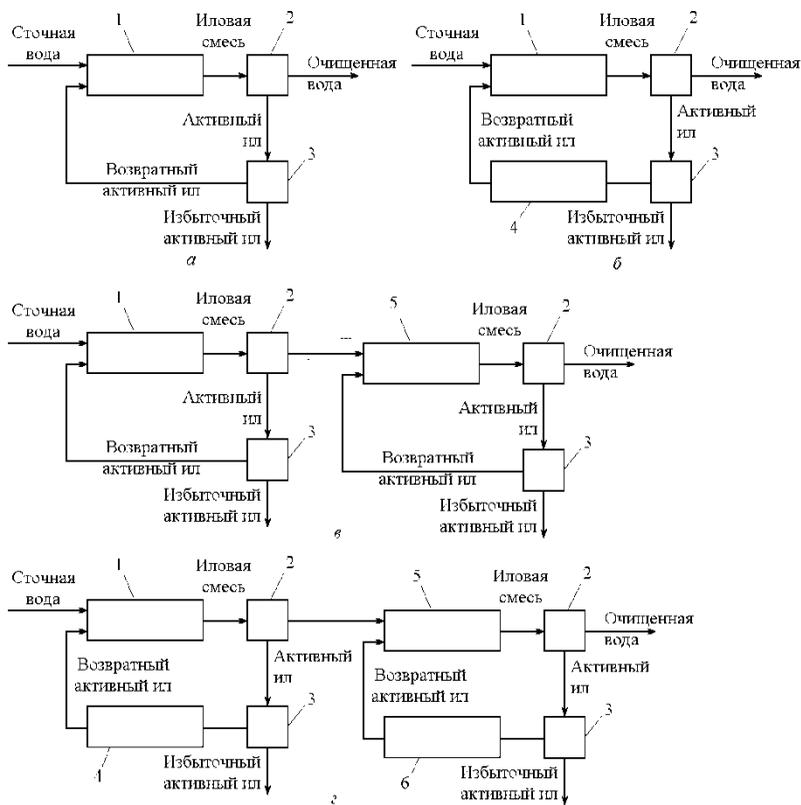


позиции те же, что на рисунке 7.7

Рисунок 7.10 – Аэротенк с рассредоточенным впуском воды на очистку

Работа аэротенка неразрывно связана с нормальной работой вторичного отстойника, из которого возвратный активный ил непрерывно перекачивается в аэротенк. Вместо вторичного отстойника для отделения ила от воды могут быть использованы флотатор, гидроциклон.

Основные технологические схемы очистки воды в аэротенках приведены на рисунке 7.11.



*а* – одноступенчатый аэротенк без регенерации; *б* – то же с регенерацией;

*в* – двухступенчатый аэротенк без регенерации; *г* – то же с регенерацией;

1 – аэротенки; 2 – вторичные отстойники; 3 – иловые насосные станции;

4 – регенератор I ступени; 5 – аэротенки II ступени; 6 – регенератор II ступени

Рисунок 7.11 – Основные технологические схемы очистки сточных вод в аэротенках

В одноступенчатой схеме без регенератора нельзя интенсифицировать процесс очистки стоков. При наличии регенератора в нем заканчиваются процессы окисления и ил приобретает первоначальные

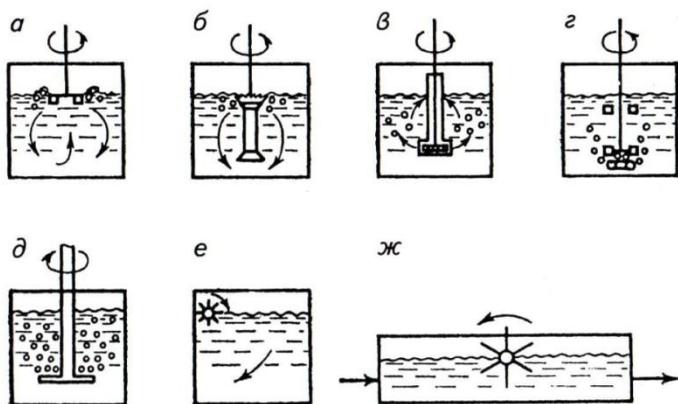
свойства. Одноступенчатые схемы без регенерации ила применяют при БПК<sub>п</sub> ≤ 150 мг/л, с регенерацией - БПК<sub>п</sub> > 150 мг/л. Двухступенчатая схема используется при высокой исходной концентрации органических загрязнений, а также при наличии в воде веществ, скорости окисления которых резко различается. На первой ступени очистки БПК<sub>п</sub> сточных вод снижается на (50-70) %.

### 7.6.2.2 Система аэрации в аэротенках

Для обеспечения нормального хода процесса биологического окисления в аэротенк необходимо непрерывно подавать воздух.

*Система аэрации* представляет собой комплекс сооружений и специального оборудования, которое снабжает жидкость кислородом, поддерживает ил во взвешенном состоянии и постоянно перемешивает сточную воду с илом. Аэрация должна обеспечивать большую поверхность контакта между воздухом, сточной водой и илом. Для большинства типов аэротенков система аэрации одновременно выполняет указанные функции. *По способу диспергирования воздуха* в воде на практике применяются следующие системы аэрации: пневматическая, механическая, пневмомеханическая (комбинированная) и струйная (гидравлическая). В нашей стране большее распространение получила пневматическая система аэрации.

При *механической аэрации* перемешивание осуществляется механическими устройствами, которые обеспечивают дробление струй воздуха, вовлеченного непосредственно из атмосферы вращающимися частями аэратора (ротором) (рисунок 7.12).



а – турбинный; б – турбинный с центральной трубой; в – всасывающий турбинный; г – глубинный с подачей воздуха под лопасти ротора; д – то же, с подачей воздуха через лопасти ротора; е – щеточный; ж – колесный

Рисунок 7.12 – Механические аэраторы

*Механические аэраторы* весьма разнообразны в конструктивном отношении, но одинаковы по принципу работы – вовлечению воздуха из атмосферы ротором и перемешиванию со всем содержимым аэротенка. Их можно *классифицировать*:

– по *принципу действия* – импеллерные (кавитационные) и поверхностные;

– по *расположению оси вращения* – с горизонтальной и вертикальной;

– по *конструкции ротора* – конические, дисковые, цилиндрические, колесные, турбинные, винтовые и др.

В зависимости от конструкции аэратора механизм аэрирования может быть разным: подсос воздуха струями жидкости и через поверхность, смешение воды и воздуха при перепаде давлений в области вращающихся лопаток и при турбулентном перемешивании.

*Пневматическую аэрацию*, при которой воздух нагнетается в аэротенк под давлением (по магистральным и распределительным трубопроводам), подразделяют на три типа в зависимости от размера пузырьков воздуха: мелкопузырьчатую (1-4 мм), среднепузырьчатую (5-10 мм), крупнопузырьчатую (более 10 мм).

В качестве распределительного устройства для воздуха (диспергатора) в *мелкопузырьчатой системе аэрации* применяются *диффузоры*, изготовленные из пористых материалов – керамики, пластмассы, ткани в виде фильтросных пластин, трубок, куполов. Для получения среднепузырьчатой аэрации применяют перфорированные трубы, щелевые и другие устройства. Крупнопузырьчатая аэрация создается открытыми трубами, соплами и т. п.

Наибольшее распространение получили *фильтросные пластины и перфорированные трубы*. Фильтросы размещают на дне аэротенка с одной или двух сторон и заделывают в железобетонные каналы или в металлические обоймы (рисунок 7.13). Воздух подается по магистральным воздухопроводам и стоякам в канал, перекрытый пластинами. Средний размер пор в фильтросах составляет 100 мкм. Пористые трубы удобнее для монтажа, их легче сменить. Фильтросы чувствительны к загрязнениям, требуют тщательной заделки, оказывают большое сопротивление прохождению воздуха, однако хорошо перемешивают воду и насыщают ее кислородом.

В зарубежной практике вместо фильтросных пластин применяются купольные, грибовидные, тарельчатые и другие диффузоры. Они устанавливаются на воздухоподводящем трубопроводе, смонтированном на днище аэротенка параллельно продольным стенам.

Снижения засорения мелкопузырьчатых аэраторов можно добиться с помощью вибрационного аэратора, представляющего собой клапанное устройство. Под давлением воздуха клапан приподнимается, между ним и гнездом образуется зазор, через который поступает

воздух. После этого клапан плотно закрывает отверстие и предотвращает засорение диффузора.

К *среднепузырьчатым аэраторам* можно отнести перфорированные трубы с отверстиями диаметром 3-4 мм. *Аэратор* можно изготовить в виде литой крестовины из четырех *коротких трубок* с открытыми концами. Такие крестовины насаживаются на воздухораспределитель и обеспечивают вторичное дробление воздуха до мелких пузырьков. Гребневый аэратор представляет собой продолговатую шляпку с прорезями, через которые выходит воздух. Аэратор можно изготовить в виде *решетки* из мелких трубок с отверстиями от 1-2 мм до 6-7 мм, однако в этом случае для придания поперечной циркуляции воде устанавливают продольную перегородку из стекловолна.

При *крупнопузырьчатой аэрации* используются трубы диаметром 30-50 мм с открытыми концами, они создают систему «крупных пузырей». Однако такая аэрация широкого распространения не получила.

*Пневмомеханические аэраторы* сочетают в себе элементы пневматической и механической аэрации и применяются в тех случаях, когда требуется интенсивное перемешивание и высокая окислительная мощность. В этих аэраторах сжатый воздух подается через аэрационное кольцо с большими отверстиями и разбивается на мелкие пузырьки находящейся над этим кольцом мешалкой. Это способствует увеличению степени использования кислорода и уменьшению энергозатрат.

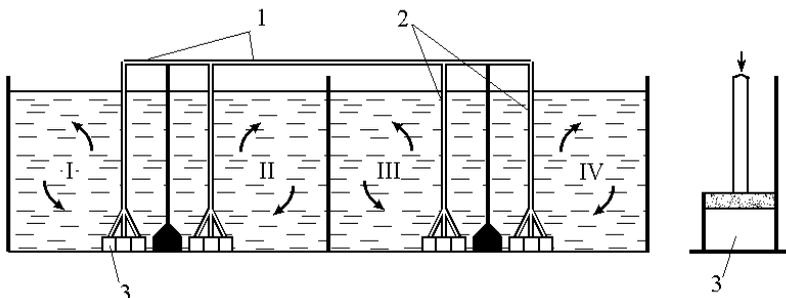
*Струйная (эжекторная) система аэрации* основана на смешении и обмене энергией двух имеющих разное давление потоков, один из которых рабочий, с образованием смешанного потока с промежуточным давлением. При подаче с повышенной скоростью рабочей жидкости через сопло в камеру смешения обеспечивается разрежение, что вызывает подсос (эжекцию) атмосферного воздуха через специальный патрубок. Струя жидкости увлекает диспергируемый воздух через камеру смешения в диффузор, где водовоздушная смесь снижает свою скорость при одновременном повышении давления. Компактная струя жидкости, соударяясь с воздушным потоком, диспергирует воздух, а жидкость насыщается кислородом.

### 7.6.2.3 Конструкции аэротенков

*Современный аэротенк* – это гибкое в технологическом отношении сооружение, представляющее собой *железобетонный резервуар*. Наиболее распространены *коридорные аэротенки*, работающие как вытеснители, смесители и с комбинированными режимами, оборудованные аэрационной системой. Рабочую глубину аэротенков принимают от 3 до 6 м, ширина коридора от 4,5 до 12 м, отношение ширины коридора к рабочей глубине от 1:1 до 2:1. Аэротенки могут быть одноступенчатыми и двухступенчатыми, с регенераторами и без них (рисунок 7.11). Для аэротенков и регенераторов количество секций должно

быть не менее двух; при производительности до 50 тыс.м<sup>3</sup>/сут. назначается 4-6 секций, при большей производительности 8-10 секций, все они рабочие. Каждая секция состоит из 2-4 коридоров.

Типовой четырехкоридорный аэротенк (сечение по ширине) с пневматической системой аэрации представлен на рисунке 7.13.



1 – воздуховоды; 2 – стояки; 3 – фильтросные каналы  
I-IV – коридоры аэротенка

Рисунок 7.13 – Типовой четырехкоридорный аэротенк

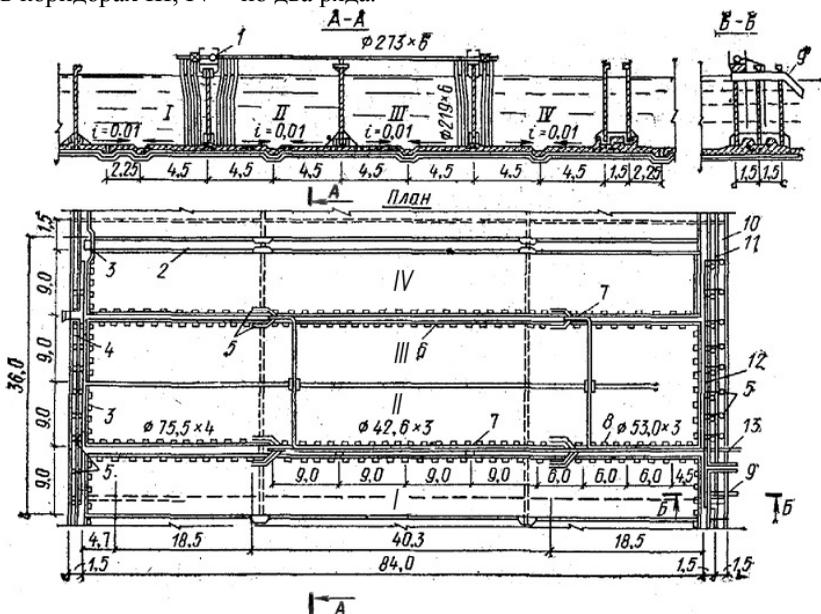
*Аэротенки-вытеснители* – длинные коридорные сооружения, в которых вода и активный ил подаются в начало сооружения, а иловая смесь отводится в конце его. При этом практически не происходит перемешивание поступающей воды с ранее поступившей. Такие аэротенки состоят из нескольких коридоров и могут быть со встроенным регенератором и без него. Длина таких аэротенков достигает 50-150 м и объем от 1,5 до 30 тыс.м<sup>3</sup>.

Типовые аэротенки-вытеснители имеют ширину коридора 4,5; 6 и 9 м, длину от 36 до 114 м, рабочую глубину от 3,2 до 5 м. Четырехкоридорный аэротенк-вытеснитель с возможностью использовать от 1 до 3 коридоров под регенераторы показан на рисунке 7.14.

При 25%-ной регенерации ила коридор I служит регенератором, в него подается только циркулирующий активный ил и воздух. Сточная вода, осветленная в первичных отстойниках, из верхнего канала 4 подается в начало коридора II, где смешивается с активным илом, подаваемым из вторичного отстойника по трубопроводу 9 на регенерацию в коридор I. Образовавшаяся иловая смесь протекает по II, III, IV коридорам, из последнего переливается в канал иловой смеси 10 и далее поступает во вторичные отстойники. Такая же схема работы аэротенка сохраняется при 75 %-ной регенерации, разница только в том, что вода из верхнего канала осветленной воды подается в начало не II-го, а IV-го коридора; I-III коридоры служат регенераторами, иловая смесь проходит лишь по коридору IV.

При 50 %-ной регенерации, когда коридоры I и II отводятся под регенераторы, вода подается в начало коридора III аэротенка из нижнего канала осветленной воды 11, куда она поступает из первичных отстойников через средний канал 2.

Воздух в аэротенк подается по системе воздуховодов 1, 12, 13 через воздушные стойки 5 к фильтросным пластинам, уложенным в бетонных каналах днища аэротенка вдоль продольной стенки его коридора. В коридорах I, II размещают по три ряда фильтросных пластин, в коридорах III, IV – по два ряда.



1 – воздуховод; 2 – средний канал; 3 – щитовой затвор; 4 – верхний канал осветленной воды; 5 и 6 – воздушные и водовыбросные стойки; 7 – скользящая опора; 8 – труба Вентури; 9 – трубопровод циркулирующего активного ила (от распределительной камеры); 10 – распределительный канал вторичных отстойников; 11 – нижний канал осветленной воды; 12 и 13 – воздуховоды на канале и на секции

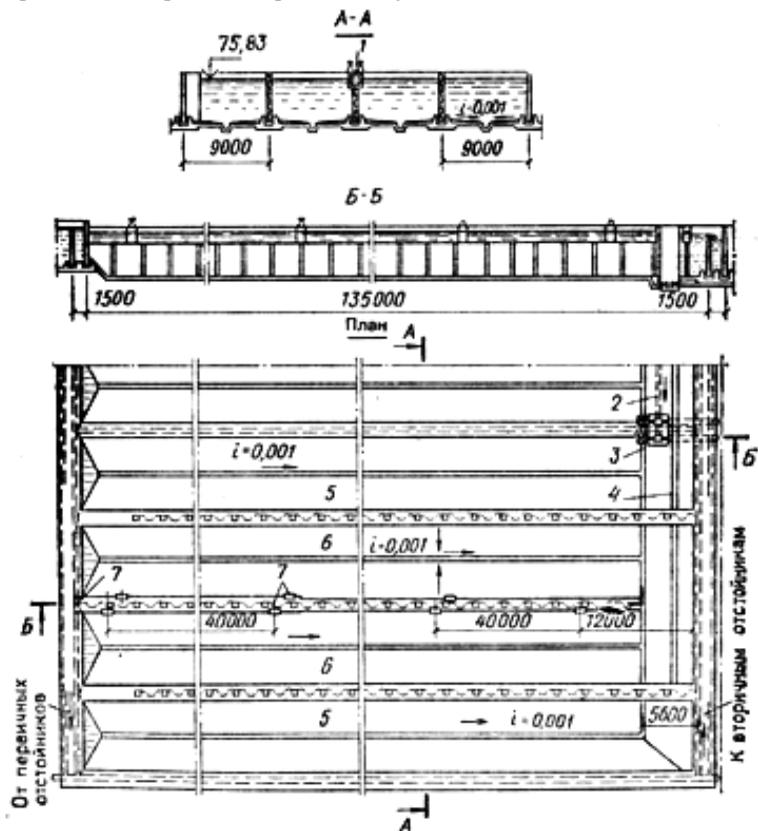
Рисунок 7.14 – Типовой четырехкоридорный (I-IV) аэротенк-вытеснитель (диаметры трубопроводов даны в мм)

Если в качестве первичных и вторичных отстойников используются горизонтальные сооружения, то может устраиваться единый блок аэротенков с первичными и вторичными отстойниками, что сведет к минимуму длину коммуникаций.

Сточная вода и ил в аэротенках-смесителях подводится и отводится равномерно вдоль длинных сторон сооружения. Поступающая

смесь очень быстро (в расчетах мгновенно) смешивается с содержащимся в нем азотом. Это позволяет равномерно распределять органические загрязнения, активный ил и растворенный кислород, обеспечивая работу сооружения при постоянных условиях и высоких нагрузках. Ширина коридора типового азотенка-смесителя составляет 3-9 м, число коридоров 2-4, длина до 150 м, число секций от 2 до 8.

На рисунке 7.15 показан азотенк-смеситель. Один из коридоров является собственно азотенком, другой – регенератором активного ила, они разделены легкой стенкой из волнистого шифера. Длина коридора 135 м, ширина 9 м, рабочая глубина 5 м.



1 – распределительный лоток; 2 – трубопровод опорожнения азотенок и вторичных отстойников; 3 – камера задвижек опорожнения; 4 – лоток активного ила; 5 – регенераторы; 6 – коридоры азотенка; 7 – щитовые затворы

Рисунок 7.15 – Азотенк-смеситель

Сточная вода из трубопровода поступает в распределительный лоток 1, откуда подается в коридоры собственно аэротенка 6 рассредоточено через окна со щитовыми затворами 7, расположенные на расстоянии 40 м друг от друга. Также рассредоточено из регенераторов 5 в коридоры аэротенков поступает активный ил.

Для опорожнения аэротенков предусматривается устройство лотков в середине каждого коридора с продольным уклоном в 0,001 в сторону трубопровода опорожнения 2. Днище коридора также имеет поперечный уклон в сторону лотка опорожнения аэротенка.

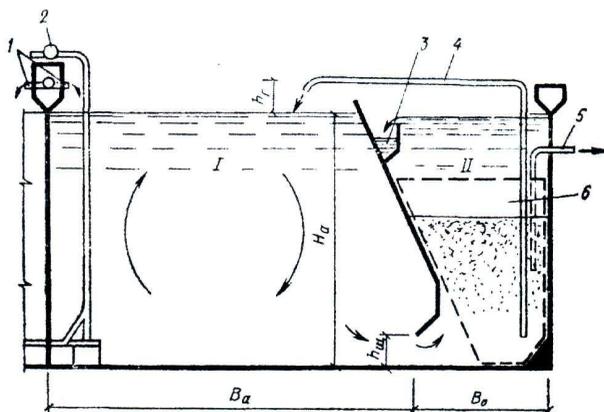
По сравнению с аэротенками-вытеснителями в аэротенках-смесителях высокая остаточная концентрация примесей в очищенной воде. Поэтому их целесообразно применять для очистки концентрированных сточных вод на первой ступени, а аэротенки-вытеснители - на второй ступени.

Разновидностью аэротенков-смесителей можно считать циркуляционные окислительные каналы (ЦОК), работающие в режиме низких нагрузок на ил. Система аэрации в них, как правило, механическая. В плане ЦОК могут иметь кольцевую вытянутую форму, круглую, грушевидную, U-образную, Г-образную, почкообразную и др. Форму канала выбирают в зависимости от местных условий.

Аэротенки – смесители могут быть сблокированы со вторичными отстойниками и выполнены отдельно от них. *Аэротенки-отстойники (аэроакселаторы)* компактны, позволяют увеличить рециркуляцию иловой смеси без применения специальных насосных станций, улучшить кислородный режим отстойника и повысить дозу ила до 3-5 г/л, соответственно увеличив окислительную мощность.

Разработано много конструкций аэротенков-отстойников, которые различаются между собой по системе аэрации – пневматическая, механическая, пневмомеханическая; по расположению зоны аэрации – в центре, по периферии, смежно с зоной отстаивания; по конструкции отстойной зоны – со взвешенным слоем ила и без него, в виде вертикального отстойника, со скребками или без них; по циркуляции ила – с системой аэрации, с помощью эрлифта. На рисунке 7.16 приведена схема аэротенка-отстойника.

Сточная вода через лоток 1 поступает в аэрационную часть I, туда же через воздухопровод 2 подается воздух. Иловая смесь из зоны аэрации переходит в отстойную часть II, где происходит разделение ила и воды. Осветленная вода отводится через лоток 3, а избыточный ил по трубопроводу 5. Циркулирующий ил с помощью эрлифта 4 возвращается в аэрационную часть.



I – аэрационная часть; II – отстойная часть; 1 – подача сточных вод; 2 – воздуховод; 3 – выпуск очищенной воды; 4 – эрлифт; 5 – трубопровод для отвода избыточного ила; 6 – иловый бункер

Рисунок 7.16 – Аэротенк-отстойник

*Аэротенки промежуточного типа* (рисунок 7.10) совмещают элементы аэротенков-вытеснителей и аэротенков-смесителей. К ним относятся аэротенки с рассредоточенной подачей воды и сосредоточенной подачей активного ила, а также каскад аэротенков-смесителей. Сточная вода подается через несколько выпускных окон одновременно, активный ил поступает в начало коридора регенератора. В этом случае создаются условия для более высокой средней концентрации активного ила, чем в аэротенках-вытеснителях, и обеспечивается лучшее качество очистки, чем в аэротенках-смесителях. Выполняются они в виде двух- или четырехкоридорных сооружений. Капитальные затраты на строительство таких аэротенков снижаются не менее чем на 15 % по сравнению с рассмотренными выше, при этом сохраняется высокое качество очистки.

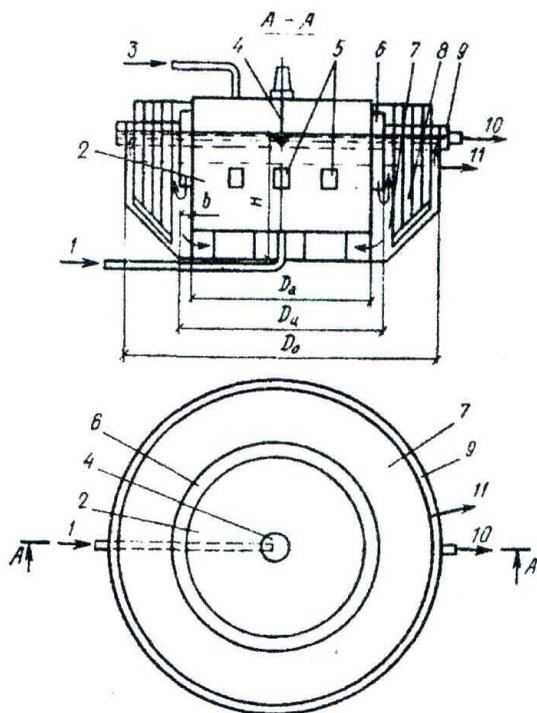
*Окситенки* – сооружения биохимической очистки сточных вод, в которых вместо воздуха применяется технический кислород или воздух, обогащенный кислородом. Они представляют собой герметические сооружения, оборудованные системами механических устройств и циркуляции кислорода (рисунок 7.17).

Благодаря повышенной концентрации кислорода создаются условия для увеличения дозы активного ила (до 6-10 г/л), снижаются энергозатраты на аэрацию, увеличивается окислительная мощность (в 5-10 раз выше, чем у аэротенков), эффективность использования кислорода составляет (90-95) %.

Кроме того, прирост активного ила в таких сооружениях на (25-35) % ниже, чем в аэротенках за счет более глубокого окисления загрязнений. Активный ил лучше отделяется от воды и уплотняется, что позволяет уменьшить объем вторичных отстойников и уплотнителей избыточного ила.

Конструктивно окситенк выполнен в виде резервуара круглой в плане формы с цилиндрической перегородкой, разделяющей зоны аэрации 2 и илоотделения 7. В средней части перегородки устроены окна 5 для перепуска иловой смеси из зоны аэрации в илоотделитель. В нижней части перегородки есть окна для возвращения ила в зону аэрации. Зона аэрации оборудована герметическим перекрытием, на котором устанавливается электропривод механического аэратора 4, здесь же смонтирован трубопровод для подачи технического кислорода 3. Осветленная сточная вода поступает в зону аэрации по трубопроводу 1, где турбоаэратором интенсивно перемешивается с активным илом.

Илоотделитель оборудован перемешивающим устройством 8, представляющим собой радиально расположенные решетки из вертикальных стержней. В илоотделителе находится слой взвешенного активного ила, уровень которого стабилизируется автоматически путем сброса избыточного ила через выпуск 11.



- 1 – подача сточной воды; 2 – зона аэрации; 3 – подача технического кислорода;  
 4 – механический аэратор; 5 – выпускные окна; 6 – воздухоотделитель;  
 7 – илоотделитель; 8 – перемешивающее устройство; 9 – водосборный лоток;  
 10 – выпуск очищенных сточных вод; 11 – выпуск избыточного активного ила

Рисунок 7.17 – Окситенк

Очищенная вода проходит через слой взвешенного активного ила, доочищается от взвешенных и растворенных органических веществ, поступает в водосборный лоток 9 и отводится по трубопроводу 10.

### 7.6.3 Технологические схемы биохимической очистки

Сточные воды предприятий содержат сложный комплекс соединений органического и неорганического происхождения, различающихся составом, свойствами, фазово-дисперсным состоянием. Поэтому выбор оптимальной схемы биологической очистки представляет собой достаточно сложную инженерную задачу, в которой должны быть учтены как расход сточных вод, так и все виды загрязняющих веществ с их свойствами и концентрациями. Сооружения биологической очистки могут иметь различные технологические схемы в зависимости от характеристик поступающих на очистку стоков.

*Типовые схемы биологической очистки* включают, как правило, сооружения по усреднению стоков, их механической очистки, собственно биологической очистки (аэротенки, биофильтры, регенераторы активного ила), отделения активного ила от воды (отстойники, флотаторы, центрифуги, фильтры), доочистки сточных вод и обработки осадков (обеззараживание, пруды дополнительного отстаивания), устройства для приготовления и дозирования реагентов, насосные и воздуходувные станции, коммуникации для подачи и распределения воды, активного ила. Схемы могут быть одноступенчатыми и многоступенчатыми.

Схема реализации биологического процесса очистки воды в точном режиме в аэротенках с возвратом ила из вторичных отстойников и выведением избыточного ила на обработку называется *классической аэрацией*. При биологической очистке происходит прирост исходной биомассы, что приводит к повышению дозы активного ила по сравнению с расчетной, поэтому в аэротенк возвращается только то количество ила, которое соответствует расчетной рабочей дозе в нем, это *циркулирующий* или *возвратный активный ил*. Остальной ил в виде *избыточного* удаляется из системы на обработку и утилизацию.

*Одноступенчатая схема* наиболее проста по аппаратурному оформлению, но ее целесообразно применять в случае стабильного состава сточных вод, невозможности изменения их основных параметров. При колебании расхода и состава производственных сточных вод необходимо их предварительное усреднение или смешивание с хозяйственно-бытовыми стоками. В этом случае процесс очистки протекает более устойчиво и полно, т. к. смешанный сток имеет постоянный состав с заданными параметрами, а бытовые стоки содержат биогенные элементы, необходимые для биохимического окисления.

Кроме того, учитывая, что промышленные сточные воды имеют переменный состав и колебания расхода в течение суток, целесообразно использовать технологическую схему с предварительным усреднением таких стоков.

С целью повышения окислительной мощности на (10-15) % проводят регенерацию активного ила, возвращаемого в аэротенк, когда ил в течение определенного времени аэрируется без сточной жидкости. При этом повышается физиологическая активность, осаждаемость, ускорение окисления трудноокисляемых примесей и продуктов метаболизма, омоложение активного ила.

Для насыщения воды кислородом, для лучшего отделения жировых и взвешенных веществ иногда проводят предварительную аэрацию, в процессе которой зачастую подается либо избыточный, либо регенерированный активный ил.

Одним из направлений повышения функционирования биологических очистных сооружений является создание *многоступенчатых технологических схем*, которые целесообразно применять при наличии в сточных водах легко- и трудноокисляемых веществ при их высокой концентрации.

Как правило, первая ступень биоокислителей работает в режиме высоких нагрузок на неполную очистку. В многоступенчатых схемах применяют различные комбинации сооружений биологической очистки.

При *двухступенчатой схеме* в аэротенках на каждой из ступеней циркулирует собственный ил, хорошо адаптированный к определенным веществам. На I ступени обычно используют аэротенк-смесители, на II – вытеснители. В ряде случаев, особенно при наличии высоких концентраций загрязняющих веществ, в т. ч. с резко различающимися скоростями их биохимического окисления, прибегают к устройству *трех ступеней* биологической очистки.

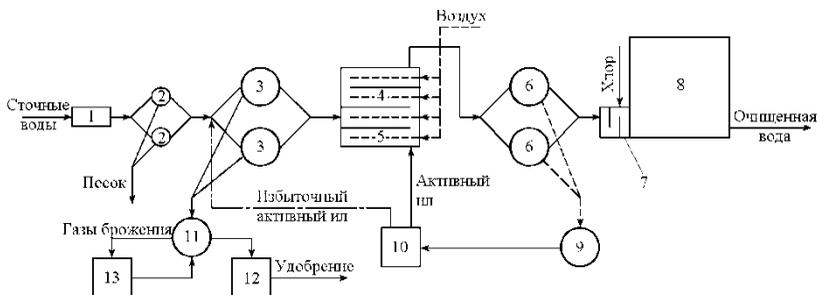
Интенсивность и последовательность окисления микроорганизмами того или иного вещества зависит от многих факторов, но решающее влияние на эти процессы оказывает химическое строение. Наименее доступными источниками углерода являются углеводы, не содержащие атомов кислорода. Но в отсутствие в сточных водах легко разлагаемых источников питания, они также расщепляются микроорганизмами активного ила.

При большом содержании аммонийного азота в сточных водах необходима их *предварительная нитрификация*, которая осуществляется в нитрификаторе с помощью специальных нитрифицирующих микроорганизмов, когда аммонийный азот окисляется кислородом воздуха сначала до нитритов, а затем нитратов. Восстановление нитритов и нитратов до свободного  $N_2$  реализуется в процессе *денитрификации* при наличии в воде определенного количества органического

субстрата, окисляемого сапрофитными микроорганизмами до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  за счет кислорода нитритов и нитратов.

Все вышеуказанное определяет выбор сооружений и технологических схем биологической очистки.

На рисунке 7.18 приведена схема совместной очистки бытовых и производственных сточных вод.



- 1 – решетки; 2 – песколовки; 3 – первичные отстойники; 4 – аэротенки; 5 – регенераторы; 6 – вторичные отстойники; 7 – смеситель; 8 – контактный резервуар; 9 – илоуплотнители; 10 – насосная станция; 11 – метантенки; 12 – площадки для обезвоживания сброженного осадка; 13 – котельная

Рисунок 7.18 – Схема совместной очистки производственных и бытовых сточных вод

По приведенной схеме осуществляется совместная очистка промышленных и бытовых сточных вод. Процесс протекает более устойчиво и полно, т. к. бытовые стоки содержат биогенные элементы, а также разбавляют производственные стоки. Сточные воды, предварительно очищаются на сооружениях механической очистки. На решетках 1 задерживаются крупные механические примеси различного происхождения, которые подвергаются дроблению (измельчению) и направляются вместе с потоками воды на песколовки 2 для удаления минеральных примесей. Оставшиеся более легкие органические загрязнения задерживаются в отстойниках 3 и отводятся на сбраживание в метантенки 11, а вода после механической очистки направляется на биологическую в аэротенки 4 с регенераторами 5. В аэротенки и регенераторы подается воздух для аэробного окисления и регенерации активного ила. Иловая смесь из аэротенков поступает во вторичные отстойники 6, откуда активный ил направляется в илоуплотнители 9, а затем делится на два потока: циркулирующий с помощью насосной станции 10 перекачивается в регенераторы 5, а затем – в аэротенки 4; избыточный поступает в первичные отстойники 3. Выделенный в первичных отстойниках осадок обрабатывается в метантенках 11 и обезвоживается на иловых площадках 12. Выделяющийся при сбражива-

нии газ идет на сжигание в котельную 13. Очищенная вода хлорируется в смесителе 7 и поступает в контактный резервуар 8, после чего направляется в водоем или возвращается в производство.

## 7.7 Анаэробные методы очистки

Для обезвреживания осадков сточных вод и предварительной очистки концентрированных сточных вод может использоваться процесс *анаэробного сбраживания*. В зависимости от конечного вида продукта различают следующие виды брожения: спиртовое, пропионово-кислое, молочнокислое, метановое и др. Конечными продуктами брожения являются спирты, кислоты, ацетон, газы брожения ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ).

Обычно анаэробные системы применяют для сбраживания осадков первичных отстойников и избыточного активного ила аэробных биохимических процессах очистки сточных вод.

Для переработки осадков сточных вод используют *метановое брожение*. Процесс этот сложен и состоит из многих стадий, в метановом брожении различают две фазы. В первой фазе брожения (*кислой*) расщепляются сложные органические вещества с образованием низших органических кислот, а также спиртов, аммиака, ацетона, сероводорода, диоксида углерода, водорода и др., в результате чего сточные воды подкисляются до  $\text{pH}=5-6$ . Затем под действием метановых бактерий (*щелочная фаза*) из этих промежуточных продуктов образуются  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ .

Скорость распада органических веществ осадка зависит от их химического состава, температуры, дозы загрузки, влажности и других факторов. Считается, что скорости превращения в обеих фазах примерно одинаковы.

В большинстве случаев удается получить достаточно стабилизированный биологически неразлагаемый после обезвоживания осадок, горючий газ и жидкий сток, который подвергается доочистке в аэробных условиях. Для проведения процесса используют одно- или двухступенчатые емкостные сооружения с перемешиванием. В таких системах осуществляется возврат части осадка (рециркуляция) из второй ступени в первую для интенсификации процесса.

Для выращивания метановых бактерий необходимо поддерживать оптимальные условия для их разведения:  $\text{pH}=6,0-8,5$ ; температура ( $30-35$ ) °C в *мезофильных условиях* и ( $50-54$ ) °C в *термофильных*, в последнем случае разрушение органических веществ происходит более интенсивно.

Проведение процесса осуществляется в вертикальных герметических резервуарах с перемешиванием (*метантенках*), работающих по принципу реакторов, оборудованных приспособлениями для ввода

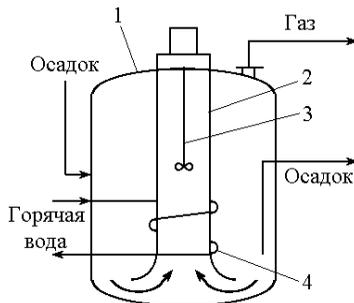
обрабатываемого и отвода сброженного осадка. Выделяющийся при сбраживании газ содержит (63-65) % метана, (32-34) % углекислого газа, обладает теплотворной способностью 23 МДж/кг, что позволяет сжигать его в топках с получением пара, который можно использовать для нагрева осадка в метантенках.

*Метантенки* имеют коническое или плоское днище, выполнены из железобетона или стали. Диаметр метантенков – 10-20 м, полезный объем у типовых – 500-4000 м<sup>3</sup>, индивидуальных – до 6000-8000 м<sup>3</sup>.

Основными конструктивными элементами метантенков являются:

- система подачи исходного осадка и выгрузки стабилизированного;
- система подогрева;
- устройство перемешивания бродящей массы;
- сбор и отвод выделяющегося газа.

Схема метантенка приведена на рисунке 7.19.



1 – корпус; 2 – труба; 3 – мешалка; 4 – змеевик

Рисунок 7.19 – Метантенк

Загрузка и выгрузка осадка происходит, как правило, по прямой схеме одновременно и непрерывно. Такой режим является наиболее рациональным и позволяет поддерживать постоянную температуру и равномерность газовыделения в течение суток. Осадок подают в верхнюю зону метантенка, а выгружают с нижней части днища.

Подогрев осадка осуществляется либо горячей водой, либо острым паром с температурой (110-112) °С. Пар подается непосредственно в метантенк через паровой инжектор, который обеспечивает подогрев осадка и частичное перемешивание бродящей массы.

Перемешивание осадка в вертикальной плоскости происходит за счет движения холодного исходного осадка вниз в кольцевом пространстве между корпусом и центральной трубой, а пузырьков образующегося при брожении газа вверх в подогреваемой трубе 2. В горизонтальной плоскости перемешивание осуществляется за счет работы

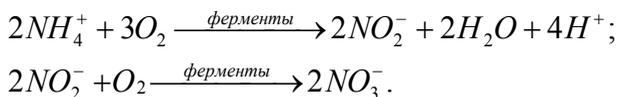
инжектора. Рециркуляция бродящей массы со дна в верхнюю часть метантенка происходит за счет работы циркуляционных насосов, пропеллерных мешалок, расположенных под уровнем осадка в центральной трубе или с использованием принципа газлифта, что усложняет конструкцию метантенка.

Для сбора газа на горловине метантенка устанавливают газовые колпаки и прокладывают специальную газовую сеть, на тупиковых концах которой устанавливают аккумулирующие газгольдеры, позволяющие поддерживать постоянное давление в газовой сети. При невозможности сбора газа метантенков, предусматривают его сжигание в газовой свече.

Газы сбраживания осадков можно подвергнуть переработке путем абсорбции их водой с получением в газовой фазе метана до 95%. Полученный продукт пригоден для использования его в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания.

## 7.8 Нитрификация и денитрификация

Нитрификация и денитрификация представляют собой биологический метод очистки сточных вод от соединений азота. Процесс *нитрификации* является совокупностью реакций биологического окисления нитрифицирующими бактериями аммонийного азота до нитритов, а потом до нитратов. Процесс происходит в *аэробных условиях*. Он протекает в две стадии, на первой – аммоний окисляется до нитритов, на второй – нитриты окисляются до нитратов:

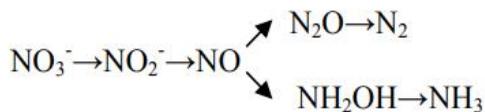


Оптимальная величина рН нитрификации 6-9.

*Денитрификация* – процесс восстановления нитритов и нитратов в *анаэробных условиях* под действием денитрифицирующих бактерий до свободного азота, который выделяется в атмосферу. При этом связанный кислород отщепляется от нитритов и нитратов и вновь расходуется на окисление органических веществ до  $CO_2$  и  $H_2O$ .

*Денитрификаторами* являются гетеротрофные микроорганизмы, использующие органические вещества в качестве источника углерода, необходимого для получения энергии и клеточного материала. Денитрифицирующие бактерии представляют собой факультативные анаэробы. В аэробных условиях они могут окислять органические вещества кислородом воздуха, в анаэробных – окисление происходит за счет нитратов.

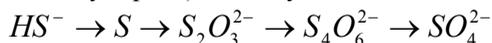
При денитрификации обеспечивается очистка сточных вод одновременно от биологически окисляемых органических соединений и от соединений азота ( $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ); оптимальная реакция среды нейтральная или слабощелочная. Денитрификация – процесс многостадийный и может протекать с образованием аммиака, молекулярного азота, либо оксидов азота:



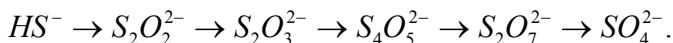
В качестве органического субстрата могут быть использованы любые биологически окисляемые органические соединения (углеводы, спирты, органические кислоты, продукты распада белков и т.д.). Необходимое соотношение величины БПК в сточных водах к нитратному азоту примерно равно 4:1.

Процесс денитрификации может быть осуществлен и без органического субстрата путем *автотрофной денитрификации* восстановленных форм соединений серы. Автотрофная денитрификация обусловлена присутствием специфических *серных (тионовых)* бактерий, которые могут окислять различные соединения, содержащие восстановленные формы серы, и одновременно восстанавливают нитраты до газообразного азота. Для образования клеточного вещества в этом случае используется неорганический углерод.

Тионовые бактерии разлагают сероводород, серу, тиосульфат и другие серосодержащие соединения до конечного продукта окисления (серная кислота или сульфаты) по следующим схемам:



или



Для процессов нитрификации и денитрификации могут применяться традиционные сооружения биохимической очистки – аэротенки различного типа с регенераторами и без них, биофильтры.

В зависимости от того, в каких сооружениях происходят процессы нитри- и денитрификации, различают одно-, двух- и трехстадийные схемы.

При этом процессы можно осуществить двумя способами: комбинированные и отдельные системы очистки. В *комбинированных системах* в одном сооружении предусматривается проведение нитрификации и денитрификации, а в отдельных – только нитрификация или денитрификация.

При одно- и двухступенчатой схемах под денитрификатор можно выделить одну из секций аэротенка, а можно сделать его изолированным. Возможно использовать комбинированное сооружение, разделенное на зоны нитри- и денитрификации. При трехстадийной схеме обработка разделяется на три ступени: аэрация, нитрификация и денитрификация. В первом варианте после денитрификатора сточные воды подвергаются отстаиванию, во втором – денитрификация происходит в реакторе с мелкозернистой загрузкой. По третьему варианту денитрификация осуществляется в денитрификаторах с крупкозернистой загрузкой, после чего вода направляется на песчаные фильтры.

В *раздельных системах* процессы осуществляется специфическими илами; после каждой ступени имеется свой вторичный отстойник. Последовательность отдельных стадий может быть самая разнообразная. Процесс очистки характеризуется высокими скоростями, легкостью управления и устойчивостью. Кроме того эта схема обеспечивает последовательность реакций превращения азотистых соединений в газообразный азот, лучшее удаление углерода, высокую степень нитри- и денитрификации, обусловленное использованием изолированных иловых культур. Недостаток – наличие дополнительных вторичных отстойников, требующих насосов для перекачивания циркулирующего ила.

### **Контрольные вопросы**

1. Сущность метода биохимической очистки
2. Достоинства и недостатки метода
3. Классификация методов биохимической очистки
4. Характеристика активного ила и биопленки
5. Механизм изъятия веществ из сточных вод, три стадии процесса
6. Суммарные реакции биохимического окисления в аэробных условиях: окисление органического вещества, синтез бактериальных клеток, окисление клеточного материала
7. Влияние различных факторов на процесс биохимической очистки
8. Аэробные методы очистки в естественных условиях – поля орошения, поля фильтрации
9. Биологические пруды, их характеристика
10. Очистка в биофильтрах, их классификация по загрузке, производительности
11. Погружные биофильтры – дисковые, барабанные, биотенки
12. Классификация аэротенков

13. Схемы аэротенков вытеснителей, смесителей, с рассредоточенной подачей воды
14. Основные технологические схемы очистки воды в аэротенках
15. Системы аэрации в аэротенках
16. Конструкция аэротенка-вытеснителя
17. Конструкция аэротенка-смесителя
18. Аэротенки-отстойники
19. Окситенки
20. Типовые схемы биохимической очистки
21. Схема совместной очистки бытовых и производственных сточных вод
22. Анаэробные методы обработки осадков сточных вод
23. Нитри- и денитрификация
24. Варианты схем нитри- и денитрификации

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СанПиН 2.1.5.980-00. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод.
2. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.
3. Комарова, Л. Ф. Основы проектирования технологических процессов / Л. Ф. Комарова, В. А. Сомин. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2013. – 174 с.
4. Комарова, Л. Ф. Использование воды на предприятиях и очистка сточных вод в различных отраслях промышленности / Л. Ф. Комарова, М. А. Полетаева. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2010. – 174 с.
5. Сомин, В. А. Новые сорбционные материалы для очистки природных и сточных вод : монография / В. А. Сомин, Л. Ф. Комарова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – 212 с.
6. Ветошкин, А. Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды / А. Г. Ветошкин. – М.: Высшая школа, 2008. – 639 с.
7. Рябчиков, Б. Е. Современная водоподготовка / Б. Е. Рябчиков. – М.: ДеЛи плюс, 2013. – 680 с.
8. Ветошкин, А. Г. Инженерная защита водной среды / А. Г. Ветошкин. – СПб. : Изд-во «Лань», 2014. – 416 с.
9. Кормаков, В. И. Водные ресурсы Алтайского края : монография / В. И. Кормаков, Л. Ф. Комарова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – 164 с.
10. СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84.
11. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85.
12. Гогина, Е. С. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения. / Е. С. Гогина, А. Д. Гуринович, Е. А. Урецкий. – М. : Изд-во Ассоциации строительства вузов, 2012. – 312 с.
13. Родионов, А. И. Технологические процессы экологической безопасности. Основы энвайронменталистики: учебник для студентов технических и технологических специальностей. / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, В. Г. Систер. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. – 800 с.
14. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. Т.2 / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 884 с.
15. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод. / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – М. : АСВ, 2004. – 704 с.

16. Ветошкин, А. Г. Инженерная защита гидросферы от сбросов сточных вод : учебное пособие / А. Г. Ветошкин. – 2-изд. и доп. – М. : Инфра-Инженерия, 2016. – 296 с.

17. Ветошкин, А. Г. Основы инженерной защиты окружающей среды : учебное пособие. / А. Г. Ветошкин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Инфра-Инженерия, 2016. – 456 с.

18. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник в 3-х томах / А. С. Тимонин, В. Б. Моисеев, К. Р. Таранцева ; под общей редакцией А. С. Тимонина. – Изд-е 4-е, перераб., доп. и испр. – Калуга, 2015.

19. ИТС 8-2015. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – М. : Бюро НДТ, 2015 – 116 с.

20. ИТС 10-2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. – М. : Бюро НДТ, 2015. – 415 с.