

Е. Ф. Кудина, В. В. Савич, А. М. Тарайкович

**ВОДА – ПРОДУКТ  
ПОТРЕБЛЕНИЯ И  
ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
ЧЕЛОВЕКА**



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Е. Ф. КУДИНА, В. В. САВИЧ, А. М. ТАРАЙКОВИЧ

**ВОДА – ПРОДУКТ ПОТРЕБЛЕНИЯ  
И ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ  
ЧЕЛОВЕКА**

Гомель 2025

УДК 628.17

**Кудина, Е. Ф.** Вода – продукт потребления и жизнедеятельности человека : монография / Е. Ф. Кудина, В. В. Савич, А. М. Тарайкович; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 350 с. – ISBN 978-985-891-218-5

Изложены современные представления о структуре и свойствах природных вод, источниках ее загрязнения, структуре и свойствах воды, микроорганизмах, ее населяющих. Представлены сведения о физико-химических реакциях, протекающих между веществами, содержащимися в природных и сточных водах, описаны методы оценки химического и санитарно-гигиенического качества воды, физико-химические и биологические основы технологий очистки сточной и питьевой воды. Приведены основные схемы очистных сооружений различной производительности, использующих указанные методы. Проведено сравнение их технико-экономических показателей, указаны достоинства и недостатки конкретных конструкций. Даны рекомендации по оптимальным областям их применения. Приведены сведения об основных типах устройств для введения воздуха и озона в воду – аэраторах, в том числе выполненных из различных пористых материалов, а также о фильтрующих материалах.

Для инженерно-технических работников проектных, строительных и эксплуатационных организаций водоснабжения и водоотведения, а также для студентов профильных высших и средних специальных учебных заведений.

Табл. 30. Ил. 154. Библиогр.: 137 назв.

*Рекомендовано к изданию советом  
Белорусского государственного университета транспорта*

Рецензенты:

директор ИОНХ НАН Беларуси д-р хим. наук, профессор,  
академик НАН Беларуси *А. И. Кулак*;  
первый заместитель генерального директора –  
главный инженер ГП «Гомельводоканал» *В. Н. Грибанов*

ISBN 978-985-891-218-5

© Кудина Е. Ф., Савич В. В.,  
Тарайкович А. М., 2025  
© Оформление. БелГУТ, 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....  | 6   |
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 8   |
| 1 ВОДА В ПРИРОДЕ .....  | 10  |
| 1.1 Водные ресурсы.....   | 10  |
| 1.2 Состав природных вод .....  | 12  |
| 1.3 Основные источники воды .....   | 13  |
| 1.4 Загрязнение гидросферы.....   | 14  |
| 2 СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВОДЫ .....   | 17  |
| 2.1 Изотопный состав.....   | 17  |
| 2.2 Строение молекулы воды .....  | 18  |
| 2.3 Структура воды в твердом и жидким состояниях.....   | 20  |
| 2.4 Свойства воды .....   | 23  |
| 3 ВОДА И МИКРООРГАНИЗМЫ .....   | 28  |
| 3.1 Морфология микроорганизмов .....  | 28  |
| 3.1.1 Археи.....  | 32  |
| 3.1.2 Бактерии.....   | 33  |
| 3.1.3 Вирусы .....  | 49  |
| 3.1.4 Эукариоты.....  | 54  |
| 3.1.5 Грибы .....   | 55  |
| 3.1.6 Простейшие .....  | 72  |
| 3.1.7 Водоросли .....   | 76  |
| 3.2 Физиология микроорганизмов .....  | 79  |
| 3.2.1 Питание микроорганизмов .....   | 80  |
| 3.2.2 Дыхание микроорганизмов .....   | 84  |
| 3.2.3 Брожение.....   | 85  |
| 3.2.4 Фотосинтез.....   | 86  |
| 3.2.5 Рост и размножение микроорганизмов .....  | 87  |
| 3.3 Основы экологической микробиологии .....  | 88  |
| 3.3.1 Микроорганизмы и окружающая среда .....   | 91  |
| 3.3.2 Микрофлора воды .....   | 98  |
| 3.3.3 Санитарная микробиология.....   | 102 |
| 4 БИОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД .....   | 108 |
| 4.1 Свойства активного ила и их влияние на процессы очистки.....                                      | 108 |
| 4.2 Механизм удаления органических веществ из сточных вод микроорганизмами активного ила.....         | 112 |
| 4.3 Основные фазы роста микроорганизмов в процессах биохимической очистки.....                        | 113 |
| 4.4 Прирост биомассы и потребление кислорода в процессе очистки стоков .....                          | 115 |
| 4.5 Влияние физико-химических и гидродинамических факторов на скорость биохимического окисления ..... | 118 |
| 4.6 Многоступенчатая схема биохимической очистки .....  | 121 |

|   |            |
|---|------------|
| 4.7 Гидродинамика аэрируемых сооружений .....   | 124        |
| 4.8 Движение воздушных пузырьков в воде .....   | 128        |
| 4.9 Массоперенос кислорода из воздушного пузырька в воду .....  | 133        |
| <b>5 ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ</b>   | <b>135</b> |
| 5.1 Качество воды в природных источниках.....   | 135        |
| 5.2 Физические показатели качества воды .....   | 136        |
| 5.3 Химические показатели качества воды .....   | 137        |
| 5.4 Биологические и бактериологические показатели воды .....  | 144        |
| 5.5 Требования к качеству и составу воды .....  | 145        |
| <b>6 МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ИЗ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ .</b>   | <b>148</b> |
| 6.1 Физические методы очистки .....   | 159        |
| 6.1.1 Отстаивание .....   | 159        |
| 6.1.2 Фильтрация .....  | 160        |
| 6.1.3 УФО-обеззараживание .....   | 164        |
| 6.2 Химические методы очистки .....   | 168        |
| 6.2.1 Реагентная нейтрализация .....  | 169        |
| 6.2.2 Окисление .....   | 170        |
| 6.2.3 Обеззараживание хлорированием .....   | 170        |
| 6.2.4 Очистка и обеззараживание озонированием .....   | 176        |
| <b>7 СОСТАВ И СВОЙСТВА СТОЧНЫХ ВОД.</b>   | <b>189</b> |
| 7.1 Формирование состава сточных вод .....  | 189        |
| 7.2 Процессы нитрификации и денитрификации, их значение при очистке<br>сточных вод .....                                      | 193        |
| 7.3 Биохимическая потребность в кислороде (БПК), химическая потребность<br>в кислороде (ХПК) и окисляемость сточных вод ..... | 195        |
| 7.4 Бактериальное и биологическое загрязнение сточных вод .....   | 198        |
| <b>8 МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....</b>  | <b>200</b> |
| 8.1 Методы предварительной очистки сточных вод.....   | 200        |
| 8.2 Методы обработки осадков .....  | 202        |
| 8.3 Типовые схемы очистных сооружений .....   | 202        |
| 8.4 Биологическая очистка сточных вод с использованием аэрации.....   | 217        |
| <b>9 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД .....</b>   | <b>234</b> |
| 9.1 Состав и свойства осадков сточных вод.....  | 234        |
| 9.2 Методы обработки осадка .....   | 236        |
| 9.3 Анаэробное метановое сбраживание .....  | 240        |
| 9.4 Аэробная стабилизация осадков .....   | 243        |
| 9.5 Иловые площадки .....   | 246        |
| 9.6 Механическое обезвоживание осадков сточных вод .....  | 248        |
| 9.7 Термическая сушка обезвоженного осадка .....  | 252        |
| <b>10 ФИЛЬТРЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ ПИТЬЕВОЙ И СТОЧНОЙ ВОДЫ..</b>   | <b>254</b> |
| 10.1 Скорые напорные и безнапорные фильтры.....   | 254        |
| 10.2 Фильтры со сменными картриджами.....   | 258        |
| <b>11 АЭРИРУЕМЫЕ ОЧИСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ.....</b>   | <b>262</b> |
| 11.1 Конструкции современных аэрируемых сооружений для очистки сточной<br>и питьевой воды .....                               | 262        |
| 11.2 Модернизация воздухораспределительной системы в аэротенках .....   | 270        |

|   |            |
|---|------------|
| 11.3 Сравнение эффективности аэротенков с аэраторами различных типов .....  | 272        |
| 11.4 Конструкции аэраторов и их использование.....  | 275        |
| <b>12 ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ДИСПЕРСНЫЕ ЗАСЫПКИ РАЗЛИЧНОЙ<br/>ПРИРОДЫ В ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ .....</b>  | <b>297</b> |
| 12.1 Пористые материалы фильтров и аэраторов .....  | 297        |
| 12.2 Дисперсная загрузка засыпных фильтров .....  | 305        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>316</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>  | <b>317</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Методы водоподготовки в зависимости от размеров загряз-<br/>нений .....</b>   | <b>325</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Классификация методов очистки сточных вод в зависимости<br/>от группы примесей .....</b>  | <b>326</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Методы очистки сточных вод .....</b>  | <b>339</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Показатели качества воды.....</b>   | <b>341</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д Микробиологические показатели безопасности воды центра-<br/>лизованных систем питьевого водоснабжения .....</b>   | <b>344</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е Показатели безопасности воды централизованных систем пи-<br/>тьевого водоснабжения по химическому составу, связанные с поступлением<br/>и образованием веществ в питьевой воде в процессе ее обработки и в системе<br/>питьевого водоснабжения.....</b> | <b>346</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Показатели безопасности воды централизованных систем<br/>питьевого водоснабжения по химическому составу .....</b>   | <b>348</b> |

*Вода стоит особняком в истории нашей планеты. Нет природного тела, которое могло бы сравниться с ней по влиянию на ход основных, самых грандиозных геологических процессов. Нет земного вещества, минерала, горной породы, живого тела, которое её бы не заключало. Всё земное вещество... ею проникнуто и охвачено.*

*В. И. Вернадский*

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Авторы монографии, работая в разных сферах науки и образования, более 30 лет проводили исследования и выполняли разработки в отдельных узких направлениях, связанных с решением проблем водоподготовки, водоотведения, разрабатывали и совершенствовали технологии очистки питьевой и сточной воды, создавали новые пористые материалы и изделия из них для сооружений и оборудования коммунального хозяйства. Некоторые результаты данных исследований и разработок нашли отражение в ряде публикаций в отечественных и зарубежных изданиях, в двух монографиях, отразивших специфический субъективный взгляд авторов (Кудина Е. Ф. Химия и микробиология воды : учеб. пособие / Е. Ф. Кудина, О. А. Ермолович, Ю. М. Плескачевский ; под ред. Ю. М. Плескачевского, А. С. Неверова ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 335 с.; Жерноклев А. К. Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич ; под ред. Н. В. Холдинской – Минск : Тонпик, 2002. – 129 с.).

За прошедшие годы профильными кафедрами учреждений высшего образования Беларуси подготовлены и изданы учебные пособия, которые описывают и развиваются современные представления о конструкциях сооружений и технологиях подготовки питьевой воды из поверхностных и подземных источников (Ющенко В. Д. Водоподготовка : учеб.-метод. комплекс для студентов спец. 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов». В 2 ч. Ч. 1 / В. Д. Ющенко. – Новополоцк : ПГУ, 2009. – 252 с.), эффективной очистке коммунально-бытовых и промышленных стоков (Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Технология очистки сточных вод» / Т. И. Акулич, С. В. Андреюк. – Брест : БрГТУ, 2022. – 257 с.).

Внесли значительный вклад в развитие отечественных технологий водоподготовки и обработки сточных вод, а также осуществили активное внедрение их в рамках соответствующих дисциплин на кафедрах учреждений высшего образования республики: Вострова Р. Н., Новикова О. К. (БелГУТ), Андреюк С. В., Гуринович А. Д., Житенёв Б. Н. (БрГТУ), Ануфриев В. Н., Грузинова В. Л., Колобаев А. Н., Левкевич В. Е., Михневич Э. И. (БНТУ) и др.

Появился ряд фундаментальных публикаций учёных и специалистов стран СНГ.

Авторы данной монографии предприняли попытку обобщить и дополнить материалы ранее изданных собственных публикаций, указанных выше работ отечественных и зарубежных учёных и специалистов, подготовить комплексную монографию, охватывающую основные фундаментальные и прикладные аспекты химии, микробиологии, гидродинамики, процессов очистки воды разными методами, дать оценку эффективности применяемых на практике разных сооружений и методов, выработать рекомендации по их совершенствованию.

В монографии показана общность и подобие отдельных процессов и сооружений технологий очистки питьевой и сточной воды, что позволит в определённой степени их унифицировать, сократить сроки строительства и ввода в эксплуатацию.

*Авторы выражают свою искреннюю благодарность сотрудникам БелГУТа Новиковой О. К. и Горелой О. Н., предоставившим свои результаты для их обобщения и анализа в данной работе.*

*Авторы благодарны сотрудникам Института порошковой металлургии имени академика О. В. Романа: Вербицкому Д. Ю., Голодку Р. П., Тарасевич Л. Н., профессору БГУИР Пилиневичу Л. П., длительное время работавшему в институте и стоявшему у истоков данных исследований, а также ранее в нем работавшему научному сотруднику Беденко С. А. за поддержку и содействие в получении результатов исследований и разработок, приведенных в данной монографии, в ее подготовке и издании.*

## ВВЕДЕНИЕ

---

**В**ода наиболее распространенное и важное вещество на Земле. Общие запасы воды на планете составляют 133800 км<sup>3</sup>. Из этого количества 96,5 % приходится на долю Мирового океана, 17 % – это подземные воды, 1,74 % – ледники и постоянные снега. Тем не менее, общие запасы пресной воды составляют всего лишь 2,53 % от общих запасов воды.

Благодаря особой кластерной структуре вода имеет высокую теплоемкость, она способна поглощать большое количество тепла, в первую очередь солнечной энергии, и оставаться при этом жидкостью. Вода, благодаря своей структуре, является главным климатообразующим фактором природы.

Вследствие большой диэлектрической постоянной (для воды – 80, для воздуха – 1) вода является универсальным растворителем. Это означает, что разноименные электрические заряды притягиваются один к другому в воде в 80 раз слабее, чем в воздухе. Соответственно, в 80 раз ослабляются силы межатомного соединения в молекулах, и происходит их диссоциация на ионы (катионы, анионы).

Питьевая вода – важный элемент, необходимый для существования всего живого на планете. С давних пор люди при выборе места для поселения отдавали предпочтение местности, находящейся вблизи какого-либо источника живительной влаги: реки, озера, моря, океана.

Отправляясь в дальние странствования, мореплаватели и путешественники обязательно заботились о запасах питьевой воды. Ничего не имеет такой ценности для путника в жаркой местности, как глоток воды. Важнее только воздух, без которого жизнь нереальна. Без возможности утоления жажды, жизнь в теле человека поддерживается всего 2–3 дня.

Здоровье людей напрямую зависит от экологии и водных резервов. Наше бережное отношение к водным ресурсам позволит качественно расходовать и так небольшие их запасы. Ведь пригодной воды для питья немного, всего 1 % от общей площади преобладания воды над сушей.

Тело человека на 60–70 % состоит из воды. Эмбрион на пятом месяце жизни в утробе матери состоит на 94 % из воды. Но человеческий организм так устроен, что с возрастом он теряет влагу. С младенческого возраста показатель уровня содержания воды составляет 85 % всего тела. С возрастом коэффициент наполненности водой уже становится 85–70 %. У пожилых людей уровень насыщенности влагой снижается до 70–50 %.

Питьевая вода способствует очищению организма от токсинов и отходов. Вода участвует в процессе выведения токсинов через почки и мочевой пузырь. Регулярное потребление чистой воды помогает ускорить этот процесс и предотвратить различные заболевания, связанные с накоплением токсинов в организме.

Одним из главных свойств питьевой воды является способность улучшать пищеварение.

Кроме того, питьевая вода содержит множество полезных минералов, таких как кальций, магний, калий и др. Эти минералы необходимы для нормального функционирования организма и укрепления иммунной системы. Регулярное употребление питьевой воды богатой минералами помогает предотвратить различные заболевания и улучшить общее состояние здоровья.

Таким образом, питьевая вода является необходимым компонентом для поддержания здоровья и благополучия организма человека. Регулярное употребление воды помогает поддерживать процессы гидратации, очищать организм от токсинов, улучшать пищеварение и укреплять иммунную систему. Поэтому следует убедиться, что вы получаете достаточное количество питьевой воды каждый день, чтобы поддерживать здоровье и благополучие.

Очистка сточных вод необходима для защиты окружающей среды и здоровья населения. Удаляя загрязняющие вещества из сточных вод, можно снизить риск загрязнения воды и распространения болезней, передающихся через воду. Это, в свою очередь, помогает защитить наши природные ресурсы и сохранить уязвимые экосистемы, зависящие от чистой воды.

Вода – это основа жизни! Она же – продукт жизнедеятельности всего живого!

# 1 ВОДА В ПРИРОДЕ

---

## 1.1 Водные ресурсы

**В**ода – самое распространённое вещество на Земле: 3/4 поверхности планеты (около 71 %) состоит из воды – моря, океаны, реки, ледники. Значительная часть воды циркулирует в подземных горизонтах. Вода входит в состав минералов, горных пород, таких как глина, гипс, и других растительных и животных организмов (до 99 % их массы).

Большая часть воды на поверхности Земли находится в морях и океанах. Пресные воды содержатся в реках, озерах, болотах и водохранилищах.

Вода является необходимым компонентом жизнедеятельности человека. Однако (по данным ООН) [1]:

- 1,1 миллиарда людей (1/6 часть населения) не имеют доступа к чистой питьевой воде;
- 2,2 миллиона людей в мире ежегодно умирают от недостатка питьевой воды, отсутствия необходимых санитарно-гигиенических условий;
- около 6000 детей погибают ежедневно от болезней, связанных с недостатком чистой питьевой воды;
- 90 % промышленных и коммунальных сточных вод не подвергаются очистке.

Острота проблемы водоснабжения на Земле состоит в том, что пригодной для потребления воды физически мало, причём её распределение на поверхности планеты по регионам и странам неравномерно [1].

Водные ресурсы, которыми обладает Беларусь, одни из наиболее богатых на планете. Здесь протекает 20800 рек общей протяжённостью 90600 км, находится 10800 озер и более девяти тысяч болот, создано 136 искусственных водохранилищ [2]. Наиболее крупными из них являются:

- реки (общая длина, км / в пределах Беларуси, км):
  - Днепр – 2145 / 690;
  - Западная Двина – 1020 / 328;
  - Неман – 937 / 459;
  - Западный Буг – 831 / 169;
  - Припять – 761 / 495;
  - Сож – 648 / 493;
  - Березина – 613 / 613;
  - Вилия – 510 / 276;

- Птич – 412 / 412;
- Щара 325 / 325;
- Свислочь – 297 / 297;
- озера (площадь зеркала водоёма, км<sup>2</sup> / площадь водосбора (т. е. площадь территории, с которой собирается вода, образующая озеро), км<sup>2</sup> / максимальная глубина, м):
  - Нарочь – 79,6 / 297 / 24,8 (Минская область);
  - Освейское – 58,3 / 259 / 7,5 (Витебская область);
  - Червоное – 39,8 / 437 / 2,5 (Гомельская область);
  - Лукомское – 36,7 / 216 / 11,5 (Витебская область);
  - Дривяты – 33,7 / 493 / 12,0 (Витебская область);
  - Нещердо – 28,4 / 167 / 8,1 (Витебская область);
  - Мястро – 13,4 / 125 / 11,3 (Минская область);
- водохранилища (площадь зеркала водоёма, км<sup>2</sup> / площадь водосбора, км<sup>2</sup>):
  - Вилейское – 79,2 / 4100 (Минская область);
  - Заславское – 25,6 / – (Заславский гидроузел, Минская область);
  - Красная слобода – 23,6 / 711 (Минская область);
  - Солигорское – 20,1 / 1670 (Минская область);
  - Чигиринское – 20,9 / 3740 (Чигиринская ГЭС).

Представленные данные свидетельствуют, что Беларусь обладает значительными водными ресурсами. По состоянию на 2001 г. обеспеченность городского населения Беларуси водой из централизованных систем питьевого водоснабжения составляет 99,3 %, сельского – 62 %. В 2020 г. обеспеченность потребителей питьевой водой составила 94,7 %. Каждый житель Беларуси потребляет около 200–214 литров воды в сутки, тогда как в странах Западной Европы аналогичный показатель составляет примерно 135 литров. Наибольшее удельное водопотребление для хозяйствственно-питьевых нужд отмечено в Минске, Бресте, Гродно, Бобруйске и Могилеве. За последние шесть лет в Беларуси удельное водопотребление снизилось с 214 до 145 л в сутки на человека. Потребности СНГ в чистой воде оцениваются в 260 млрд м<sup>3</sup> в год, что составляет 85 % от объёма потребности Европы.

В связи с ограниченностью водных ресурсов и увеличением себестоимости воды все более усложняются задачи государства по регулированию водопотребления. Каждое государство стремится:

- увеличить мощности систем оборотного и повторного использования воды;
- улучшить защиту водных объектов (рек, озер) от загрязнения;
- рекуперировать воду технологического и бытового назначения;
- улучшить экологическую обстановку в районе водоёмов и т. д.

Темпы промышленного и бытового потребления воды постоянно возрастают, что приводит к загрязнению большого количества водоёмов. По дан-

ным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь:

- самое большое количество загрязненных, без очистки или недостаточно очищенных сточных вод сбрасывается в бассейны рек Днепр и Припять;
- самым мощным источником техногенного воздействия на поверхностные воды как по объёму сбрасываемых сточных вод, так и по количеству загрязняющих веществ является г. Минск;
- в водоёмы Беларуси в год сбрасывается около 15 тыс. т взвешенных веществ, 78 тыс. т хлоридов, 64 тыс. т сульфатов, 11 тыс. т металлов (железо, цинк, никель, хром).

В настоящее время проблемам водоочистки и водоснабжения государством уделяется много внимания, что отражается в непрерывном совершенствовании соответствующей нормативно-правовой базы.

## 1.2 Состав природных вод

**Природная вода** представляет собой многокомпонентную систему, содержащую соли, газы, а также органические вещества [3, 4]. В большинстве случаев природная вода имеет атмосферное происхождение (дождевая вода), реже – глубинное (конденсация паров, поднимающихся из недр Земли).

Состав грунтовых, озёрных, речных, морских и океанических вод может изменяться в широких пределах в зависимости от состава почв, горных пород, растительного мира, с которыми вода контактирует. Так, вода океанов содержит около 3,5 % примесей, вода Чёрного моря – 1,6 %, а Балтийского – 0,75 % [5]. Главная составная часть морской воды – ионы  $\text{Cl}^-$  (55 % от общего количества ионов) и  $\text{Na}^+$  (30,6 %). В морской воде содержатся также ионы  $\text{Mg}^{2+}$  (3,7 %),  $\text{Ca}^{2+}$  (1,16 %),  $\text{K}^+$  (1,1 %); из анионов в наибольших количествах представлены  $\text{SO}_4^{2-}$  (7,7 %),  $\text{HCO}_3^-$  (0,4 %),  $\text{Br}^-$  (0,2 %).

По содержанию минеральных примесей различают природные воды: ультрапресные, пресные, стабилизированные, солоноватые, солёные, с повышенной солёностью, переходные к рассолам, рассолы.

В грунтовых и родниковых водах находятся главным образом ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ , в меньшем количестве – ионы  $\text{Fe}^{2+}$  и др. В состав речных вод входят эти же ионы, но ионы  $\text{HCO}_3^-$  содержатся в меньшем количестве, так как  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  и  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  разлагаются и углекислый газ удаляется в атмосферу:



Из газов в природной воде растворены в основном кислород, азот и углекислый газ, иногда – сероводород и аммиак. Кислород и азот попадают в воду при растворении в ней воздуха. Сероводород и аммиак попадают как продукты разложения органических веществ.

В результате разрушительной работы рек с водами уносится значительное количество твёрдых пород. Примеси, содержащиеся в природной воде, можно разделить на следующие группы [4]:

1 Образованные вследствие диссоциации растворённых солей катионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ , реже  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , следы  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ; анионы  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , реже  $\text{F}^-$ .

2 Растворённые газы –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ . При растворении в воде оксидов азота и серы образуются кислоты, которые могут вступать во взаимодействие с другими растворёнными в воде веществами.

3 Кремниевая кислота в коллоидной и ионной формах.

4 Продукты жизнедеятельности организмов – соединения азота, фосфора, а также близкие к коллоидным частицы и др.

5 Бактерии и другие микроорганизмы.

6 Микроэлементы ( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\Gamma$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  и др.).

7 Прочие вещества – взвешенные, окрашивающие, придающие воде запах (кроме указанных в п. 2).

Природная вода применяется в промышленности, сельском хозяйстве, быту, в связи с чем необходим количественный, а в ряде случаев и качественный контроль воды для определения её полезных свойств.

### 1.3 Основные источники воды

Природные воды принято делить на три категории, различающиеся по наличию примесей: атмосферные, поверхностные и подземные [4, 6].

**Атмосферные** – вода дождей и снеговых осадков – содержит небольшое количество примесей, главным образом газов (кислород, оксид углерода (IV), сероводород, оксиды азота, кислородные соединения серы и органических веществ), которые загрязняют атмосферу в промышленных районах. Атмосферная вода почти не содержит растворённых солей.

**Поверхностные** – воды рек, озер, морей, океанов – содержат кроме примесей, имеющихся в атмосферной воде, соли – карбонаты кальция, магния, натрия и калия, а также сульфаты и хлориды. При содержании солей менее 1 г на 1 кг воды называют пресной, а более 1 г – солёной.

**Подземные** – воды артезианских скважин, колодцев, ключей, гейзеров – характеризуются разнообразным составом в зависимости от вида и структуры почв и горных пород, через которые в подземные водоёмы просачиваются атмосферные и поверхностные воды. Фильтрующая способность почв и горных пород обуславливает высокую прозрачность подземных вод и отсутствие в них примесей органического происхождения. Так, подземные воды, насыщенные хлоридом натрия, служат сырьём для производства соды, гидроксида натрия и хлора. Из подземных рассолов получают также йодиды, бромиды и другие соли.

Промышленные, строительные, пищевые, перерабатывающие и другие предприятия используют воду как сырье или как компонент готового продукта (например, в изделиях пищевых предприятий: хлеб, пиво, ликероводочные изделия, квас). Пищевые предприятия применяют преимущественно воду из городских водопроводов, а также из артезианских скважин, рек и водохранилищ.

В некоторых случаях воду употребляют как растворитель, теплоноситель или охладитель для санитарно-технических, бытовых и других нужд.

Для промышленных и бытовых нужд применяют пресную воду, составляющую примерно 3 % всех запасов воды. В целях экономии используют оборотную воду, т. е. использованную и возвращённую в производственный цикл.

В зависимости от назначения вода условно подразделяется на техническую, питьевую и лечебную. Свойства и состав питьевой воды должны соответствовать СанПиН 10-124 РБ 99.

**Питьевая вода.** Общее число микроорганизмов в 1 мл питьевой воды не должно быть выше 100, число бактерий группы кишечных палочек – не более 3. Концентрация химических веществ, которые встречаются в природной воде или добавлены к воде при ее обработке, не должна превышать, мг/л: алюминий – 0,5; бериллий – 0,0002; молибден – 0,25; мышьяк – 0,05; нитраты – 45,0; полиакриламид – 2,0; свинец – 0,03; селен – 0,001; стронций – 7,0; фтор – 0,7–1,5 [7].

Содержание примесей, которые влияют на органолептические свойства воды и встречаются в природных водах или добавляются к воде при ее обработке, не должно превышать, мг/л: железо – 0,3; марганец – 0,1; медь – 1,0; полифосфаты – 500,0; хлориды – 350,0; цинк – 5,0.

**Промышленные воды** содержат примеси не больше нормы, которую устанавливают в зависимости от вида производства. Такую воду применяют главным образом в качестве охлаждающего агента, транспортирующей среды для сыпучих материалов, растворителя и др.

**Лечебные воды** содержат значительное количество минеральных солей, газов и других элементов.

При характеристике площади водосбора используют такое понятие, как *бассейн поверхностного водного объекта* (бассейн водного объекта) – территория, включающая водосборные площади гидравлически связанных водоёмов и водотоков, главный из которых впадает в море или озеро.

## 1.4 Загрязнение гидросферы

Серьёзные меры предпринимаются для предотвращения растущего загрязнения водных объектов сточными водами, отводимыми после использования в бытовой и производственной деятельности человека. По своей природе загрязнения делятся на минеральные, органические, бактериологические и биологические. Из общего числа сточных вод 69 % является условно

чистыми, 18 % – загрязненными и 13 % – нормативно-очищенными. Страгие критерии такого деления отсутствуют. Неочищенные сточные воды нуждаются в многократном разбавлении их чистой водой. Особенно загрязняющими являются производства нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной и химической промышленности. Нормативно-очищенные воды требуют разбавления на каждый 1 м<sup>3</sup> до 6–12 м<sup>3</sup> свежей воды. Процесс загрязнения жидкости начинается уже при ее производстве, хранении, транспортировке.

#### **Классификация загрязнений:**

- производственные;
- операционные (при хранении или транспортировке жидкости);
- эксплуатационные;
- сырьевые;
- технологические (при воздействии на жидкость активных химических веществ или других физико-химических факторов (температура, давление);
- атмосферные (при воздействии на жидкость атмосферного воздуха, попадании пыли в процессе производства, хранения, транспортировки при недостаточной герметичности);
- контактные загрязнения (при контакте жидкости и материалов, из которых изготовлено оборудование);
- износные (частицы материалов возникают при взаимодействии жидкости с изношенным оборудованием (насосы, трубы) при перекачке (при трении изношенных деталей));
- остаточные;
- инкрементные (при транспортировке, хранении могут произойти различные химические реакции, связанные с условиями хранения).

**Гидросфера** – совокупность всех водных объектов земного шара. В настоящее время существенно обострились проблемы, связанные с ее загрязнением [8–10]. Чистая вода становится дефицитным веществом. В 2000 г. расход воды в мире на промышленные и бытовые нужды составлял 23 400 км<sup>3</sup>, что привело к такому же увеличению объема поступивших в океан загрязненных вод.

Загрязнение воды обуславливает комплекс проблем. Серьёзнейшая из них – наличие даже очень малых количеств токсичных веществ [8]. Особую опасность в этом плане представляют соединения свинца, используемые, в частности, как присадки к бензину, соединения ртути, оказывающие сильное разрушительное действие на живые организмы.

В США 20 млн т отходов, содержащих различные химические вещества, ежегодно сбрасывается в оз. Верхнее, а оз. Эри превратилось в отстойник сточных вод.

По ориентировочным данным в настоящее время масштабы нефтяных загрязнений океана составляют 10–25 % его площади. Чтобы полностью

обезвредить все нефтяные загрязнения, попадающие за год в океан, требуется примерно  $7 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> чистой морской воды [11].

Вода является основным естественным ресурсом, необходимым для промышленности. Например, на химических предприятиях потребность в воде составляет несколько миллионов кубометров в сутки [12].

Пресные водоёмы загрязняются излишним употреблением удобрений в сельском хозяйстве [1]. Значительная их часть не усваивается растениями, уходит с дождевыми и тальными водами, в реки и водохранилища. В последних на обильном питании бурно развиваются водоросли, особенно синезеленые, при отмирании которых выделяются токсины, отравляющие водоёмы. Большую тревогу вызывает загрязнение водоёмов пестицидами – химическими веществами, используемыми для борьбы с вредителями сельского хозяйства.

Кислотные дожди – атмосферные осадки в виде дождя или снега, поступают в атмосферу, в основном, в результате выброса отходов металлургической и химической промышленности. При выпадении кислотных дождей и таянии кислотного снега образуется серная кислота, оказывающая вредное воздействие на здоровье людей, состояние растительного и животного мира, зданий и сооружений. В последние годы существенно понизился pH осадков во всем мире. Повышенная кислотность отрицательно влияет на растительный и животный мир водоемов, при значениях pH, равных 3,0–3,5, водная среда становится гибельной для всех рыб и почти для всех растений.

## 2 СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ВОДЫ

---

### 2.1 Изотопный состав

**В** 1780 г. английский физик и химик Г. Кавендиши и французский химик А. Лавуазье установили, что вещество, называемое водой, состоит из кислорода и водорода, а в 1800 г. английские физикохимики У. Николсон и Э. Карлейль показали, что молекула воды построена из двух атомов водорода и одного атома кислорода. В 1842 г. французский химик Ж. Дюма установил массовое соотношение водорода и кислорода в воде как 2:16. Природная вода, в каком бы агрегатном состоянии ни была, представляет собой систему, содержащую другие вещества (газообразные, жидкие или твёрдые), а также в незначительных количествах разные изотопы водорода и кислорода [4; 13–15].

Водород существует в форме трёх изотопов: протий  $^1\text{H}$  с массой 1,007822 а. е. м., дейтерий  $^2\text{H}$  (D) – 2,0141 у. е. и тритий  $^3\text{H}$  (T) – 3,017001 у. е. (образуется при ядерных распадах). Содержание D в природной смеси изотопов водорода – 0,014–0,015 %.

Известны три изотопа кислорода  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  с массовыми числами 16, 17 и 18. Соотношение их в природной смеси изотопов: 99,759:0,037:0,204.

Природная вода является смесью молекул следующего состава:  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{16}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{17}\text{O}$ ,  $\text{HD}^{18}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{18}\text{O}$ .

Воду, отвечающую химическим формулам  $\text{D}_2^{16}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{17}\text{O}$ ,  $\text{D}_2^{18}\text{O}$ , называют тяжёлой водой; воду, в состав которой входит тритий, – сверхтяжёлой водой –  $\text{T}_2\text{O}$ . Тяжёлую воду выделяют путём электролиза природной воды. Она труднее обычной воды подвергается электролизному разложению, так как энергия потери заряда у иона дейтерия во много раз меньше, чем у иона протия. По физическим свойствам тяжёлая вода отличается от обычной. Она замерзает при 3,82 °C, кипит при 101,43 °C, плотность при 20 °C равна 1,1059 г/см<sup>3</sup>. Максимальную плотность тяжёлая вода имеет при +11 °C. Растворимость солей в такой воде ниже, чем в обычной. Тяжёлая вода тормозит протекание жизненных процессов в животных и растительных организмах. Тяжёлую воду применяют в урановых котлах в качестве замедлителя ядерного распада. Сверхтяжёлая вода  $\text{T}_2\text{O}$  имеет следующие константы: температура плавления +9 °C, температура кипения +104 °C, плотность 1,33 г/см<sup>3</sup> [16].

Итак, вода – это смесь девяти различных видов молекул. В зависимости

от их соотношения изменяются все свойства воды, особенно плотность. Изотопный состав природной воды был определён в 1929 г. в связи с открытием изотопов кислорода и водорода [4]. В среднем изотопный состав естественной воды кроме  $H_2^{16}O$  (99,37 %) заметно представлен  $H_2^{18}O$  (0,2 %),  $H_2^{17}O$  (0,4 %), HDO (0,03 %).

## 2.2 Строение молекулы воды

Молекула воды представляет диполь. Так как масса и заряд ядра кислорода больше, чем у ядер водорода, то электронное облако смещается в сторону кислородного ядра. Если соединить прямыми линиями центры положительных и отрицательных зарядов, получится правильный тетраэдр [13, 14].

Благодаря наличию водородных связей каждая молекула воды образует водородную связь с четырьмя соседними молекулами, образуя ажурный сетчатый каркас в молекуле льда. Однако в жидком состоянии вода – неупорядоченная жидкость; водородные связи – спонтанные, короткоживущие, быстро рвутся и образуются вновь (рисунок 2.1). Все это приводит к неоднородности в структуре воды.

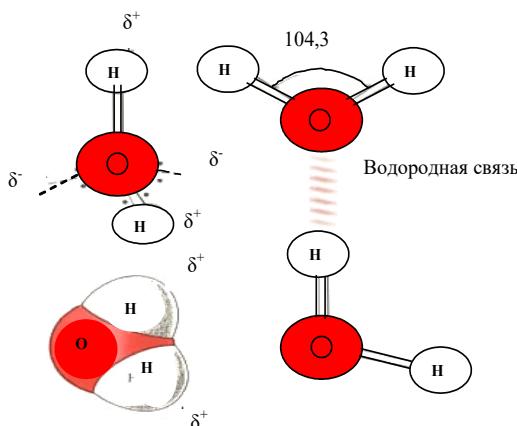


Рисунок 2.1 – Строение молекулы воды

Многообразие свойств воды и необычность их проявления в конечном счете определяется физической природой атомов кислорода и водорода. Схемы образования молекулы воды можно рассмотреть согласно представлениям о валентных связях (рисунки 2.2, 2.3). У атома водорода одна электронная оболочка с одним электроном  $1s^1$ , у атома кислорода – две электронные оболочки: внутренняя с двумя электронами и внешняя с шестью электронами  $1s^2 2s^2 2p^4$ .

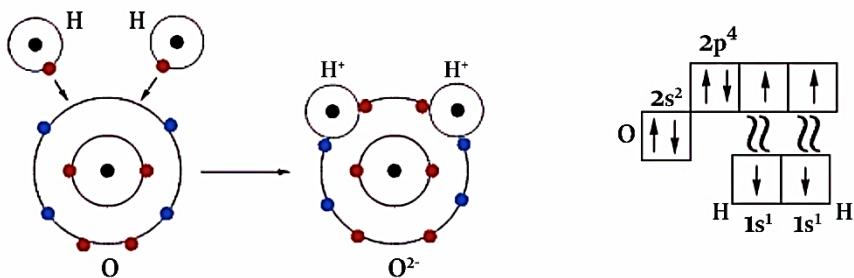


Рисунок 2.2 – Схема образования молекулы воды

Два атома водорода замещают вакансию двух недостающих (до восьми) электронов наружной оболочки кислорода, придавая ей устойчивость. Каждый из двух неспаренных электронов атома кислорода образует ковалентную связь с неспаренным электроном атома водорода. На рисунке 2.3 представлена схема перекрывания электронных облаков атомов кислорода и водорода при образовании химических связей в молекуле воды.

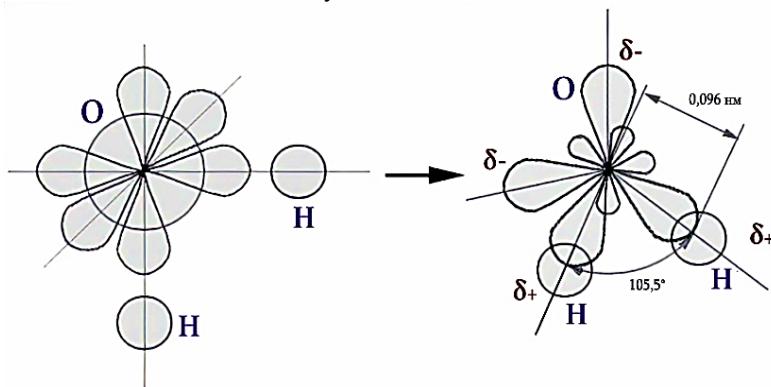


Рисунок 2.3 – Перекрытие электронных облаков атомов кислорода и водорода при образовании молекулы воды

Поскольку атомы водорода друг от друга заметно отталкиваются, угол между химическими связями водород – кислород не прямой ( $90^\circ$ ), а немного больше –  $104,5^\circ$ . В кристаллах льда угол между связями ( $109,28^\circ$ ) практически не отличается от тетраэдрического. В кристалле образуются 4 орбитали, ориентированные тетраэдрически. Две вершины этого тетраэдра заняты атомами водорода, две другие вакантны, что свидетельствует о наличии двух неподеленных пар электронов атома кислорода. Таким образом, у молекулы воды оказываются 4 полюса зарядов:

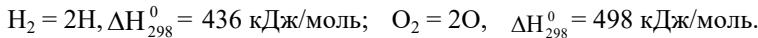
- 2 отрицательных ( $\delta-$ ) у атома кислорода – за счет избытка электронной плотности;
- 2 положительных ( $\delta+$ ) – за счет недостатка электронной плотности у ядер атомов водорода из-за смещения электронов в сторону кислорода.

Вследствие такой асимметричности распределения электрических зарядов, молекула воды полярна, т. е. является диполем с высоким значением дипольного момента:  $\mu = 0,620 \cdot 10^{-29}$  Кл·м. В связи с наличием большого дипольного момента и за счет двух гибридных орбиталей молекулы воды могут соединяться между собой, образуя водородные связи. Они могут присоединяться к ионам и молекулам других соединений, образуя гидраты инертных газов, хлора, метана и др.

Стандартная энталпия образования воды



Энергии атомизации водорода и кислорода



Теплота испарения воды



Средняя энергия каждой связи (O – H) составляет 463,5 кДж.

### **2.3 Структура воды в твердом и жидком состояниях**

Известно 10 кристаллических модификаций льда и аморфный лёд.

В природе лёд представлен, главным образом, одной кристаллической разновидностью, кристаллизующейся в гексагональной сингонии с плотностью 931 кг/м<sup>3</sup>. Под действием собственного веса лёд приобретает пластические свойства и текучесть. Кристаллическая структура льда похожа на структуру алмаза: каждая молекула H<sub>2</sub>O окружена четырьмя ближайшими к ней молекулами, находящимися на одинаковых расстояниях от неё, равных 2,76 Å и размещенных в вершинах правильного тетраэдра. В связи с низким координационным числом структура льда является ажурной, что влияет на его невысокую плотность. Лёд встречается в природе в виде собственно льда (материкового, плавающего, подземного), а также в виде снега, инея и т. д. Следует отметить, что, так как лёд легче жидкой воды, то образуется он на поверхности водоёмов, что препятствует дальнейшему замерзанию воды.

Природный лёд обычно значительно чище, чем вода, так как при кристаллизации воды в первую очередь решётку образуют молекулы воды. Лёд может содержать механические примеси – твёрдые частицы, капельки концентрированных растворов, пузырьки газа. Наличием кристаллов соли и капель рассола объясняется солоноватость морского льда [6, 17].

Тип модификации льда зависит от температуры и давления. Наличие разноимённых электрических зарядов на атомах водорода ( $\delta+$ ) и кислорода ( $\delta-$ ) позволяет молекулам воды при образовании кристаллической решётки льда ориентироваться друг относительно друга таким образом, что каждая её молекула образует водородные связи с 4 соседними молекулами воды (рисунок 2.4): с двумя молекулами воды она взаимодействует за счёт положительного заряда двух атомов водорода, с двумя другими – за счёт отрицательного заряда двух неподеленных пар электронов атома кислорода.

В кристалле льда при температуре  $-150^{\circ}\text{C}$  (см. рисунок 2.4) каждый атом кислорода тетраэдрически связан с четырьмя атомами водорода, причём с двумя из них – полярной ковалентной связью, а с двумя другими – водородной связью [17]. В свою очередь каждый атом водорода связан одновременно с двумя атомами кислорода: с одним – ковалентной, а с другим – водородной связью.

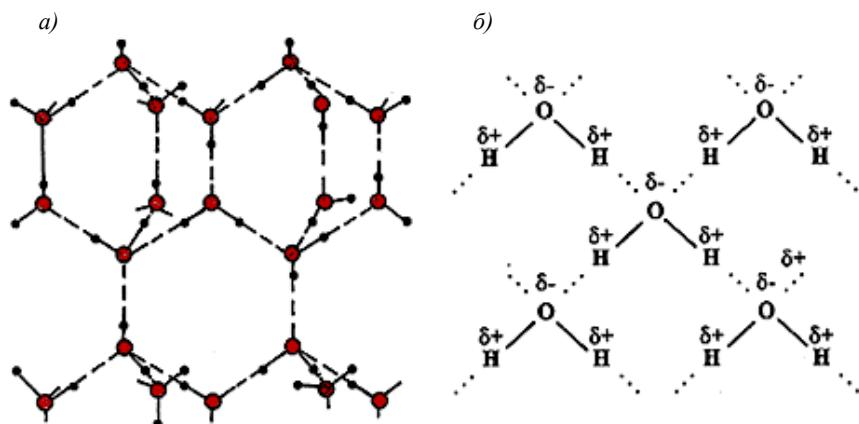


Рисунок 2.4 – Схема образования водородных связей между молекулами воды в структуре льда: трёхмерные изображения (а) и на плоскости (б)

Молекулы воды образуют в структуре льда слои, в которых каждая молекула связана с тремя соседними, принадлежащими к тому же слою, и с одной молекулой из соседнего слоя. Расстояния между атомами кислорода равны 0,276 нм, что примерно в два раза больше удвоенного ковалентного радиуса атома кислорода ( $r = 0,066$  нм). Поскольку размеры атома водорода очень малы, а расстояния между атомами кислорода  $\text{O}-\text{O}$  велики, в кристаллической решётке льда существуют пустоты. В результате создаётся ажурная кристаллическая структура льда, далёкая от плотной упаковки, имеющая каналообразные цилиндрические пустоты, размеры которых немного больше единичных молекул воды.

Жидкая вода имеет более сложную структуру [18]. Для объяснения аномальных свойств воды предложено несколько моделей её структуры. Жидкую воду рассматривают как кристаллическое вещество (жидкие кристаллы). Упорядоченное расположение частиц воды в жидким состоянии (ближний порядок) доказано экспериментально. Полагают, что при плавлении льда кристаллическая решётка частично разрушается, и пустоты в ажурной структуре льда заполняются освободившимися молекулами воды. Плотность жидкой воды вследствие этого увеличивается. Подсчитано, что в жидкой фазе при 0 °С несвязанные, заполняющие пустоты в структуре молекулы составляют около 16 % от их общего количества.

Интересна модель структуры жидкой воды в виде «мерцающих» кластеров (рисунки 2.5, 2.6), состоящих из соединённых водородными связями молекул, плавающих в более или менее «свободной» воде [19]. Кластеры

постоянно существуют в жидкой фазе, непрерывно об разуясь и разрушаясь в соответствии со случайными тепловыми флуктуациями в микроучастках жидкости. Австралийский физик Ф. Фрэнк и немецкий физик лауреат Нобелевской премии В. Вин определили период полураспада кластера как  $10^{-10} - 10^{-11}$  с, что соответствует времени релаксационных процессов в воде. Это время в 100–1000 раз больше периода молекулярных колебаний.

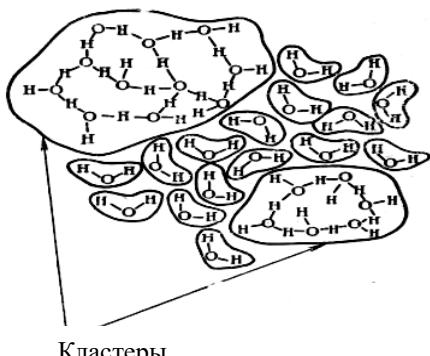


Рисунок 2.5 – Структура жидкой воды в виде «мерцающих» кластеров

Молекулы воды, образующие кластеры, напоминают взявшись за руки парашютистов. Можно представить, что каждая молекула воды держит одной «рукой» другую за «пояс». Вторая «рука» каждой молекулы свободна и направлена вниз либо вверх от плоскости треугольного квадратного или пятиугольного кластера. В гексамере четыре молекулы воды используют для связывания по одной «руке», как в циклических полимерах, а две молекулы воды – по две «руки».

Другой взгляд на структуру воды – представление ее в виде равновесной смеси полимеров. Полимеризация осуществляется за счет слабых водородных связей. Столкнувшись друг с другом, полимерные структуры переходят одна в другую, разлагаются и вновь образуются.

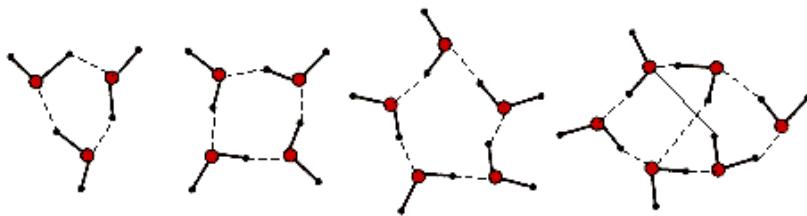


Рисунок 2.6 – Схемы молекул воды, образующих кластеры

## 2.4 Свойства воды

Чистая вода представляет собой бесцветную (в тонком слое) или голубоватую (в толстом слое) прозрачную жидкость, не имеющую ни запаха, ни вкуса. Она обладает определенным комплексом физических и химических свойств.

### *Физические свойства воды*

Масса 1 мл химически чистой дистиллированной воды при температуре её наибольшей плотности (около 4 °C) принята за дольную единицу массы (0,001 кг) и называется граммом.

Теплопроводность воды незначительна по сравнению с теплопроводностью металлов и соизмерима с неметаллами: так, коэффициент теплопроводности асбеста равен 0,35 Вт/(м·К); кирпича – 0,44 Вт/(м·К); льда: температурой 0 °C – 2,21 Вт/(м·К); –20 °C – 2,44 Вт/(м·К); –60 °C – 2,91 Вт/(м·К). Малая теплопроводность и большая теплоёмкость воды обусловливают ее использование в качестве теплоносителя.

Некоторые физико-химические параметры воды:

Удельная электропроводность при 18 °C.....  $4,41 \cdot 10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>

Температура замерзания при 760 мм рт. ст... 0,00 °C

Температура кипения..... 100,00 °C

Дизелектрическая проницаемость:

при 0 °C..... 74,6

при 18 °C..... 81,0

Коэффициент теплопроводности..... 0,599 Вт/(м·К)

Химически чистая вода обладает рядом физических свойств, резко отличающих её от других природных веществ. Эти особые свойства известны как *аномальные свойства* воды. Она имеет уникальную зависимость плотности от температуры. Если бы её плотность при +4 °C не была максимальной, то, наверное, не было бы и жизни на Земле. Если бы зимой лёд опускался на дно водоёмов, все водоёмы промёрзли бы до дна. При затвердевании плотность воды уменьшается, и за счёт этого лёд плавает, сохраняя все живое, находящееся в воде.

Для воды характерны аномальные изменения плотности, температуры кипения и замерзания, теплоёмкости, диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения в зависимости от внешних условий [1, 4].

**Плотность** практически всех веществ при нагревании уменьшается из-за увеличения объёма. У воды наблюдается то же самое, за исключением интервала от 0 до 4 °C, когда с повышением температуры объем воды уменьшается и максимальная плотность соответствует 4 °C.

**Температуры кипения и замерзания** воды аномально высоки. У воды наблюдается отклонение от характерной для водородных соединений элементов VIA группы периодической системы *Д. И. Менделеева* ( $H_2O$ ,  $H_2S$ ,  $H_2Se$ ,  $H_2Te$ ) зависимости изменения температуры плавления и кипения от их молярных масс. Причиной этого является образование ассоциатов молекул за счёт водородных связей. На отрыв молекул друг от друга требуется дополнительная энергия.

Температура замерзания воды с увеличением давления понижается, а не повышается.

**Теплоёмкость** воды в 5–30 раз выше, чем у большинства веществ. Только у водорода и аммиака теплоёмкость выше, чем у воды. Удельная теплоёмкость всех веществ, кроме воды и ртути, при повышении температуры повышается. Температурная зависимость теплоёмкости воды в интервале от 0 до 35 °C проходит через минимум. Повышенная теплоёмкость воды свидетельствует о том, что по сравнению с другими веществами она способна поглощать тепло, существенно не нагреваясь. Это объясняется тем, что при нагревании часть теплоты затрачивается на разрыв водородных связей. Способность воды накапливать большие запасы тепловой энергии обусловливает сглаживание резких температурных колебаний на прибрежных участках Земли в разное время года: вода является регулятором температуры на планете.

**Диэлектрическая проницаемость** воды при 25 °C равна 78,5 (у  $H_2S$  меньше 10). Это значит, что две электрически взаимодействующие частицы в воде притягиваются или отталкиваются примерно в 80 раз слабее, чем в вакууме, т. е. полярные молекулы воды нейтрализуют внешнее электрическое поле и межатомные или межмолекулярные силы взаимодействия погруженных в нее веществ ослабевают. Вследствие высокой диэлектрической постоянной вода обладает, по сравнению с другими жидкостями, большей растворяющей и диссоциирующей способностью.

Поверхностное натяжение ( $\sigma$ ) численно равно работе, затрачиваемой на изотермическое образование единицы новой поверхности раздела фаз. Для большинства чистых жидкостей на границе с воздухом, насыщенным их парами,  $\sigma$  изменяется в пределах  $1 \cdot 10^{-2}$  Дж/м<sup>2</sup>, а для воды при 20 °C  $\sigma = 7,275 \cdot 10^{-2}$  Дж/м<sup>2</sup>. Вода имеет самое большое значение поверхностного натяжения из всех жидкостей (кроме ртути). Это также вызвано образованием водородных связей между молекулами воды.

*Химические свойства воды* [14]. Вода растворяет многие разные по химической природе вещества. Именно в водных растворах возникли первые живые организмы, сохраняющие на высшей стадии развития водный раствор в виде плазмы крови и межклеточной жидкости. Строение молекулы воды, представляющей диполь, способствует растворению веществ. Высокая растворяющая способность воды объясняется ярко выраженными электронно-донорными и электронно-акцепторными свойствами ее молекул.

Интересно, что, помогая контактирующим с ней молекулам распадаться на ионы, сама вода проявляет большую устойчивость. Вода химически не изменяется под воздействием большинства тех соединений, которые она растворяет, т. е. является инертным растворителем. Это важно для всех живых организмов на Земле, поскольку необходимые клеткам и организмам питательные вещества поступают в виде водных растворов в малоизмененном виде.

О большой химической устойчивости воды свидетельствуют достаточно высокие отрицательные значения энергии  $\Delta G$  образования жидкой и парообразной фаз:

$$\Delta G_{\text{обр}}(\text{H}_2\text{O}_{(\text{ж})}) = -237,57 \text{ кДж/моль};$$

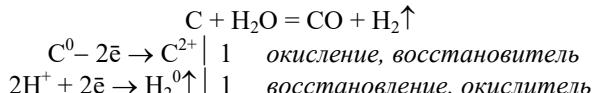
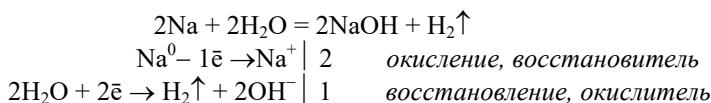
$$\Delta G_{\text{обр}}(\text{H}_2\text{O}_{(\text{г})}) = -228,94 \text{ кДж/моль}.$$

Чистая вода содержит очень мало ионов, поэтому является плохим проводником тока и относится к слабым электролитам.

Молекулы воды характеризуются большой термической устойчивостью. Разложение воды на водород и кислород начинается только при температуре выше 1000 °С. При 2000 °С степень диссоциации составляет 1,8 %.

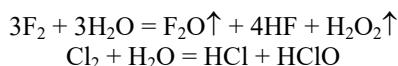
#### *Окислительные свойства воды*

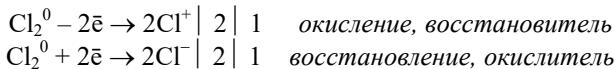
Вода на холоде окисляет активные щелочные и щелочно-земельные металлы, при повышенных температурах – железо, цинк, углерод и т. д., а сама при этом частично восстанавливается:



#### *Восстановительные свойства воды*

Под действием сильных окислителей (фтор, хлор, электрический ток) вода проявляет восстановительные свойства:

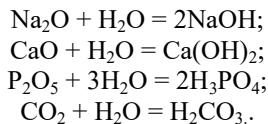




### *Взаимодействие с веществами без изменения степени окисления*

Вода взаимодействует с другими веществами по ионному, координационному или адсорбционному механизмам.

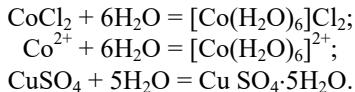
Ионный механизм реализуется при взаимодействии с оксидами щелочных, щелочно-земельных и редкоземельных металлов, а также с кислотными оксидами:



Вода, присоединенная к веществу по ионному механизму, называется *конституционной*. При нагревании она удаляется с большим трудом. Так, например, отщепление воды от гидроксида натрия начинается только при 1388 °C:



По координационному механизму вода присоединяется к ионам металлов-комплексообразователей:



Полученные соединения называют *аквакомплексами*, а воду, вошедшую в их состав, *кристаллизационной*. Кристаллизационная вода удаляется легче, чем конституционная.

По адсорбционному механизму происходит присоединение молекул воды к поверхности конденсированных тел за счёт межмолекулярных сил притяжения. Воду, присоединённую по адсорбционному механизму, называют *гигроскопической*. Она удаляется легче, чем кристаллизационная. Явление адсорбции влаги зависит от химического состава поверхности адсорбата, физического состояния поверхности, внешних условий ( $T, p$  и др.).

Интенсивная адсорбция воды происходит на поверхности твёрдых тел, которые способны к хемическому взаимодействию с ней, например, на оксидах металлов, ионных кристаллах, гидратированных формах кремнезёма, силикатов и т. д.

Особый вид химических взаимодействий – взаимодействие воды с солями, которые всегда присутствуют в ней. Этот тип реакций называют *гидролизом*.

Гидролизу подвергаются как неорганические, так и органические вещества (сложные эфиры, алкоголяты, карбиды, фосфиды и др.). Гидролиз солей является частным случаем процесса гидролиза и представляет реакцию ионного обмена между солью и водой, протекающую с изменением кислотности раствора. Гидролизу подвергаются растворимые соли, в состав которых входят катионы слабых оснований или анионы слабых кислот. При гидролизе солей, содержащих катион или анион слабого электролита, изменяется кислотность раствора. Соли, образованные катионами сильного гидроксида и анионами сильной кислоты, гидролизу не подвергаются.

Реакции гидролиза находят широкое применение в процессах очистки сточных вод. Очистка воды с применением гидролизующихся коагулянтов приводит к полимеризации и кристаллизации продуктов гидролиза, образованию малорастворимых коагулянтов, которые обволакивают частицы взвеси и, объединяясь, образуют агрегаты, способные к осаждению.

## 3 ВОДА И МИКРООРГАНИЗМЫ

### 3.1 Морфология микроорганизмов

**С**истематика живых организмов – одна из наиболее сложных задач биологии. Систематика концентрирует все основные достижения науки – чем они более конкретны, тем более точна классификация.

По поводу систематизации живого мира нашей планеты высказываются различные мнения. Ранее (А. Л. Тахтаджян, БСЭ) систематика органического мира выделяла в качестве наиболее крупных таксонов 2 надцарства (домена) (прокариоты (Prokaryota) и эукариоты (Eukaryota)) и 4 царства (бактерии, грибы, растения, животные).

Домен (или надцарство) – самый верхний уровень (ранг) группировки организмов в системе, включающий одно или несколько царств. Термин был предложен в 1990 г. Карлом Вёзе. Американский ученый Карл Вёзе смог найти «универсальную» молекулу, которая присутствует у всех организмов и связана с синтезом белка. Синтез белка происходит на рибосомах, причём у эукариот и прокариот молекулы рРНК состоят из разных субъединиц. Эта субъединица оказалась объективной для сравнения отрезков и определения родства и все организмы хорошо ложатся на филогенетическое древо [20], которое К. Вёзе и издал в 1985 г. (рисунок 3.1).

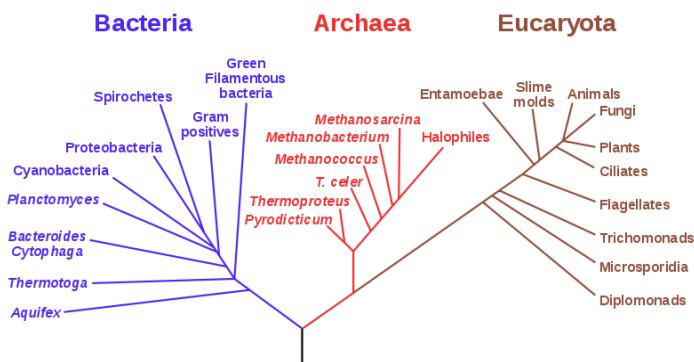


Рисунок 3.1 – Филогенетическое дерево по К. Вёзе

Сейчас его концепция развивается, но полученных данных еще слишком мало, чтобы применять филогенетические методы для идентификации и классификации микроорганизмов и других живых существ.

**Номенклатура** – присвоение названия соответствующего ранга классифицируемым организмам.

В XVIII веке *К. Линнеем* была предложена *бинарная номенклатура*, отображающая название рода (первое слово), характеризующее какой-либо морфологический или физиологический признак организма и его видовое название.

Также в систематике микроорганизмов используют нумерическую таксономию, предложенную *М. Адансоном*. В основу данной систематики положены следующие принципы: равномерность изучаемых признаков организмов, доведение их количества до максимальной величины, выделение каждой таксономической группы по числу совпадающих признаков. Этот подход к систематике достаточно объективен, но для его реализации необходимы математические расчёты с использованием современной техники.

В биологии выделяют два подхода к систематике живых организмов – филогенетическую, или естественную, и искусственную.

**Филогенетическая систематика** занимается идентификацией и прояснением эволюционных взаимоотношений среди разных видов жизни на Земле, как современных, так и вымерших. Эволюционная теория утверждает, что сходство среди индивидуумов или видов часто указывает на общее происхождение или общего предка. Поэтому взаимоотношения, установленные филогенетической систематикой, часто описывают эволюционную историю видов и его филогенез, исторические взаимоотношения между организмами или его частями, например их генов. Филогенетическая таксономия, являющаяся ответвлением, но не логическим продолжением, филогенетической систематики, занимается классификацией групп организмов согласно степени их эволюционных отношений.

Основателем систематики, области науки, которая занимается классификацией живых организмов и взаимоотношениями между компонентами живого, считается *Карл Линней*. Однако в конце 1950-х немецкий энтомолог *Вилли Генниг* высказал идею, что систематика должна отображать известную эволюционную историю так близко, как только возможно. Так был основан подход к систематике, который он назвал филогенетической систематикой. Противники *В. Геннига* пренебрежительно называли его последователей «кладистами», из-за акцента на признание только монофилетических групп. Однако кладисты приняли это название как полезный термин, и в настоящий момент кладистичный подход доминирует в систематике.

Существуют две главные группы методов изучения филогенетических взаимоотношений: фенетические и кладистические. Важно отметить, что фенетика и кладистика имели запутанные взаимоотношения. Большинство современных биологов-эволюционистов отдают преимущество кладистике, хотя, строго говоря, кладистичный подход может приводить к неинтуитивным результатам.

**Фенетика**, или числовая таксономия, использует разные мероприятия для определения наибольшего сходства рассматриваемых видов. Нет никаких ограничений на число или тип особенностей, данных, которые могут использоваться, хотя все данные должны быть сначала преобразованы в числовые значения без любого «нормирования». Каждый организм потом сравнивается с каждым другим по всем особенностям, в результате подсчитывается число схожестей (или отличий). Затем организмы группируются таким образом, чтобы наиболее похожие были расположены вместе, а наиболее различающиеся – на максимальном расстоянии. В результате получают таксономические кластеры или фенограммы, которые не обязательно отображают генетическое сходство или эволюционную связь. Отсутствие эволюционного значения в фенетике привело к незначительному влиянию на классификацию животных, и впоследствии интерес к использованию фенетики значительно уменьшился.

Альтернативный подход к схематическому изображению взаимоотношений между таксонами называется **клавистикой**. Основное предположение клавистики заключается в том, что члены группы имеют общую эволюционную историю. Поэтому они более близко относятся друг к другу, чем к другим группам организмов. Связанные группы определяются по наличию набора уникальных особенностей (апоморфий), которые отсутствовали в отдаленных предках, но которые характерны для большинства или всех организмов в пределах группы. Полученные характеристики, относящиеся к членам группы, называются синапоморфиями. Поэтому, в отличие от фенетических, клавистические группы не зависят от того, сходны ли организмы по физическим чертам, а зависят от их эволюционных взаимоотношений. Действительно, в клавистических анализах у двух организмов могут быть общими многочисленные характеристики, но они будут членами разных групп.

**Филогенетическая систематика микроорганизмов** в настоящее время неприемлема. Многие микроорганизмы имеют одинаковые морфологические признаки, но различаются по строению геномов, родственные связи между ними часто бывают неясными, а эволюция многих просто неизвестна. Кроме того, микроорганизмы значительно различаются по архитектуре, системам биосинтезов, организации генетического аппарата. Их разделяют на группы для демонстрации степени сходства и предполагаемой эволюционной взаимосвязи. Базовый признак, используемый для классификации микроорганизмов, – тип клеточной организации.

**Искусственная систематика микроорганизмов** объединяет организмы в группы на основе сходства их важнейших свойств. Эту характеристику применяют для определения и идентификации микроорганизмов. С позиций, например, медицинской микробиологии, микроорганизмы делят в соответствии с влиянием, которое они оказывают на организм человека: патогенные, условно-патогенные, непатогенные. Разработаны разные быстрые и

доступные тесты, позволяющие, как минимум, в общих чертах идентифицировать микроорганизмы. В отношении бактерий наибольшее распространение нашли предложенные американским бактериологом Дэвидом Берджи подходы к систематизации, учитывающие один или несколько наиболее характерных признаков. Согласно его принципам легко выявляемые свойства являются основой для объединения бактерий в большие группы.

В последнее время в связи с развитием молекулярной биологии разработаны новые подходы к характеристике микроорганизмов, основанные на методах геносистематики, позволяющей охарактеризовать наследственные свойства (генотип) микроорганизмов, которые отражают структурные и функциональные свойства (фенотип). Геносистематика изучает физико-химические свойства ДНК с целью создания естественной системы микроорганизмов.

Систематика (таксономия) микроорганизмов заключается в распределении их по определенным группам (категориям), каждая из которых имеет свое название: класс – порядок – семейство – род – вид. В микробиологии широко применяется термин «штамм» – понятие более узкое, чем вид.

**Вид** – основная таксономическая единица, представляет совокупность особей одного генотипа, обладающих хорошо выраженным фенотипическим сходством.

**Клон** – культура, полученная из одной клетки. Совокупность (популяцию) микроорганизмов, состоящую из особей одного вида, называют чистой культурой.

**Штамм** – выделенный в чистой культуре изолят вируса или организма, размножающегося бесполым путём.

### **Особенности систематики бактерий**

При идентификации и систематизации бактерий учитывают морфологические признаки (форму, размеры, наличие и положение жгутиков, способность к спорообразованию), а также физиологические и биохимические свойства (источники питания, характер получения энергии, потребность в кислороде, патогенность и др.). В последние годы начинают учитывать также серологические свойства (реакции с иммунными сыворотками) и состав ДНК.

### **Особенности систематики вирусов**

В основу классификации вирусов положен тип нуклеиновой кислоты, образующей геном. Соответственно выделяют рибовирусы (РНК-вирусы) и дезоксирибовирусы (ДНК-вирусы). Видовые названия вирусов обычно связывают с вызываемыми ими заболеваниями (например, вирус бешенства) либо по названию места, где они были впервые выделены (например, вирусы Коксаки, вирус Эбола). Если семейство включает большое количество видов, то видовые названия дают в соответствии с антигенной структурой и разделяют их на типы (например, вирус герпеса 1-го типа). Реже используют фамилии ученых, впервые их выделивших (например, вирус Эпстайна – Барр).

Далее приведено описание наиболее важных групп организмов.

### 3.1.1 Археи

**Археи** (*Archaea*), старое название – архебактерии (*Archaeabacteria*) – особый домен. Оценки учёных позволяют утверждать, что суммарная биомасса архей на планете ( $10^{14}$  тонн) превышает посчитанную до этого биомассу всех остальных форм жизни –  $2,4 \cdot 10^{12}$  тонн. Большая их часть – автотрофы. Среди архей по состоянию на 2003 г. известен лишь один паразитический организм – *Nanoarchaeum equitans*.

Археи широко распространены в природе, занимая в том числе и такие экологические ниши, которые недоступны другим живым организмам. Ацидофилы живут в кислых средах (рН 1–5); алкалифилы предпочитают щелочи (рН 9–11), в горячих источниках живут археи-термофилы, устойчивые к температурам (+45...+113 °C); психрофилы способны к размножению при сравнительно низких температурах (-10...+15 °C) [20]. Барофилы выдерживают давление до 700 атм, галофилы живут в соляных растворах с содержанием NaCl 25–30 %. Ксерофилы выживают при минимальном уровне влаги.

Размеры клеток архей типичны для большинства известных прокариот, средний диаметр – около 1 мкм. Самыми маленькими среди архей являются клетки вида *Nanoarchaeum equitans* – 0,4 мкм. Форма клеток разнообразна: встречаются сферические, палочкообразные, спиральные, треугольные и прямоугольные виды; многие имеют жгутики, в состав которых, в отличие от эубактериальных жгутиков, входит не флагеллин, а гликопротеины.

Архебактерии не способны производить сложные гидролитические ферменты, поэтому в большинстве могут усваивать лишь простейшие органические вещества, однако они способны существовать в более широком диапазоне свойств окружающей среды и меньше от нее зависят.

Уникальные особенности архебактерий помимо строения 16s рРНК:

- многие макромолекулы клеточной стенки архей уникальны и, напротив, в них нет характерного для эубактерий пептидогликанамуреина, а его функции выполняет отличный по строению псевдомуреин. Поэтому архебактерии нечувствительны к пенициллину и другим антибиотикам, подавляющим синтез пептидогликана;
- мембранные липиды образованы не глицерином и жирными кислотами как у всех эубактерий, а глицерином и терпеноидными спиртами;
- генетический материал имеет ряд признаков, сближающих архей с эукариотами, например, наличие инtronов.

Рибосомы по размеру схожи с рибосомами эубактерий, а по форме – с рибосомами эукариот. Ряд рибосомальных белков уникален.

Геном представлен двухцепочной кольцевой ДНК длиной от 500 до 4000 тыс. нуклеиновых последовательностей и кольцевых плазмид – от 2813 до 41 229 нуклеотидных пар (н. п.). Наименьшим среди архей является геном *Nanoarchaeum equitans*, состоящий из 490 885 н. п.

Для архей описаны разные способы размножения: равновеликое бинарное деление, почкование, фрагментация.

В настоящее время выделяют 4 типа архей:

- Crenarchaeota – термофилы, термоацидофилы, серные анаэробные бактерии;
- Euryarchaeota – метаногенные и галофильные археи;
- Nanoarchaeota – единственный известный представитель *Nanoarchaeum equitans*;
- Korarchaeota – ДНК обнаружены в геотермальных источниках США, Исландии, на рисовых полях Японии, культивируемые виды пока неизвестны.

### 3.1.2 Бактерии

**Бактерии** – обширная группа одноклеточных микроорганизмов (более 5000 видов), характеризующихся отсутствием окруженного оболочкой клеточного ядра. Бактерии населяют все среды обитания. Наибольшее количество их находится в верхнем слое (10 см) почвы.

**Форма и размеры бактерий.** По форме различают бактерии: шаровидные, кокковые, палочковидные, извитые (рисунок 3.2), изогнутые, почкующиеся, неправильной формы (у архебактерий).



Рисунок 3.2 – Формы бактерий

**Кокки** имеют окружную форму, диаметр 1–2 мкм. В зависимости от расположения клеток после деления различают следующие группы: *микрококки* – клетки располагаются поодиночно; *диплококки* – клетки не разделяются, а остаются связанными попарно; *стрептококки* – клетки образуют цепочки разной длины. Эти морфологические группы имеют место при делении клеток в одной плоскости. При делении кокков в различных направлениях возникают скопления клеток, напоминающие гроздья винограда.

Это *стафилококки*. Деление кокков в двух взаимно перпендикулярных направлениях приводит к образованию *тетракокков*. Одновременное деление кокков в трех плоскостях характерно для *сащин*.

Кокки находятся в воздухе, земле, цветах, воде рек и морей, в пище и даже в нашем организме. Одни виды кокков полезны для человека – их используют в производстве молочных продуктов (кефира, масла, сыров), при приготовлении сироса; они участвуют в круговороте веществ в природе, разлагая остатки растений и животных и выполняя роль «мусорщиков»; они стимулируют рост культурных растений, снабжая их витаминами и гетероауксинами. Другие виды кокков наносят большой вред человеку, являясь источником заражения и нагноения ран, вызывая тяжёлые заболевания – крупозную пневмонию, менингит, гонорею и др. Развиваясь в некоторых молочных, мясных и рыбных продуктах, кокки выделяют в среду сильнейший яд – энтеротоксин – и вызывают пищевые отравления людей.

К *палочковидным* относят самую многочисленную группу бактерий, широко распространенных в природе.

**Бацилла** (палочка) – палочковидная бактерия (также название относится к представителям рода *Bacillus*). Морфологически выделяют коккобациллы – клетки более округлые, но длина клетки превышает ширину (как, например, у *Bacteroides fragilis*, *Yersinia pestis*, *Bordetella bronchiseptica*, *Haemophilus influenzae*). Палочковидная форма встречается у многих бактерий, в том числе у представителей семейств *Enterobacteriaceae*, *Bacillaceae*, *Lactobacillaceae*, *Brucellaceae*, *Pseudomonadaceae*.

По форме палочковидные бактерии бывают короткими (туляремийная), длинными (сибирязвенная) с закругленными и заостренными концами.

По взаимному расположению палочковидные формы распределяются на три подгруппы:

- диплобактерии и диплобациллы, располагающиеся попарно по длине (диплобацилла Моракса – Аксенфельда, диплобацилла Фридлендера);
- стрептобактерии (возбудитель мягкого шанкра) и стрептобациллы (бациллы сибирской язвы);
- бактерии и бациллы, которые располагаются без определенной системы (большинство палочковидных форм) [21].

К извитым формам бактерий относятся вибрионы, спирILLы и спирохеты.

**Вибрионы** имеют форму полумесяца или запятой, длина их 1,5–2 мкм, размножаются путем деления, очень быстро движутся. Существуют патогенные (холерный вибрион) и непатогенные формы.

**СпирILLы** имеют количество витков не более 5, длина 20 мкм и более. По диаметру крупнее бактерий, могут иметь жгутики с одной или двух сторон, расположенные полярно. Размножаются делением.

**Спирохеты** – бактерии, клетки которых имеют вытянутую спирально извилистую форму (диаметр 0,1–0,6; длина 5–500 мкм). Большинство видов имеет тон-

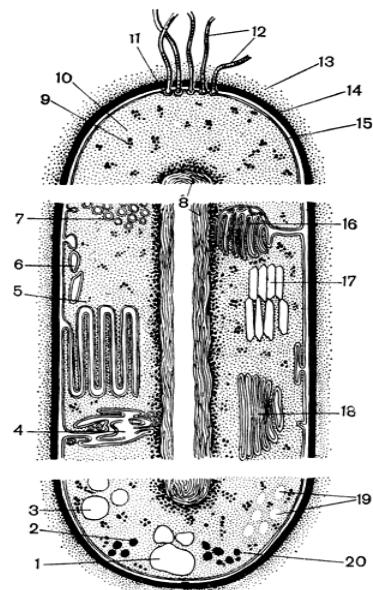
кую осевую (аксиальную) нить, вокруг которой спирально закручено тело клетки. Спирохеты лишены жгутиков, для них характерно змеевидное движение, при котором клетки вращаются вокруг своей длинной оси. Размножаются спирохеты поперечным делением. Известны непатогенные спирохеты, обитающие в воде пресных водоёмов, и патогенные, паразитирующие в моллюсках, а также возбудители сифилиса у человека (*Treponema pallidum*), европейского возвратного тифа (*Borrelia recurrentis*) и других спирохетозов. В искусственных условиях непатогенные спирохеты растут на обычных питательных средах, патогенные – на средах, содержащих сыворотку и кусочки свежей ткани или внутренних органов животных; некоторые формы до сих пор не выращены в лаборатории.

### Строение бактериальной клетки.

Внутренняя организация бактериальной клетки сложна (рисунок 3.3). Основные структуры бактериальной клетки представлены в верхней части рисунка, дополнительные, мембранные структуры, имеющиеся у фототрофных и нефототрофных бактерий, – в средней части, а включения запасных веществ – в нижней части.

**Клеточная стенка** – жёсткая оболочка клетки, расположенная снаружи от цитоплазматической мембраны, выполняет структурные, защитные и транспортные функции. Обнаруживается у большинства бактерий, архей, грибов и растений, животные и многие простейшие не имеют клеточной стенки. Толщина клеточной стенки 0,01–0,04 мкм. Она составляет от 10 до 50 % сухой массы бактерий. Количество материала, из которого построена клеточная стенка, изменяется в течение роста бактерий и обычно увеличивается с возрастом.

С помощью способа окраски, впервые предложенного в 1884 г. датским бактериологом К. Грамом, бактерии можно разделить на две группы: грамположительные и грамотрицательные. Грамположительные организмы способны связывать некоторые анилиновые красители, такие как кристаллический фиолетовый, и



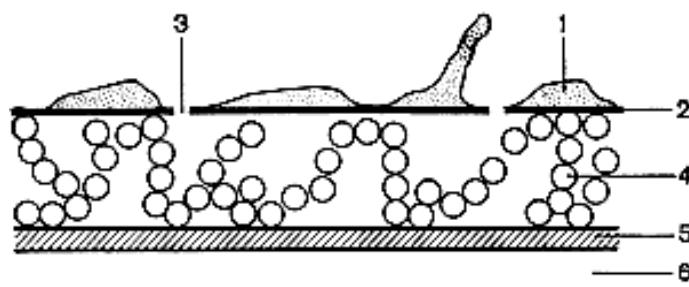
- 1 – гранулы поли-β-оксимасляной кислоты;
- 2 – жировые капельки;
- 3 – включения серы;
- 4 – трубчатые тилакоиды;
- 5 – пластинчатые тилакоиды;
- 6 – пузырьки;
- 7 – хроматофоры;
- 8 – ядро (нуклеонд);
- 9 – рибосомы;
- 10 – цитоплазма;
- 11 – базальное тельце;
- 12 – жгутики;
- 13 – капсула;
- 14 – клеточная стенка;
- 15 – цитоплазматическая мембрана;
- 16 – мезосома;
- 17 – газовые вакуоли;
- 18 – ламеллярные структуры;
- 19 – гранулы полисахарида;
- 20 – гранулы полифосфата

Рисунок 3.3 – Схематическое изображение строения бактериальной клетки  
(по Г. Шлегелю)

после обработки йодом, а затем спиртом (или ацетоном) сохранять комплекс «йод-краситель». Бактерии, у которых под влиянием этилового спирта этот комплекс разрушается (клетки обесцвечиваются), относятся к грамотрицательным.

Химический состав клеточных стенок грамположительных и грамотрицательных бактерий различен. У грамположительных бактерий в состав клеточных стенок входят, кроме мукопептидов, полисахариды (сложные высокомолекулярные сахара), тейхоевые кислоты (сложные по составу и структуре соединения, состоящие из сахаров, спиртов, аминокислот и фосфорной кислоты).

Стенки грамотрицательных бактерий более сложные по химическому составу, в них содержится значительное количество липидов (жиров), связанных с белками и сахарами в сложные комплексы – липопротеиды и липополисахариды. Муреина в клеточных стенках грамотрицательных бактерий меньше, чем у грамположительных бактерий. Структура стенки грамотрицательных бактерий также более сложная. Электронной микроскопией установлено, что стенки этих бактерий многослойные (рисунок 3.4).



1 – липопротеидный слой с выступами и бугорками;  
2 – липополисахаридный слой; 3 – каналы; 4 – рыхлоупакованные молекулы белка;  
5 – гликопептидный слой; 6 – цитоплазматическая мембрана

Рисунок 3.4 – Схематическое изображение клеточной стенки грамотрицательных бактерий – *Bacterium coli* (по Роузу)

Внутренний слой состоит из муреина. Над ним находится более широкий слой из неплотно упакованных молекул белка. Этот слой, в свою очередь, покрыт слоем липополисахарида. Самый верхний слой состоит из липопротеидов. Клеточная стенка проницаема: через нее питательные вещества свободно проходят в клетку, а продукты обмена выходят в окружающую среду. Крупные молекулы с большой молекулярной массой не проходят через оболочку.

**Цитоплазма** – внутренняя среда живой клетки, ограниченная плазматической мембраной, включающая гиалоплазму, – основное прозрачное вещество цитоплазмы; в которой находятся обязательные клеточные компоненты – органеллы; также различные непостоянныеструктуры – включения.

Цитоплазма большинства бактерий содержит ДНК, рибосомы и запасные гранулы, остальное пространство занимает коллоидная фаза. Основные ее составляющие – растворимые ферменты и растворимые РНК. Разнообразные органеллы, характерные для эукариотической клетки, у бактерий отсутствуют, и их функции выполняет цитоплазматическая мембрана. У подавляющего числа бактерий цитоплазма относительно неподвижна, но у видов *Streptococcus*, *Proteus*, *Clostridium* имеются специальные трубочки – рапидосомы, аналогичные микротрубочкам простейших.

Важнейшая роль цитоплазмы заключается в объединении всех клеточных структур (компонентов) и обеспечении их химического взаимодействия.

В бактериальной клетке нет ядерной мембраны, ДНК сконцентрирована в цитоплазме в виде клубка. Поскольку в эукариотических клетках ДНК обычно находится в ядре, то по аналогии ДНК бактерий назвали *нуклеоидом*. Ее также называют генофором, или бактериальной хромосомой. Генофор бактерий представлен двойной спиральной суперспирализованной молекулой ДНК. Она составляет 2–3 % от сухой массы клетки (более 10 % по объему). Объем генетической информации, кодируемой в генофоре, различается в зависимости от вида бактерий. У бактерий может присутствовать дополнительная ДНК в виде включений. Эти включения, или плазмиды, несут ряд различных генов, кодирующих дополнительные свойства бактерий, но информация, содержащаяся в плазмidaх, не является абсолютно необходимой для бактериальной клетки.

Бактериальные рибосомы – сложные глобулярные образования, состоящие из различных молекул РНК и связанных с ними белков. В зависимости от интенсивности роста бактериальная клетка может содержать от 5000 до 50000 рибосом. Диаметр бактериальных рибосом около 16–20 нм. Большая часть рибосом в цитоплазме находится в свободном состоянии, а остальная объединена нитями рибонуклеиновой кислоты (РНК) в группы – *полисомы*.

*Газовые везикулы* обнаружены у архей и бактерий – относительно небольшие внутриклеточные органоиды, мембранны-защищенные сумки которых запасают или транспортируют питательные вещества.

В клетках магнетотаксической бактерии обнаружены *магнетосомы* – мембранные органоиды, которые помогают ориентироваться в магнитном поле Земли. Магнетотаксические бактерии часто встречаются в морской глине. Они используют магнетосомы внутри своих клеток и выстраивают в цепочки, чтобы различить «верх» и «низ» в земном магнитном поле. Это помогает бактериям передвигаться через водную толщу в поисках подходящих условий для развития.

**Цитоплазматическая мембрана** выполняет важную роль – регулирует поступление веществ в клетку и выделение наружу продуктов обмена. Она участвует в регуляции осмотического давления, транспорте веществ и энергетическом метаболизме клетки (за счет ферментов цепи переноса электронов и др.). Кроме того, в мембране происходит синтез некоторых составных

частей клетки, в основном компонентов клеточной стенки и капсулы. Наконец, в цитоплазматической мембране находятся важнейшие ферменты (биологические катализаторы). Упорядоченное расположение ферментов на мембранах позволяет регулировать их активность и предотвращать разрушение одних ферментов другими. Мембрана достаточно прочна и может обеспечить временное существование клетки без оболочки. Цитоплазматическая мембрана составляет до 20 % сухой массы клетки.

В цитоплазматической мембране некоторых бактерий обнаружено незначительное количество углеводов. Главным липидным компонентом мембраны являются фосфолипиды. Белковая фракция цитоплазматической мембраны представлена структурными белками, обладающими ферментативной активностью. По жидкостно-мозаичной модели мембрана бактерий образована текучим биослоем липидов, в который включены ассиметрично расположенные белковые молекулы.

Между плазматической мембраной и клеточной стенкой имеется связь в виде десмозов – мостиков. Цитоплазматическая мембрана часто дает инвагинации – втячивания внутрь клетки. Эти втячивания образуют в цитоплазме особые мембранные структуры, названные мезосомами. Некоторые виды мезосом представляют собой тельца, отделённые от цитоплазмы собственной мембраной. Внутри таких мембранных мешочеков упакованы многочисленные пузырьки и канальцы (см. рисунок 3.4). Эти структуры выполняют у бактерий разные функции. Одни из этих структур – аналоги митохондрий. Другие выполняют функции эндоплазматической сети или аппарата Гольджи. Путем инвагинации цитоплазматической мембраны образуется также фотосинтезирующий аппарат бактерий. После втячивания цитоплазмы мембрана продолжает расти и образует стопки, которые по аналогии с гранулами хлоропластов растений называют стопками тилакоидов. В этих мембранных, часто заполняющих собой большую часть цитоплазмы бактериальной клетки, локализуются пигменты (бактериохлорофилл, каротиноиды) и ферменты (цитохромы), осуществляющие процесс фотосинтеза.

**Запасные питательные вещества** содержатся в цитоплазме бактерий в виде гранул. Присутствие их в клетке непостоянно и связано с составом питательной среды и физиологическим состоянием клетки. Они служат источником энергии и элементами питания при стрессах. Химический состав включений неодинаков у разных видов бактерий: это могут быть полисахариды, липиды, кристаллы неорганических веществ.

Из полисахаридов в клетках содержится крахмал, гликоген и крахмало-подобное вещество – гранулеза.

**Липиды** накапливаются в цитоплазме бактерий в виде мелких капель и зерен, которые являются идеальной «кладовой» энергии.

В клетках многих бактерий часто обнаруживаются зерна волютина, по химической природе представляющие собой полифосфат. Волютин используется клеткой как источник фосфатных групп и частично энергии.

У бесцветных и пурпурных серобактерий внутри клетки в виде капель откладывается *минеральная сера*. Для бесцветных бактерий она служит источником энергии, для пурпурных – донором электронов.

Наряду с серой у некоторых серобактерий обнаружены включения *карбоната кальция*, который предположительно выполняет функцию нейтрализаторов среды.

В мембранах фототрофных бактерий обнаружены *хроматофоры* – светособирающие комплексы, которые можно отнести к цветным везикулам, связанным с мембраной. Они используются главным образом для фотосинтеза, содержат пигмент бактериохлорофилл и каротиноиды. В пурпурных бактериях, например *Rhodospirillum rubrum*, светопоглощающие белки расположены в мемbrane хроматофора. Однако в зелёных серных бактериях они расположены в особых антенных комплексах, которые называются *хлоросомы*.

Основные **поверхностные структуры** бактериальной клетки – капсула, жгутики и микроворсинки. Их наличие – относительно стабильный признак, используемый для идентификации бактерий.

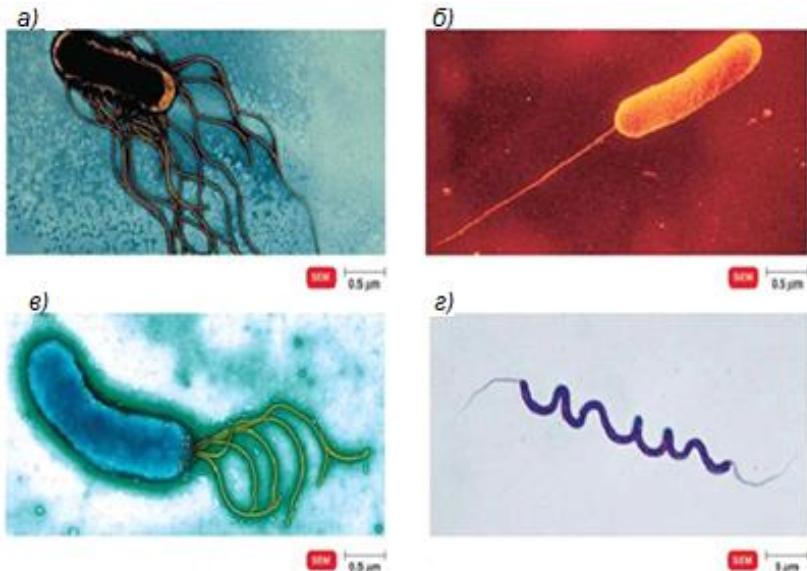
**Капсула** бактерий – утолщённый наружный слой клеточной стенки. Капсулы могут быть построены из полисахаридов (пневмококков) или белков (возбудителя сибирской язвы). Большинство бактерий, особенно патогенных, образует капсулу только в организме человека или животных. Существует ряд истинно капсулевых бактерий (*Klebsiella*), представители которых образуют капсулу и при культивировании на искусственных питательных средах. Некоторые бактерии могут иметь микрокапсулу (выявляется только при электронной микроскопии), например, эшерихии, или неявно выраженную способность к капсулобразованию – так называемую «нежную» капсулу, например, золотистые стафилококки, менингококки. Капсула выполняет важные функции: делает оболочку клетки более плотной и прочной, предохраняет бактерии от бактерицидных факторов, обеспечивает адгезию на различных субстратах, может содержать запасы питательных веществ.

При окраске мазков по Граму истинно капсулевые бактерии имеют характерное взаиморасположение (на расстоянии друг от друга). При световой микроскопии капсулы четко не видны, поэтому наличие капсул у бактерий выявляется с помощью специальных методов окраски, например, по методу Гимзы. Для выявления капсул у бактерий, образующих их в организме, используют либо микроскопию мазков, приготовленных из патологического материала или мазков – отпечатков из органов погибших животных.

**Жгутики** – белковые структуры, представляющие собой винтообразные скрученные нитевидные образования, закреплённые в клеточной стенке. Жгутики бактерий имеют диаметр 0,01–0,03 мкм, длина их может во много раз превышать длину клетки. На поверхности некоторых бактериальных клеток имеются тонкие ворсинки – фимбрии.

По признаку расположения жгутиков бактерии делятся на: *монотрихи* –

жгутик на одном полюсе клетки; *амфитрихи* – по одному жгутику на обоих полюсах; *лофотрихи* – пучок жгутиков на одном из полюсов; *перитрихи* – жгутики расположены по всей поверхности клетки (рисунок 3.5). Жгутик состоит из 17–20 тончайших нитей (субфибрилл), скрученных вместе, имеет спиралевидную форму и по структуре напоминает канат. Химический состав (98 %) представлен белком флагеллином, который сходен с белком мышечных клеток миозином.



*a* – перитрихи; *б* – монотрихи; *в* – лофотрихи; *г* – амфитрихи

Рисунок 3.5 – Расположение жгутиков у бактерий

Траектория движения бактерий определяется расположением жгутиков. Монотрихи всегда движутся по прямой линии, перитрихи – беспорядочно и с кувырканием. В первом случае жгутик вращается против часовой стрелки, во втором – по часовой стрелке. Скорость движения бактерий составляет от 28 (*Escherichia coli*) до 30 мкм/с (*Vibrio cholerae*).

Для бактерий, лишённых жгутиков, характерен *вращательно-спиральный* тип движения. Он свойственен только спирохетам и осуществляется за счет сокращения специального органоида – аксиальных фибрилл, обеспечивающих движение как в жидкой среде, так и по твердому субстрату.

Третий тип движения бактерий – *скользящий* (у миксобактерий), в результате соприкосновения выделяемой ими слизи с плотной поверхностью твёрдого субстрата. Скорость движения очень низкая – 2–10 мкм/мин.

Помимо жгутиков поверхность многих бактерий покрыта цитоплазматическими выростами – **микроворсинками** – толщиной от 3 до 25 нм и длиной до 12 мкм. Эти выросты способствуют увеличению площади поверхности бактериальной клетки, что даёт ей дополнительные преимущества в утилизации питательных веществ из окружающей среды. Известны специализированные микроворсинки – *фимбрии и пили*.

**Фимбрии** – длинные и тонкие микроворсинки, пронизывающие клеточную стенку. Главная функция фимбрий – обеспечение фиксации бактерий в тканях. Обнаружены у палочковидных и кокковидных бактерий. Фимбрии обеспечивают бактериальной клетке способность неспецифически «прилипать» к плотной поверхности клеток, тканей и т. п.

**Пили** – жёсткие цилиндрические образования, участвующие в конъюгации бактерий. Обычно клетка снабжена 1–2 пиями, имеющими вид полых белковых трубочек длиной 0,5–10 мкм, нередко имеющих шарообразное утолщение на конце. Большинство пилей образует специальный белок – пилин.

**Размножаются бактерии** бесполым путём – делением материнской клетки на две дочерние. Деление начинается спустя некоторое время после деления нуклеоида. Особенностью размножения бактерий является высокая скорость. Некоторые виды делятся через каждые 15–20 минут, а другие – каждые 5–10 часов, образуя огромное число клеток. Это часто наблюдается на пищевых продуктах: скисание молока за счёт развития молочнокислых бактерий, быстрая порча мяса и рыбы за счёт размножения гнилостных бактерий и т. п.

**Спорообразование** – прорастание спор, дающее начало новым бактериальным клеткам. **Споры** – покоящиеся зародышевые клетки, выдерживающие влияние высокой температуры, радиации, вакуума, различного рода токсических веществ и других неблагоприятных факторов, приводящих к гибели вегетативные клетки.

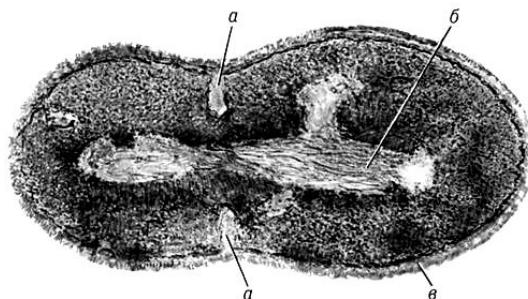
Бактериальные споры образуются эндогенно, т. е. внутри материнских вегетативных клеток. Формирование спор наступает на определённой стадии развития в тот момент, когда в среде исчерпываются пищевые ресурсы (прежде всего источники углерода и азота) и происходит накопление токсичных продуктов обмена веществ.

Основное назначение спорообразования – перевести культуру в покоящееся (анабиотическое) состояние. У зрелых спор обмен веществ находится на крайне низком уровне. Это позволяет бактериям сохраняться при неблагоприятных условиях среды, а при изменении условий в благоприятную сторону снова перейти к вегетативному росту. Для анаэробов (особенно почвенных) крайне важно также, что споры не чувствительны к кислороду. Это позволяет им выжить в аэробных условиях, губительно действующих на вегетативные клетки. Способность бактерий образовывать споры позволяет им оставаться жизнеспособными в течение десятков и сотен лет. Жизнеспособные споры были выделены из египетских му-

мий, трупов мамонтов и других объектов, где они провели века и тысячелетия. Таким образом, споры служат целям сохранения вида.

Молодые, интенсивно делящиеся клетки анаэробов содержат нуклеоиды в виде гантелей или V-образных фигур. Перед спорообразованием деление клеток прекращается, они резко увеличиваются в размерах. В это время происходит накопление большого количества запасного питательного вещества – гранулезы, откладываемого в виде гранул, из-за чего цитоплазма становится зернистой, а сами клетки раздуваются, принимая вид лимона (клостридии) либо барабанной палочки (плектридии). Лишь у части протеотических анаэробов клетки не меняют своего первоначального вида, сохранив обычную палочковидную (бациллярную) форму.

Первым признаком наступления спорообразования является изменение морфологии нуклеоидов, принимающих вид шаровидных телец. Далее несколько нуклеоидов сближаются на одном из полюсов клетки, сливаются и образуют продольно расположенный извитый хроматиновый (ядерный) тяж (рисунок 3.6).



а – образующаяся перегородка; б – нуклеоид; в – клеточная стенка

Рисунок 3.6 – Образование поперечной перегородки  
в делящейся клетке стрептококка

Зона цитоплазмы, в которой расположен ядерный тяж, превращается далее в проспору. С помощью обычного микроскопа можно выделить **три стадии формирования споры**. *Первая* – возникновение на одном из полюсов клетки спорогенной зоны, в которой заметно ядерное вещество в виде светлых палочек. *Вторая* – спорогенная зона превращается в тёмную (оптически плотную) овальной формы проспору с чётко выраженным контурами. В проспорах ядерное вещество уже не выявляется без применения специальных методов (окрашивание). *Третья* – проспоры постепенно светлеют, приобретая способность преломлять свет, теряют способность окрашиваться красителями. Созревшие споры выглядят светлыми, преломляя свет тельцами, обладающими мощной оболочкой. Форма зрелых спор различна у разных видов анаэробов: сферическая, овальная, яйцевидная, цилиндрическая.

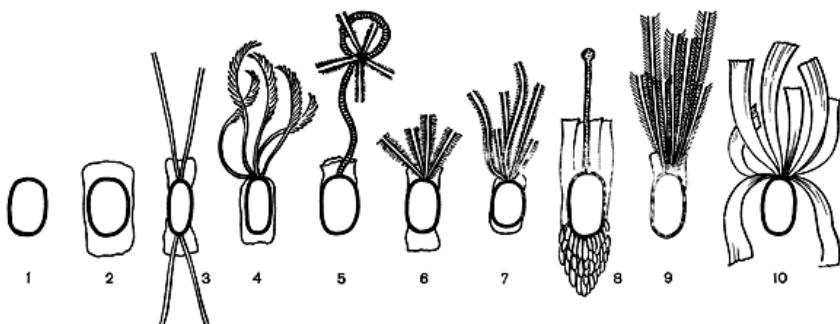
Электронно-микроскопические исследования ультратонких срезов спорулирующих клеток бактерий показали, что формирование проспоры начинается с инвагинации (врастания) цитоплазматической мембраны ближе к одному из полюсов клетки. При этом мембрана продвигается к центру клетки, полюса её сливаются с образованием споровой перегородки (септы). В этом процессе участвуют мезосомы, которые как бы спаивают сближающиеся участки инвагинированных мембран. Септа состоит из двух элементарных мембран. На этом заканчивается вторая стадия спорообразования (если за первую принять образование хроматинового тяжа) и ее можно рассматривать как модифицированное клеточное деление, которое происходит благодаря инвагинации цитоплазматической мембранны и образования септы.

Следующей стадией является процесс «поглощения» материнской клеткой септированного (отсеченного) участка цитоплазмы с ядром. Этот процесс осуществляется путем роста и продвижения периферических участков мембранны материнской клетки по направлению к полюсу клетки. Затем сближающиеся участки мембранны сливаются, и образуется проспора, обладающая двумя элементарными (трехслойными) мембранами – внутренней и внешней. У одних видов проспора остаётся в дальнейшем у полюса клетки (терминальное расположение), у других она перемещается внутрь цитоплазмы, занимая центральное либо субтерминальное положение. Таким образом, в конце этой стадии образуется своеобразный двухклеточный организм: внутри цитоплазмы материнской клетки возникает новая клетка – проспора, окружённая, в отличие от материнской, двумя элементарными мембранами. С этого момента начинается новая необратимая фаза развития и метаболизма, заканчивающаяся созреванием споры и гибелю материнской клетки.

Далее закладывается оболочка споры. Вначале вокруг проспоры на некотором расстоянии от внешней мембранны проспоры в цитоплазме материнской клетки возникают участки тёмного (электронно-плотного) вещества в виде чешуек. Отдельные листки оболочки удлиняются, а затем сливаются, образуя сплошной непрерывный плотный слой. Между этим слоем и внешней мембранны проспоры остается отсеченный слой цитоплазмы вегетативной клетки. Поверх первого слоя оболочки может закладываться ещё один или два слоя. В этом случае они разделяются на внутренний, средний и внешний слои оболочки. Эти слои различаются между собой по структуре. У некоторых видов внутренний слой оболочки является пластиначатым, а внешний имеет вид плотного толстого слоя. У других видов, наоборот, пластиначатый слой может быть внешним, а более плотный слой – внутренним. Если строение сердцевины сходно у разных видов, то строение оболочек спор сильно различается как по тонкому строению, так и по количеству и толщине слоёв. После окончательного созревания споры происходит лизис материнской вегетативной клетки – клеточная стенка разрушается и спора выходит в среду.

У многих видов анаэробов поверх споровой оболочки обнаруживается ещё одна структура – экзоспориум. Он имеет вид чехла, в котором расположена спора. Тонкое строение экзоспориума весьма различно у разных видов. Часто он очень многослойен, например у *Clostridium pasteurianum*, *Cl. bifermentans*, *Cl. tyrobutyricum* и др. В экзоспориуме многих видов анаэробов обнаруживаются слои с упорядоченно расположенными субъединицами. У анаэробов этот чехол не цельный и имеет крупные поры. Иногда через эти поры в цитоплазму спорангия проходят трубчатые выросты споровой оболочки.

Особенностью спорообразования у анаэробов является формирование на спорах особых выростов с разнообразной структурой. Каждому виду анаэробных бактерий свойственен свой тип строения выростов (рисунок 3.7).



Споры без выростов и экзоспориума 1 – *Clostridium felsineum*.

Споры с экзоспориумом в виде чехла 2 – *Cl. pasteurianum*.

Споры с выростами различных типов и экзоспориумом: 3 – *Cl. sporosetosum*; 4 – *Cl. sporopenatum*; 5 – *Cl. saprogenes*; 6 – *Cl. sporofaciens*; 7 – *Cl. sartagoformum*; 8 – *Cl. corinoforum*; 9 – *Cl. penicillum*. Споры с лентовидными выростами, но без экзоспориума; 10 – *Cl. taeniosporum*

Рисунок 3.7 – Строение поверхностных структур спор некоторых анаэробных бактерий

Этот признак строго специфичен, наследственно закреплён и очень устойчив. Даже у дефектных спор, потерявших способность образовывать оболочку, выросты сохраняются и не меняют специфической структуры. Выросты могут иметь форму метёлок, тонких нитей или жгутиков, трубок различной толщины, разбросанных по всей поверхности споры или собранных в пучок ёршиковидных палочек, длинных широких лент, шипов, булавок и образований. Функция выростов на спорах окончательно не выяснена. Одни исследователи предполагают, что отростки на спорах – специфические чувствительные (хемосенсорные) органеллы, подающие споре «команду» на прорастание (при благоприятных условиях). Другие – выполняют важную роль в процессе созревания спор. Третьи допускают, что выросты на спорах – результат каких-то нарушений в нормальном обмене веществ.

Споры, перенесенные в свежую питательную среду, начинают прорастать. Сначала они набухают, темнеют, затем через образовавшееся отверстие в оболочке споры молодая клетка выходит в среду. У анаэробов проследить за прорастанием, наблюдая за одной и той же спорой, удаётся только в редких случаях. На рисунке 3.8 представлена серия фотографий, иллюстрирующих различные стадии прорастания – от потемнения сердцевины спор до выхода молодой вегетативной клетки из споровой оболочки.

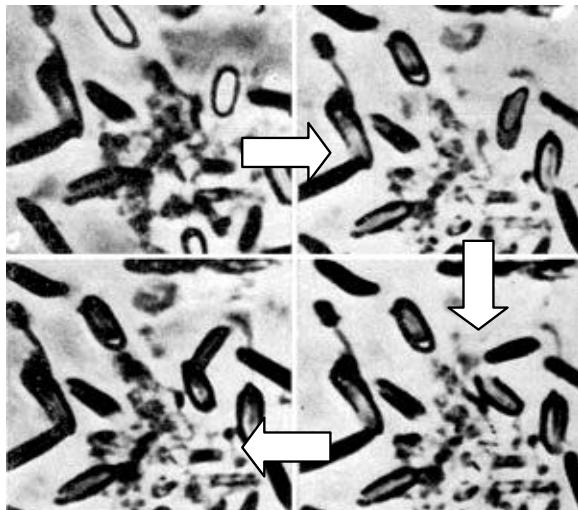


Рисунок 3.8 – Стадии прорастания спор *Cl. sporogenitum*. 2100<sup>х</sup>

На последней стадии выхода вегетативная клетка как бы отстреливается. Отверстие в оболочке споры образуется не строго на полюсе споры, а несколько сбоку, и молодая вегетативная клетка при выходе расположена под углом к длинной оси споры. Прорастание споры заканчивается образованием отверстия в оболочке, через которое выходит ростовая трубка (росток). Далее следует удлинение ростка и формирование полноценной вегетативной клетки. Прорастание споры происходит значительно быстрее (за 4–5 ч), чем её образование. Созревшая спора выходит в окружающую среду из разрушившейся саморастворившейся клетки. У других анаэробов процесс прорастания может выглядеть иначе.

**Классификация бактерий.** В XX в. проблема систематики бактерий стала настоятельной в связи со стремительно увеличивавшимся как вширь (описание новых видов), так и вглубь (более детальное разностороннее изучение уже описанных видов) объёмом знаний об этих организмах.

Хронологически первыми были попытки использовать накопленные

сведения о фенотипических признаках бактерий для построения традиционной системы в виде «генеалогического дерева». Вначале основное внимание уделяли морфологическим признакам бактерий. Так, в 1872 г. Ф. Кон разделил бактерии на группы: кокки, короткие палочки, удлинённые палочки, спирали. Однако вскоре стало ясно, что морфологические признаки недостаточны для удовлетворительного распределения бактерий по таксономическим группам. Для этой цели стали привлекать физиологические признаки. В 1909 г. С. Орала-Йенсен сделал попытку классифицировать бактерии на основе известных к тому времени физиологических признаков.

Важным шагом в развитии систематики прокариот явилось использование признаков, дающих информацию о химическом строении клетки: состав оснований дезоксирибонуклеиновые (ДНК), либо рибонуклеиновые (РНК) гомологии, аминокислотная последовательность белков, строение рибосом, компонентов клеточной стенки и т. д. [22].

Первые предложенные схемы классификаций бактерий были субъективны. Это привело к использованию иного подхода для определения степени сходства между прокариотами – нумерической систематики. В основе её лежат идеи, сформулированные в середине XVIII в. французским ботаником М. Адансоном: все признаки объекта считаются равноценными; при описании исследуемого объекта используется максимальное количество признаков, которые могут быть изучены и определены. Эта классификация – трудоёмкий процесс, поэтому своё развитие и практическое применение она получила лишь в последнее время в связи с развитием вычислительной техники. Преимущества её заключаются в формальном устранении элемента субъективности, поскольку все признаки объекта принимаются равнозначными. Хотя есть и слабые стороны классификации. Как правило, для оценки сходства прокариот используется около 100 признаков, что составляет примерно 10 % от количества признаков, определяющих бактериальный фенотип. Следовательно, учитывается только незначительная часть признаков классифицируемого объекта.

Наиболее полно задача быстрой идентификации прокариотных организмов решается с помощью *Определителя бактерий Берги* (1923 г.), выпускавшегося периодически Обществом американских бактериологов с привлечением специалистов в области изучения тех или иных бактерий.

В девятом издании Определителя бактерий Берги все обнаруженные организмы, отнесённые в царство Prokaryotae, разделены на 33 группы [57]. Признаки, по которым осуществляется деление на группы, как правило, относятся к категории легко определяемых и вынесены в название групп, например: грамотрицательные палочки и кокки, анаэробные палочки и кокки и др. Основная идея классификации «по Берги» – лёгкость идентификации бактерий. Для осуществления этого используют совокупность признаков: морфологических (форма клеток, наличие или отсутствие жгутиков, капсулы, способ-

ность к спорообразованию, особенности внутриклеточного строения, окрашивание по Граму), культуральных (признаки, выявляемые при культивировании в лаборатории чистой культуры), физиолого-биохимических (способы получения энергии, потребности в питательных веществах, отношение к факторам внешней среды, нуклеотидный состав и последовательность нуклеотидов в молекуле ДНК, наличие и характер оснований в ДНК, нуклеотидный состав рибосомальной РНК, последовательность аминокислот в ферментных белках с аналогичными функциями).

Ниже следует характеристика некоторых групп прокариотических организмов, местами обитания которых являются почва и водные объекты.

**Спирохеты.** Группа включает порядок Spirochaetales. Тонкие спиралевидные одноклеточные формы, обладающие своеобразной морфологией и способом движения. Размножаются поперечным делением. Грамотрицательны. Среди них есть облигатно аэробные, факультативно и облигатно анаэробные формы. Хемоорганогетеротрофы существенно различаются по степени требовательности к субстрату. Среди них есть свободноживущие формы, основное место обитания которых – пресные и солёные озера с высоким содержанием сероводорода, комменсалы (живущие за счет другого, не причиняя ему вреда), обитающие в желудочно-кишечном тракте пресноводных и морских моллюсков, и паразиты. Некоторые виды патогенны – возбудитель сифилиса, возвратного тифа.

*Аэробные, подвижные спиралевидные или изогнутые грамотрицательные бактерии.* Имеют жесткую клеточную стенку. Движение осуществляется с помощью одного или множества полярно расположенных жгутиков. Хемоорганогетеротрофы существенно различаются потребностями в питательных веществах. Некоторые виды могут жить на простой синтетической среде, для роста других необходимы сложные среды. Ряд свободноживущих форм – обитатели морских вод. Среди них есть паразиты. Некоторые виды патогенны.

*Неподвижные грамотрицательные изогнутые бактерии.* Включают семейство Spiromonadaceae, объединяющее облигатно аэробные формы с характерной клеточной морфологией.

*Грамотрицательные аэробные палочки и кокки.* Группа представляет 8 семейств. К семейству Pseudomonadaceae относятся одиночные прямые или слегка изогнутые подвижные палочки. Движение осуществляется с помощью полярно расположенных жгутиков. Типичные представители семейства объединены в род *Pseudomonas* – облигатно аэробные хемоорганогетеротрофы, потребляющие широкий набор органических соединений. Представители рода *Pseudomonas* повсеместно распространены в природе: воздухе, почве, пресных и морских водах, иле, сточных водах. Обеспечивают минерализацию органических веществ.

Семейство Azotobacteraceae объединяет виды, имеющие крупные клетки, склонные к изменению морфологии в зависимости от возраста культуры и условий культивирования. Среди них встречаются подвижные и неподвижные формы. Хемоорганогетеротрофы обитают в почве, воде и на по-

верхности растений. Азотобактер – первый аэробный микроорганизм, для которого была показана возможность фиксировать молекулярный азот.

*Факультативно анаэробные грамотрицательные палочки*. Объединяет три семейства: Enterobacteriaceae, Vibrionaceae, Pasteurellaceae. В состав первого семейства входят подвижные и неподвижные бесспоровые палочки.

*Хемоорганогетеротрофы*. Представители широко распространены в природе: почве, морских и пресных водах, разлагают остатки животных и растений, постоянные обитатели кишечника человека и многих видов животных и птиц. Наиболее типичный представитель семейства – палочка *Escherichia coli*, содержащаяся в кишечнике человека и животных, и поэтому о загрязнении воды и пищевых продуктов судят по ее наличию в них.

*Микоплазмы* – бактерии, у которых отсутствует клеточная стенка. Отсутствие ригидной клеточной стенки повлекло за собой ряд морфологических, культуральных, цитологических особенностей, присущих этим микроорганизмам. Для них характерен ярко выраженный полиморфизм. Эти прокариоты могут расти на искусственных средах разной степени сложности (от простых минеральных до сложных органических) или только внутри организма-хозяина. Микоплазмы находятся в почве и сточных водах, они выделены также из каменного угля и горячих источников.

*Грамположительные кокки* – облигатные аэробы, анаэробы или факультативные формы. В состав группы входят представители 15 родов, значительно отличающихся филогенетически и фенотипически. К этой группе отнесен род *Streptococcus*, представители которого получают энергию, осуществляя гомоферментативное молочнокислое брожение. Представители этой группы обнаружены в почве, на поверхности злаков, в ротовой полости, желудочно-кишечном тракте и дыхательных путях человека и животных. Некоторые виды, преимущественно относящиеся к роду *Staphylococcus*, патогенны.

*Грамположительные палочки и кокки, образующие эндоспоры*, – облигатные или факультативные аэробы. В составе группы представители 6 родов. Два из них (*Bacillus*, *Clostridium*) наиболее многочисленны и интересны. Некоторые виды образуют антибиотики, такие как субтилизин, бацитрацин. Основное место обитания – почва.

*Грамположительные, не образующие спор палочки неправильной формы*. Группа разнообразна. Так к роду *Corynebacterium* относятся формы, склонные к морфологической изменчивости. Преимущественно факультативные анаэробы, но некоторые – аэробы. В состав группы входят свободно живущие виды, а также паразиты человека и животных. К группе отнесены бактерии рода *Arthrobacte* – основные представители почвы, активно участвующие в разложении органических веществ.

*Микобактерии*. Грамположительные неподвижные палочки, прямые или неправильных очертаний. Характерным морфологическим признаком является образование ветвящихся форм. Большинство микобактерий – сапрофиты

ты, живущие в почве и использующие различные органические соединения. Некоторые виды патогенны – возбудители туберкулеза и проказы.

**Актиномицеты.** Эта группа объединяет организмы с разной морфологией: от кокков и палочек до форм, образующих ветвящиеся нити или формирующие развитый мицелий. Актиномицеты характеризуются разными способами размножения. Большинство размножаются с помощью спор, образующихся в специальных органах спороношения – спорангиях. Обитают в почве, воде, кожных покровах млекопитающих.

### 3.1.3 Вирусы

Вирусы стали известны науке с 1892 г. благодаря работам русского учёного *Д. И. Ивановского* по изучению мозаичной болезни табака. Он обнаружил, что возбудителем этой болезни является организм, проходящий через тонкие бактериальные фильтры и не способный расти на лабораторных питательных средах. Название «вирус» предложено голландским ученым *М. Бейеринком* от латинского слова *virus* – яд. В последующие 20 лет были открыты вирусы ящура, саркомы *Poxus*, бактерий. Таким образом, к началу XX в. стали известны вирусы растений, животных и бактерий.

**Вирусы** – облигатные внутриклеточные паразиты. В отличие от клеточных организмов, они содержат только один тип нуклеиновой кислоты – ДНК либо РНК. Это в значительной степени определяет неполноценность вируса как живого организма [23]. Вирусы обладают определёнными свойствами, которые ставят их в один ряд с живыми существами. Они состоят из структурных упорядоченных макромолекул белка и нуклеиновых кислот, а отдельные из них (вирусы животных) содержат липиды и углеводы. Они обладают способностью к изменчивости и передаче наследственных признаков. Вирусы способны размножаться, но только за счет энергетических ресурсов и обмена веществ клетки. Таким образом, вирусы – специфические внутриклеточные паразиты, которые в процессе эволюции приспособились к подчинению и использованию метаболизма инфицированной клетки.

По словам французского вирусолога *A. Львова* «вирус – это вирус», т. е. вирусы единственные в своём роде существа, не похожие ни на растения, ни на животных, ни на микроорганизмы.

Существует ряд гипотез о происхождении вирусов. Согласно *экзогенной гипотезе* вирусы произошли от древнейших доклеточных форм и в процессе эволюции приспособились к паразитированию в первичных одноклеточных, а затем эволюционировали вместе с «хозяином», т. е. сначала могли появиться вирусы бактерий, а затем растений и животных.

По *эндогенной гипотезе* вирусы произошли из генетического материала клеток-хозяев. Не исключено, что это – регressive формы патогенных бактерий, у которых в результате паразитизма предельно упростился химический состав и ферментативный аппарат. Вполне допустимо, что вирусы, содержащие РНК или ДНК, имеют разное происхождение.

Размеры вирусов, определённые с помощью электронной микроскопии, очень малы. Самые крупные из них, например, осповакцины, приближаются к бактериям (200–350 нм). К крупным вирусам относят вирус бешенства (100–150 нм); к средним – вирус гриппа (80–120 нм), саркомы кур (70 нм); к самым мелким – вирусы ящура, полиомиелита (10–12 нм).

Форма вирусов разнообразна (рисунок 3.9). Различают форму сферическую (вирус гриппа, герпеса), палочковидную (вирусы растений), нитевидную (некоторые вирусы растений и бактерий), икосаэдрическую (двадцатигранник, кори и парагриппа), булавовидную (вирусы бактерий и актиномицетов).

К вирусам отнесены **вироиды** – субвирусные инфекционные агенты, возбудители некоторых заболеваний (в первую очередь у растений). Представляют собой высокоструктурированные кольцевые фрагменты РНК, реплицируемые клеточной РНК-полимеразой. Считается, что вироиды представляют собой «сбежавшие интроны» – вырезанные в ходе сплайсинга незначащие участки мРНК, которые случайно приобрели способность к репликации. Поскольку у вироидов нет белковой оболочки, они не проявляют выраженных иммуногенных свойств, и поэтому их нельзя идентифицировать серологическими методами.

Инtron – участок ДНК, который является частью гена, но не содержит информации о последовательности аминокислот белка.

**Вирусоиды** похожи на вироиды, но включены в структуру вируса-помощника и реплицируются только с его помощью.

**Прионы** – особый класс инфекционных агентов, чисто белковых, не содержащих нуклеиновых кислот и вызывающих тяжёлые заболевания центральной нервной системы у человека и ряда высших животных (т. н. «медленные инфекции»). Во второй половине XX века врачи столкнулись с необычным заболеванием человека – постепенно прогрессирующим разрушением головного мозга, происходящим в результате гибели нервных клеток. Это заболевание получило название губчатой энцефалопатии.

Новый интерес к их изучению возник в 1996 г., когда в Великобритании появилась новая форма заболевания, обозначаемая как «новый вариант болезни Крейтцфельда – Якоба».

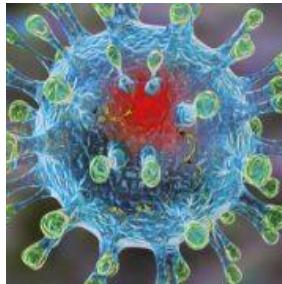
Важным событием было распространение «коровьего бешенства» в Великобритании, эпидемия которого сначала в 1992–1993 гг., а потом в 2001 г. охватила несколько европейских государств, но тем не менее мясо было экспортировано во многие страны. Заболевание связывают с использованием «прионизированной» костной муки в кормах и премиксах, изготовленной из туш павших или заболевших животных, возможно, и не имевших явных признаков заболевания.



Свиной грипп (H1N1)



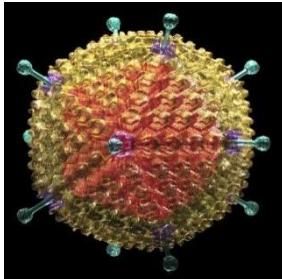
Птичий грипп (H5N1)



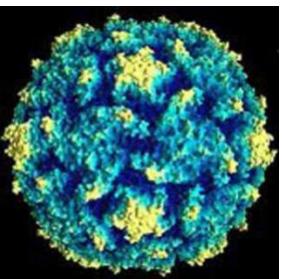
Коронавирус



Вирус папилломы человека



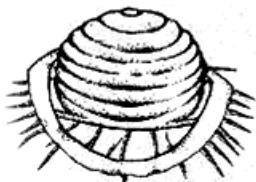
Аденовирус



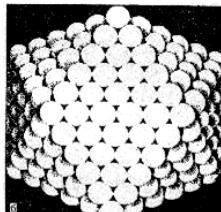
Вирус полиомиелита

#### Электронные фотографии вирусов

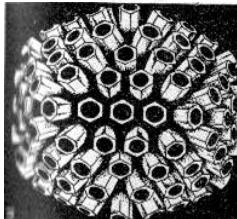
а)



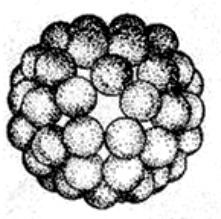
б)



в)



г)



Схематическое расположение капсомеров вирусов:  
винтовое – вирус гриппа (а); кубическое – адено-вирус (б) и  
вирус герпеса (в); сферическое – вирус полиомиелита (г)

Рисунок 3.9 – Вирусы: микрофотографии и схемы расположения капсомеров

Пути переноса причинного фактора болезни, механизмы проникновения прионов в организм и патогенез заболевания изучены пока недостаточно. Человек может заразиться прионами, содержащимися в пище, так как они не разрушаются ферментами пищеварительного тракта. Беспредметственно проникают через стенку тонкого кишечника и в итоге попадают в центральную нервную систему. Так переносится новый вариант болезни *Крейтифельдта – Якоба*, которой люди заражаются после употребления в пищу говядины, содержащей нервную ткань из голов скота, больных бычьей губчатой энцефалопатией (BSE, коровье бешенство).

**Химический состав** вирусов несложный. Зрелая частица вируса – **вирон** – содержит нуклеиновую кислоту и белок. Нуклеиновая кислота сконцентрирована внутри вириона, окружённого белковой оболочкой – **капсидом**, который предохраняет его от неблагоприятных внешних воздействий и обеспечивает прикрепление вируса к клетке. Капсид состоит из отдельных структурных единиц – **капсомеров**, укладка которых в капside определяет тип симметрии вируса. Он может быть спиральный, кубический, сферический и смешанный (см. рисунок 3.9).

Вирусные белки содержат дикарбоновые кислоты и устойчивы к действию протеолитических ферментов, участвующих в расщеплении белков, химических и физических факторов. Основная функция белков вируса заключается в изоляции нуклеиновых кислот от контакта с внешней средой, обеспечении автономности вируса и повышении его устойчивости.

Некоторые вирусы содержат **липиды** (локализованы в вирусной мембране) и **углеводы**. Наличие липидов установлено у большинства вирусов животных и человека. Например, вирус энцефаломиелита лошадей содержит липидов 54 %, вирус гриппа – 18–37 %. У вирусов растений не обнаружено ни липидов, ни углеводов [24].

Вирусы широко распространены в природе и причиняют огромный вред человечеству. Паразитируя в клетках живых организмов, они вызывают более 100 заболеваний (грипп, оспа, корь, полиомиелит и другие заболевания у человека). Вирусы оспы, кори и папилломы поражают кожу, полиомиелита и бешенства – спинной и головной мозг, а вирус желтой лихорадки – печень. Вирус ящура поражает коров и коз, орнитоза – птиц. Весьма многочисленны вирусные заболевания растений: мозаики, полосатости и курчавости листьев; некроз, пятнистость и разнообразные поражения цветов, плодов и фруктов. Вирусами поражаются водоросли, грибы, бактерии, актиномицеты.

После многих вирусных инфекций создается длительный иммунитет против повторного заражения данным вирусом. Так, эффективны, например, прививки против оспы, бешенства и желтой лихорадки.

Вирусы бактерий называют **бактериофагами**, или просто **фагами**. Впервые явление бактериофагии наблюдал русский микробиолог *Н. Ф. Гамалея* в 1898 г. в культуре сибирской палочки. А в 1917 г. французский учё-

ный Ф. Д'Эррель обратил внимание на то, что какой-то невидимый агент разрушает культуры дизентерийных палочек. Он изучил биологические особенности этого агента, его взаимоотношения с бактериями и дал ему название – бактериофаг, т. е. «пожиратель бактерий». Этот термин вошёл в литературу, хотя и не всегда фаг вызывает гибель бактерий.

Фаги распространены повсюду, особенно в сточных водах. Известны многочисленные разновидности бактериофагов. Обычно фаги поражают бактерии определённого вида. Наиболее изучены фаги кишечной палочки, так называемые Т-фаги (рисунок 3.10).

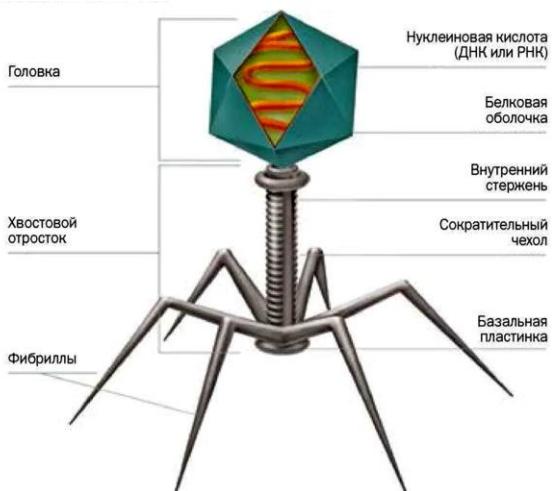


Рисунок 3.10 – Схема строения фага

Все известные бактериофаги состоят из двух основных компонентов: белков и нуклеиновых кислот. По типу нуклеиновой кислоты делятся на ДНК- и РНК-содержащие. Частицы многих бактериофагов состоят из головки округлой, гексагональной или палочковидной формы диаметром 45–140 нм и отростка толщиной 10–40 и длиной 100–200 нм. Другие бактериофаги не имеют отростка; одни из них округлы, другие – нитевидны, размером  $8 \times 800$  нм. Содержимое головки состоит преимущественно из ДНК (длина её нити во много раз превышает размер головки и достигает 60–70 мкм) или РНК и небольшого количества (около 3 %) белка и некоторых других веществ. Отросток имеет вид полой трубы, окружённой чехлом, содержащим сократительные белки, подобные мышечным. У ряда бактериофагов чехол способен сокращаться, обнажая часть стержня. На конце отростка у многих бактериофагов есть базальная пластинка с несколькими шиловидными или другими формами выступами. От пластинки отходят тонкие длинные нити, которые способствуют прикреп-

лению фага к бактерии. Оболочки головки и отростка состоят из белков. Общее количество белка в частице фага 50–60 %, нуклеиновых кислот – 40–50 %.

Каждый бактериофаг обладает специфическими антигенными свойствами, отличными от антигенов бактерии-хозяина и других фагов.

Так как бактериофаги разрушают бактерии, то их пытались использовать для лечения и профилактики инфекционных заболеваний. Однако терапевтический эффект не всегда был положительным, а с открытием антибиотиков интерес к ним ослаб. Позже фаги заняли свою нишу в решении более важных общебиологических проблем. Простота структурной организации фагов, высокий выход потомства в короткий промежуток времени, доступность работы с ними делают фаги удобной моделью для изучения разнообразных вопросов молекулярной биологии. Они стали основным объектом исследований в области молекулярной генетики. На модели фага были проведены классические исследования по изучению тонкой структуры гена, расшифровке наследственного кода, изучению механизма передачи наследственной информации, молекулярные основы мутационных процессов.

### 3.1.4 Эукариоты

**Эукариоты, или ядерные** (*Eucaryota*) – организмы, клетки которых содержат ядра [59]. Животные, растения, грибы, а также группы организмов под общим названием протисты – все являются эукариотическими организмами. Они могут быть одноклеточными и многоклеточными, но все имеют общий план строения клеток. Согласно наиболее распространённым гипотезам, эукариоты появились 1,5–2,0 млрд лет назад. Важную роль в эволюции эукариот сыграл симбиогенез – симбиоз между эукариотической клеткой, видимо, уже имевшей ядро и способной к фагоцитозу, и проглощенными этой клеткой бактериями – предшественниками митохондрий и хлоропластов.

Эукариотические клетки намного крупнее прокариотических, разница в объёме достигает тысяч раз. Клетки эукариот включают около десятка видов различных структур, известных как органоиды (или органеллы, что, правда, несколько искажает первоначальное значение этого термина), из которых многие отделены от цитоплазмы одной или несколькими мембранами. В прокариотических клетках всегда присутствуют клеточная мембрана, рибосомы (существенно отличные от эукариотических рибосом) и генетический материал – бактериальная хромосома, или генофор, однако внутренние органоиды, окружённые мембраной, встречаются редко. Ядро – это часть клетки, окружённая у эукариот двойной мембраной и содержащая генетический материал: молекулы ДНК, «упакованные» в хромосомы. Ядро обычно одно, но бывают и многоядерные клетки.

Существует несколько вариантов деления надцарства эукариот на царства. Первыми были выделены царства растений и животных. Затем было

выделено царство грибов, которые из-за биохимических особенностей, по мнению большинства биологов, не могут быть причислены ни к одному из этих царств. Также некоторые авторы выделяют царства простейших, микромицетов, хромистов. Некоторые системы насчитывают до 20 царств.

### 3.1.5 Грибы

**Грибы** – обширная и своеобразная группа микроорганизмов, насчитывающая около 100 тысяч видов. Они играют большую роль в природе и жизни человека [25]. Многие грибы служат причиной болезней человека, животных и культурных растений. Под воздействием грибов повреждаются промышленные изделия и материалы, подвергается разрушению бумага, книги, произведения искусства. Вместе с тем ряд представителей этой группы организмов широко используются в разных отраслях сельского хозяйства и промышленности – пищевой, текстильной, кожевенной, бумажной и пр. Многие плесневые грибы вызывают порчу пищевых продуктов: головчатая, или хлебная, плесень (*Mucor mucedo*) на хлебе, плодах, конском навозе; чернильная плесень (*Penicillium glaucium*) на черниках, варенье, обуви и др.

Многие грибы употребляются в пищу, используются в промышленном производстве для получения ферментов, витаминов, органических кислот, антибиотиков и при изготовлении некоторых видов сыров (например, Рокфор).

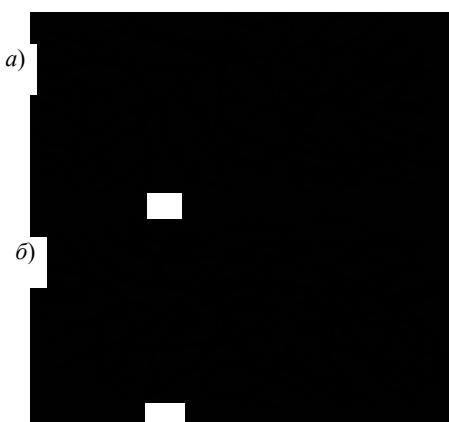
Наряду с этим грибы выполняют огромную санитарную роль в общем круговороте веществ в природе, с помощью ферментов активно разлагая растительные и животные остатки.

**Классификация грибов.** В настоящее время положение грибов в системе организмов наиболее спорно. Традиционно грибы рассматривались (начиная с К. Линнея, 1735) как особый отдел растительного мира, хотя объем его различными авторами трактовался по-разному. Одни исследователи включали в микромицеты, другие считали истинными грибами лишь сумчатые и базидиальные грибы. Некоторые ученые предлагали гетеротрофные растительные организмы разделить на несколько отделов и грибы рассматривать как сборную группу. В настоящее время считается, что грибы – самостоятельное царство наряду с животными и растениями. Впервые на необходимость выделения грибов в особое царство обратил внимание Е. Фриз в 1821 г., однако только в XX в. исследователи вновь возвращаются к этому вопросу.

Такое различие во взглядах на положение грибов в системе органического мира объясняется тем, что грибы совмещают черты и растений, и животных, а также имеют своеобразные, присущие только им особенности, возникшие у них в процессе эволюции. Сочетание таких признаков, как нитчатое строение вегетативного тела, отсутствие хлорофилла, что определяет их гетеротрофный тип питания (либо в качестве сапротрофов, либо в качестве паразитов) и размножение (бесполое и половое) с помощью спор, не встречается ни в одной другой группе организмов.

Гетеротрофный тип питания, потребность в витаминах, наличие гликогена в клетках, синтез хитина, образование и накопление мочевины сближают с животными. Существование у подавляющего большинства грибов хорошо выраженной клеточной стенки, способность к неограниченному росту вегетативного тела, неподвижность в вегетативном состоянии, а также размножение и распространение спорами свидетельствует об их растительной природе, хотя гетеротрофность и химизм клеток отличают их от растений. В монографии приведена наиболее распространённая классификация грибов, основанная на строении органов размножения, характере жгутиковой стадии, химизме клеток и других признаках.

**Строение тела гриба.** Мицелий (грибница) – вегетативное тело грибов, состоящее из тонких (1,5–10 мкм) разветвлённых нитей, называемых гифами [26].



а – неклеточный, б – клеточный

Рисунок 3.11 – Мицелий грибов

Развивается в субстрате и на его поверхности. Рост мицелия происходит апикально (только в вершине). У грибов различают неклеточный (ценотический) мицелий, лишенный межклеточных перегородок и представляющий собой огромную клетку с большим количеством ядер, характерный для зигомицетов, а также клеточный (септированный) с наличием межклеточных перегородок (обозначаются термином септы) и как одного, так и многих ядер в отдельной клетке (рисунок 3.11).

Септы могут быть с простыми и сложными порами. Простые

характерны для аскомицетов. Сложные поры часто сопровождаются пряжками – крючкообразными выростами возле септ, соединенных с одной клеткой и подходящими к соседней. В таком случае клетка имеет два ядра и мицелий гриба называют дикариотическим. Он характерен для аскомицетов и базидиомицетов. Пряжки играют важную роль при делении клеток.

Плодовые тела базидиомицетов образованы ложной тканью паренхимой, состоящей из густо переплетенных гифов мицелия и отличающейся от настоящей ткани тем, что настоящая формируется при делении клеток в трех направлениях, а ложная – в одном. У базидиомицетов мицелий часто многолетний, у других грибов – однолетний.

**Строение клетки.** Грибы относятся к эукариотам. Клетки их (рисунок 3.12) имеют многослойную клеточную стенку, состоящую в основном из

полисахаридов – хитина или целлюлозы. Под клеточной стенкой расположена трехслойная цитоплазматическая мембрана. В цитоплазме находятся вакуоли и различные включения с запасом питательных веществ (гликоген, жир, волотин), а также рибосомы и митохондрии.

*Рибосомы* – мелкие округлые многочисленные образования, в которых происходит синтез белка.

*Митохондрии* – одни из важнейших органоидов живой клетки эукариот, являются её «энергетической фабрикой» и содержат дыхательные и другие окислительно-восстановительные ферменты.

В *эндоплазматической сети*, пронизывающей всю цитоплазму, происходит синтез углеводов, липидов и других соединений.

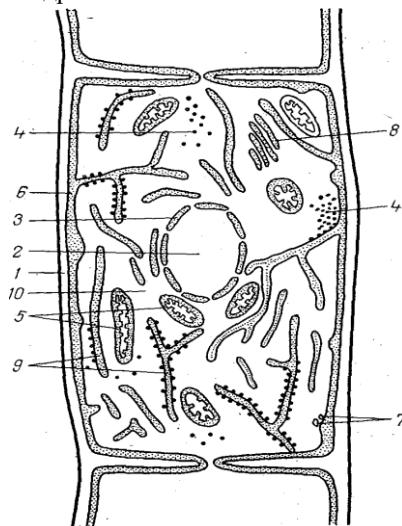
*Аппарат Гольджи* (назван по имени итальянского гистолога К. Гольджи) является «транспортной» системой клетки, через которую происходит движение веществ, синтезируемых в эндоплазматической сети, и удаление продуктов обмена.

В клетках грибов содержится выраженное обособленное *ядро*, иногда несколько ядер. Ядро окружено двойной мембраной, имеет ядрашки и хромосомы, содержащие ДНК.

**Размножение грибов.** У грибов различают вегетативное и репродуктивное (как бесполое, так и половое) размножение. Стадия полового размножения грибов называется совершенной, или высшей, а бесполого репродуктивного размножения – несовершенной.

**Вегетативное размножение** осуществляется обрывками или частицами мицелия, шнурков и ризоморф, а также склероциями. Эти частицы расселяются разными путями и, попав в благоприятную среду, могут дать начало развитию новой грибницы. Более специализированный способ этого типа размножения – разъединение грибницы на отдельные клетки (споры) – оидии, геммы и хламидоспоры (рисунок 3.13).

**Оидии** – округлые или удлинённые клетки, покрытые тонкой оболочкой, неспособные долго сохраняться (встречаются у голосумчатых и других грибов).



1 – клеточная стенка; 2 – ядро;  
3 – ядерная оболочка; 4 – рибосомы;  
5 – митохондрии; 6 – цитоплазматическая  
мембрана; 7 – лизосомы;  
8 – аппарат Гольджи; 9 – эндоплазматическая  
сеть; 10 – цитоплазма

Рисунок 3.12 – Схема строения грибной клетки

*a)*



*б)*



*a* – *Geotrichum candidum*; *б* – *Trichosporon asahii*

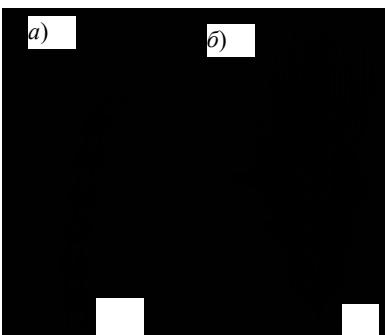
Рисунок 3.13 – Мицелий дрожжеподобных грибов, распадающийся на оидии грибов) (рисунок 3.14, *a*). Разновидностью вегетативного размножения является почкование, свойственное дрожжам.

**Склероции** – покоящаяся стадия гриба, образующаяся в неблагоприятных условиях; округлое или продолговатое тело, образуемое тесным сплетением гиф у некоторых сумчатых, базидиальных и несовершенных грибов – спорыни, склеротинии, бразильского трутовика, монилии и др. (см. рисунок 3.14, *б*).

Размеры склероций – обычно от долей миллиметров до 2 см, иногда более (например, у трутовика диаметр склероции достигает 30 см, а масса – 20 кг). В благоприятных условиях склероция прорастает, образуя плодовые тела (у сумчатых или базидиальных грибов) или грибницы с конидиями (у несовершенных грибов). Жизнеспособность склероций может сохраняться несколько лет.

**Ризоморфы** – длинные шнурообразные сплетения грибных нитей (гиф) у некоторых грибов. Способствуют проведению воды и питательных веществ от разветвленного в субстрате мицелия к плодовым телам. Имеются у ряда базидиальных грибов.

**Геммы** имеют более толстую, как правило, окрашенную оболочку, способны к длительному сохранению (встречаются у низших, сумчатых, несовершенных грибов, а также у некоторых головнёвых, в частности у возбудителей головни овса); хламидоспоры возникают путём обособления и уплотнения отдельных участков гифы, которые при этом покрываются толстой тёмноокрашенной оболочкой (они характерны для многих головнёвых, встречаются у сумчатых и фузариевых



*a* – хламидоспоры; *б* – склероции спорыни

Рисунок 3.14 – Покоящиеся стадии грибов

**Бесполое размножение** осуществляется спорами, образующимися бесполым путём на специально обособленных спороносящих ветвях мицелия, путем почкования или фрагментации. По происхождению споры бывают эндогенные и экзогенные. Эндогенные споры развиваются в больших количествах внутри шарообразно вздутого окончания гифы – спорангия (неподвижные споры) или зооспорангия (подвижные зооспоры с одним или двумя жгутиками).

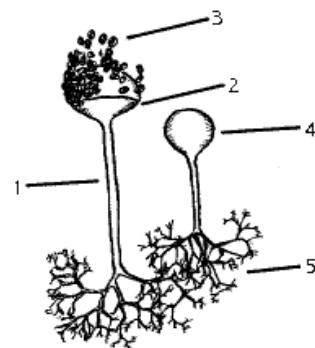
Споранги и зооспоранги характерны для низших грибов. В спорангиях образуются споры, не имеющие жгутиков, – **спорангиспоры**. После разрыва оболочки спорангия эти споры распространяются с потоками воздуха. Распространение их облегчается расположением спорангииев на **спорангиеносцах** – особых гифах, поднимающихся кверху от субстрата (рисунок 3.15).

Экзогенные споры (конидии) развиваются одинично, группами и нередко в цепочках на специальных спороносящих ветвях мицелия – конидиеносцах (рисунок 3.16). У некоторых грибов конидиеносцы собраны в пучки – коремии или развиваются в особых вместилищах – ложах или пикницах (рисунок 3.17).

**Ложе** – скопление конидиеносцев, растущих рядом друг с другом на плотном скоплении гиф. Ложе – блюдцеобразное образование, пикнида – колбовидное.

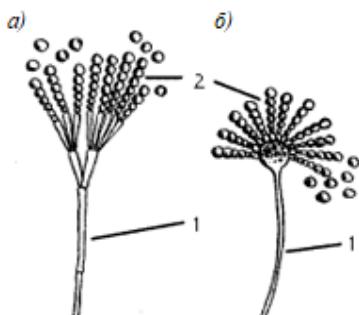
Конидии образуются путем отделения непосредственно от конидиеносцев или специальных клеток, которые находятся на их вершине. Это клетки в форме бутылочки – **стеригмы**. Они слабо соединены между собой, поэтому легко разносятся по воздуху.

Для дрожжей характерным видом бесполого размножения является почкование. При этом на материнской клетке образуется небольшая выпуклость – почка, в которую переходит одно ядро, после чего почка отшнуровывается. Размножение может осуществляться также путем разлома гиф на отдельные клетки – оидии или артроспоры (как, например, у молочной плесени *Endomyceslactis*). У некоторых грибов такие клетки окружается толстой стенкой, и тогда их называют хламидоспорами. Некоторые представители дрожжей (*Schizosaccharomyces*), подобно бактериям, размножаются делением надвое.



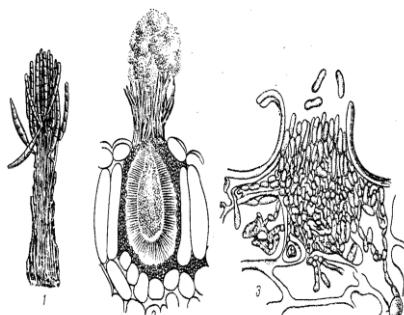
1 – спорангеноносец; 2 – колонка;  
3 – спорангиспоры;  
4 – спорангий; 5 – мицелий

Рисунок 3.15 – Мукор



1 – конидиеносец; 2 – цепочки конидий

Рисунок 3.16 – Пенициллиум (а)  
и аспергиллус (б)



1 – коремия; 2 – пикнида; 3 – ложе

Рисунок 3.17 – Типы конидиального спороношения

**Половое размножение** у грибов, также как у других эукариот, включает слияние двух ядер. Такое слияние у разных грибов происходит через различные промежутки времени после первого контакта между родительскими клетками. В процессе полового размножения можно различить три фазы.

**Плазмогамия** – слияние мужской и женской клеток, объединение их протоплазмы. Возникшая в результате этого клетка содержит два ядра. Эта пара ядер (дикарион) не обязательно сливается сразу же. Во время последующих делений клетки могут оставаться в дикариотической фазе. Оба ядра делятся при этом одновременно. Лишь позднее, часто только после образования плодового тела, происходит слияние обоих гаплоидных ядер (**кариогамия**) с образованием диплоидного ядра зиготы. За кариогамией следует **мейоз** – редукционное деление, при котором число хромосом уменьшается до исходного.

Фазы ядерного цикла у одних организмов протекают очень быстро одна за другой, у других – иногда растягиваются на период, охватывающий почти всю жизнь данного организма. У ряда грибов кариогамия не происходит сразу после плазмогамии, а в клетке сохраняется два ядра, которые синхронно делятся и дают начало новому мицелию. Такой мицелий называется дикариотичным.

На каком-то этапе между плазмогамией, кариогамией и мейозом гриб растёт вегетативно, увеличивает биомассу, накапливает энергию и размножается вегетативным путём. Циклы развития – отличительные признаки крупных таксонов грибов – отделов и классов, а морфологические особенности проявления процессов плазмогамии, кариогамии и мейоза – используют для разграничения грибов на классы и порядки.

У низших грибов фаза полового размножения начинается с образования половых клеток, или *гамет*. Если гаметы, происходящие от мужской и жен-

ской родительских клеток, морфологически неразличимы, их называют изогаметами. Гаметы образуются в особых морфологически дифференцированных клетках – **гаметангиях**. Если последние различимы по своей форме, то мужские гаметанги называются **антериидиями**, а женские – **оогониями**.

У грибов обнаружены следующие типы полового процесса:

1 **Гаметогамия** (мерогамия) – слияние дифференцированных гаплоидных клеток – гамет. Гаметогамия характерна для низших грибов. На основании морфологических различий между мужскими и женскими гаметами. Выделяют несколько типов гаметангииогамии. Это изогамия, гетерогамия и оогамия.

*Изогамия* – тип полового процесса, при котором сливающиеся (копулирующие) гаметы не различаются морфологически.

*Гетерогамия* – слияние морфологически разных гамет.

*Оогамия* – тип полового процесса, при котором в ходе оплодотворения сливаются, образуя зиготу, резко различные по размеру, форме и поведению половые клетки –гаметы.

2 **Гаметангииогамия** – слияние содержимого двух многоядерных клеток (гаметангииев), не дифференцированное на специализированные одноядерные половые клетки (гаметы). Разновидностью этого процесса является зигогамия – тип полового процесса, при котором между копулирующими особями образуются соединяющие их выросты, и происходит слияние протопластов двух клеток, не имеющих внешней дифференцировки на мужские и женские половые элементы.

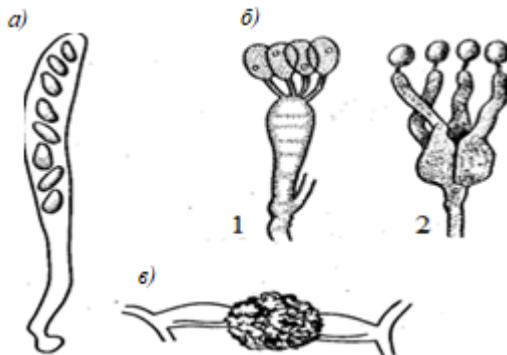
3 Для базидиальных грибов характерна **соматогамия**: они не образуют ни гамет, ни гаметангииев; плазмогамия происходит у них при слиянии двух одноядерных клеток, так называемых первичных мицелиев; возникающая при этом двухъядерная клетка даёт начало вторичному мицелию, состоящему из клеток, содержащих дикарионы; на этом мицелии образуются базидии, в них и происходит кариогамия.

Гаметангииогамия и соматогамия – выработанное грибами в процессе эволюции приспособление к существованию вне водной среды.

4 **Сперматизация** – оплодотворение недифференцированных женских гиф отдельными мужскими спорами – спермациями. Женские гифы могут иметь специальные структуры для улавливания спермациев, а могут и не иметь определённых воспринимающих структур. Этот тип полового процесса характерен для лабульбениевых грибов (аскомицеты, эктопаразиты).

Генеративные органы грибов обычно менее изменчивы, чем вегетативные, поэтому для распознавания и систематики грибов чаще всего используют особенности строения их половых структур. Изменчивость грибов под влиянием окружающей среды называют полиморфизмом. Кроме того, в жизненном цикле грибов может быть несколько типов спороношения, которые последовательно сменяются. Способность грибов образовывать спороношение разных типов называют **плеоморфизмом**.

В своем развитии грибы проходят ряд стадий, характеризующихся определенными морфологическими и цитологическими особенностями. Последовательное прохождение в течение жизни различных стадий и спороношений, завершающееся образованием исходных спор, называют циклом развития (рисунок 3.18).



*a* – сумка (аска) с аскоспорами;  
*б* – базидии с базидиоспорами (1 – одноклеточная; 2 – многоклеточная); *в* – зигота

Рисунок 3.18 – Органы полового спороношения

У многоклеточных грибов из клетки, которая образуется после слияния, развиваются **органы плодоношения**:

– **базидии** – имеют вид продолговатых мешковидных вытянутых клеток, которые образуются у основания переплетающихся гиф. Типичная зрелая базидия имеет 4 одноклеточные споры (базидиоспоры), расположенные на особых выростах – стеригмах. При прорастании каждая базидиоспора даёт септированный первичный гаплоидный мицелий, или грибницу. Затем у большинства базидиальных грибов происходит слияние клеток одной и той же или различных грибниц. На диплоидной грибнице обычно развиваются плодовые тела (у ржавчинных и головняевых грибов – спороношения).

Далее в базидиях (у головняевых и ржавчинных грибов в спорах) происходит мейоз, заканчивающийся формированием 4 ядер, переходящих в развившейся к этому времени базидиоспоры (см. рисунок 3.18, б):

– **сумки** (аски) представляют собой вытянутые клетки, внутри которых образуется определенное число (чаще 8) аскоспор различной формы, бесцветных или окрашенных (см. рисунок 3.18, а). Большинство грибов (совершенные грибы) может размножаться бесполым и половым способами. Некоторые грибы, не способные к половому размножению, называют *несовершенными*.

Многоклеточное строение, дифференциация жизненных функций между частями гриба (воздушным и субстратным мицелием) свидетельствуют о

том, что грибы являются более высокоорганизованными, сложными организмами в сравнении с бактериями.

**Отдел Хитридиомицеты** (*Chytridiomycota*) – отдел грибоподобных организмов, включающий единственный класс *Chytridiomycetes*. Объединяет 127 родов и около 1000 видов. Мицелий слаборазвит, основная масса таллома представляет так называемое плазменное тело, из которого вырастают ризоидные гифы.

Хитридиомицеты тесно связаны с водной средой, где паразитируют на водорослях и беспозвоночных. Могут вызывать массовую гибель водных организмов вплоть до амфибий, а также развиваться во влажных почвах и вызывать болезни высших растений: чёрную ножку капусты (*Olpidium brassicae*), рак картофеля (*Synchytrium endobioticum*) и др. Однако не так опасны как оомицеты. Меньшее количество хитридиомицетов сапротрофы.

Гаплоидные зооспоры хитридиомицетов снабжены одним жгутиком и могут как давать начало новому гаплоидному организму, так и сливаться друг с другом и создавать диплоидный организм, формирующий новые гаплоидные зооспоры (порядок *Chytridiales*). У ряда видов имеет место половой процесс по типу холограмии (слияние целых организмов) или формируются гаметы, отличные от зооспор.

**Отдел Оомицеты** (*Oomycota*) – группа мицеллярных организмов, включающая 70 родов и 570 видов. Ранее относилась к грибам (фикомицетам), позже была переведена из царства *Fungi* в *Protista*. Обитают преимущественно в водной среде, где вызывают раневые инфекции рыб или являются сапротрофами. Другие являются паразитами высших растений. В частности, к оомицетам относится *Phytophthora infestans*, вызывающая фитофтороз картофеля, ставший одной из причин катастрофического «картофельного голода» в Ирландии 1845–1849 гг.

*Фитофтора Phytophthora infestans* поражает клубни и ботву картофеля, плоды томатов и баклажаны. На клубнях, зараженных фитофторой, образуются вдавленные пятна, захватывающие постепенно весь клубень, который при этом отмирает. Поверхность клубня покрывается белым пушистым налетом, состоящим из спорангииносцев.

*Плазмопара Plasmopara viticola* вызывает болезнь винограда, поражающую листья и ягоды (мучнистая ложная роса). Мицелий ценоцитный, т. е. многоядерный, не имеющий перегородок, кроме как отделяющих репродуктивные органы. Он обычно ветвится слабо, у некоторых примитивных видов формирует плазмодий. Клеточная стенка состоит из целлюлозы (а не хитина как у настоящих грибов) и глюкана. Оомицеты размножаются как бесполым, так и половым путём. При бесполом размножении образуют зооспоры в спорангиях. В ряде случаев спорангий может отделяться от спорангииносца и прорастать как одна спора. Зооспоры имеют два жгутика – передний перистый и бичевидный задний, служащий для передвижения.

Несмотря на наличие развитого мицелия оомицеты были исключены из числа грибов. Из всех грибов они и хитридиомицеты имеют подвижные зооспоры, оомицеты не имеют хитина в клеточной стенке, биосинтез лизина происходит у них как у растений, а не как у остальных грибов, наконец, они имеют совершенно не свойственную гриbam ультраструктуру митохондрий.

**Отдел Зигомицеты** (*Zygomycota*) – отдел грибов, включающий класс *Zygomycetes* и *Trichomycetes*. Объединяет 85 родов и 600 видов. Отличаются развитым ценоцитным мицелием непостоянной толщины, в котором септы образуются только для отделения репродуктивных органов. Бесполое размножение происходит с помощью неподвижных спор, образующихся в спорангиях и конидиях, половое – зигоспорами. Порядок *Zoopagales* включает хищные грибы, обладающие клейкими гифами и ловчими кольцами; питается простейшими, нематодами и мелкими личинками насекомых. Типичные почвенные грибы, многие образуют микоризу. В основном являются сапротрофами, но многие могут развиваться на живых ослабленных растениях в качестве паразитов, а *Spinellus* паразитирует на базидиомицетах. Порядок *Entomoph-thorales* – патогенен для насекомых, некоторые зигомицеты способны вызывать вторичные инфекции человека. Тропические роды могут вызывать грануломатоз. Используются как продуценты разных веществ, наиболее интенсивно – в Японии. *Rhizopus stolonifer* применяется для получения фумаровой кислоты, *R. oryzae* – спиртов, *Blakeslea trispora* – β-каротина; *Phycomyces blakesleanus* и *Rhizopus* используются для получения медицинских препаратов. Многие из них (мукор, ризопус, тамнидиум) – возбудители порчи пищевых продуктов.

**Мукор** (*Mucor*) – серая плесень, исключительно неприхотлива и быстро размножается. Поражает плоды, овощи, повреждает кулинарные изделия и другие продовольственные товары, а также древесину, обои, ткани и др.

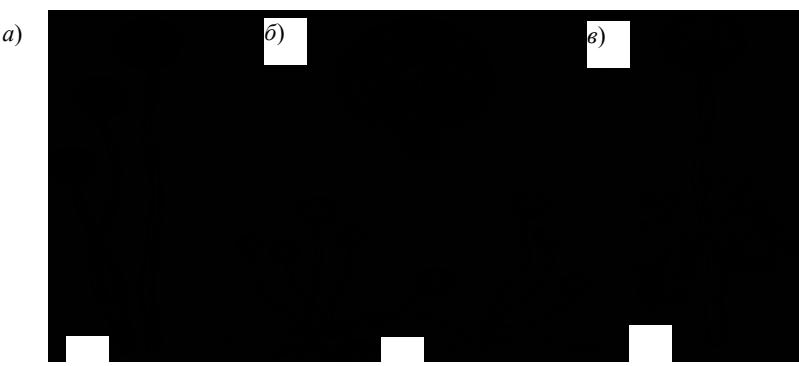
**Ризопус** (*Rhizopus*) образует неветвящиеся спорангииносцы, растущие кустиками. Вызывает «плесневение» хлеба, «мягкую гниль» ягод и овощей.

**Тамнидиум** (*Thamnidium*) формирует спорангии двух видов: центральный спорангииносце заканчивается крупным спорангием, а на боковых ответвлениях располагаются спорангии небольших размеров (спорангииоли), обычно содержащие до 4 спор (рисунок 3.19).

**Отдел Аскомицеты** (*Ascomycota*), или сумчатые грибы, – отдел, объединяющий организмы с септированным мицелием и специфическими органами полового спороношения – сумками (асками), содержащими чаще всего по 8 аскоспор. Имеют и бесполое спороношение, во многих случаях половой процесс утрачивается и такие виды грибов относят к несовершенным грибам (*Deuteromycota*). К аскомицетам относят до 2000 родов и 30 000 видов.

Среди них – дрожжи (класс *Saccharomycetes*) – вторично одноклеточные организмы. Известные представители аскомицетов – сморчки, строчки и

трюфели. Мицелий разделён поперечными перегородками (септирован), что позволяет гифе в случае повреждения терять меньше клеточного содержимого и обуславливает большую выживаемость аскомицетов по сравнению с ценоцитными зигомицетами. Наименьший жизнеспособный фрагмент мицелия, способный дать начало новому организму, для зигомицета составляет ~100 мкм, а для аскомицета – 15–20 мкм (1–3 целых клетки). В середине септы есть простая пора, через которую возможен обмен цитоплазмой, органеллами и даже ядрами. Чаще всего у аскомицетов одно гаплоидное ядро в клетке.



*a* – *Mucor*; *б* – *Rhizopus*; *в* – *Thamnidium*

Рисунок 3.19 – Спорангииеносцы зигомицетов

Бесполое размножение аскомицетов осуществляется конидиями, которые чаще всего образуются экзогенно (реже эндогенно) на конидиеносцах, собранных в группы. Скопления конидиеносцев могут представлять пучки (коремии), подушечки (спородохии) либо образовывать слой на сплетении гиф – ложе.

Половое размножение аскомицетов проходит в форме гаметангии, без образования дифференцированных гамет. Для этого на разных гифах образуются половые органы: мужские – антеридии и женские – архикарпы, представляющие собой видоизменённые оогонии.

У низших форм половой процесс напоминает зигогамию у зигомицетов (*Zygomycota*), поскольку образующиеся гаметангии внешне сходны и после их объединения сразу происходит слияние ядер. Однако у низших асковых грибов сливаются только два ядра многоядерных гаметангииев, а не все, т. е. отсутствует множественная кариогамия. Образовавшееся диплоидное ядро без периода покоя делится мейотически, образуя гаплоидные ядра, а зигота трансформируется в сумку – аск.

У высших форм половой процесс проходит более сложно. Вначале гаплоидные ядра дикариона сливаются (происходит кариогамия), образуя диплоидное ядро. Без периода покоя это ядро делится мейотически, формируя четыре гаплоидных ядра, а те, в свою очередь, делятся митотически. В итоге появляются восемь гаплоидных клеток, которые становятся аскоспорами, а клетка, в которой они находятся, становится аском. У некоторых видов количество спор может быть меньшим (четыре) за счёт отсутствия митотического деления после мейотического или за счёт дегенерации части гаплоидных ядер.

Таким образом, в жизненном цикле асковых грибов имеется три стадии: гаплоидная стадия, когда мицелий размножается бесполым путём; стадия дикариона, а также самая короткая – диплоидная стадия, когда молодая сумка непродолжительное время содержит диплоидное ядро.

У многих сумчатых грибов половой процесс упрощается. У них не образуются антеридии, а вместо них функционируют вегетативные гифы, конидии или мелкие клетки спермации, которые могут образовываться даже не на соседних гифах, а на достаточном расстоянии от архикарпа. Потоками воздуха, воды или через насекомых спермации переносятся на трихогину, после чего происходит слияние цитоплазмы клеток. Случается, что могут отсутствовать оба гаметангия, тогда половой процесс протекает в форме соматогамии, то есть сливаются вегетативные клетки. При этом следует отметить, что у сумчатых грибов есть формы с гомоталличным и гетероталличным мицелиями, причём последние всегда отличаются набором аллелей.

Аскогенные гифы с асками могут образовываться не только беспорядочно (в любом месте мицелия), как это происходит у низших форм, но и на плодовых телах, состоящих из плотно переплетённых гиф. У сумчатых грибов имеются три типа плодовых тел: клейстотеки (полностью замкнутые плодовые тела с находящимися внутри асками, освобождающимися после разрушения его стенок), перитеции (кувшинообразной формы с отверстием в верхней части), апотеции (открытые вместе лища аск, образуют чаши или сморщенную поверхность сморчков).

Выделяют **4 класса аскомицетов:**

1 Archaeascomycetes, или Taphrinomycetes.

2 Дрожжи (Saccharomycetes).

3 Loculoascomycetes.

4 Истинные аскомицеты (Ascomycetes, или Euascomycetes).

К истинным аскомицетам относятся более 90 % видов из отдела Ascomycota. По строению плодовых тел и сумок их разделяют на 40 порядков.

**Аскомицеты** играют важную роль в наземных экосистемах. Разрушая такие субстраты, как мёртвые ветки и стволы деревьев (в том числе входящие в их состав целлюлозу и лигнин, недоступные большинству организ-

мов), они вносят существенный вклад в биологические циклы углерода и азота. Сами по себе аскомицеты являются пищей для беспозвоночных, грызунов и более крупных животных: оленей и кабанов. Аскомицеты являются основой для многих (до 98 %) лишайников. С корневыми системами высших растений многие аскомицеты образуют микоризу. Многие асковые широко используются в хозяйственной деятельности человека, например, трюфели и сморчки употребляются в пищу. Дрожжи незаменимы в хлебопечении и на бродильных производствах, другие виды широко используются для получения биологически активных веществ (антибиотиков, витаминов, ферментов, алкалоидов, гиббереллинов и пр.). Многие виды широко используются в генетических исследованиях.

Типичные представители аскомицетов приведены далее.

*Аспиргиллус (Aspergillus)* часто развивается на поврежденном зерне, стенах сырых помещений. Образует ветвящийся мицелий с многочисленными септами. Конидиеносцы прямые без перегородок. Верхние концы их расширены в виде небольшой головки. На головке радиально располагаются в один или два яруса вытянутые клетки – фиалиды с отшнуровывающимися на свободных концах цепочками конидий. Конидии могут быть шаровидными, эллиптическими, гладкими, бородавчатыми или шиповатыми, серовато-зеленого, желто-зеленого или коричневого цвета. Головки конидиеносцев и радиально расходящиеся цепочки конидий напоминают струйки воды. Многие виды этих грибов являются активными продуцентами ферментных препаратов, лимонной, итаконовой, глюконовой и других органических кислот, некоторых антибиотиков (рисунок 3.20, а).

*Пенициллюм (Penicillium)* имеет хорошо развитый, ветвистый, септированный мицелий. Конидии располагаются на концах приподнятых, разделенных перегородками конидиеносцев. Конидиеносцы с длинными цепочками конидий по внешнему виду напоминают кисточки. Окраска конидий – зеленая, голубая, серо-зеленая; форма – эллиптическая или шаровидная; поверхность – гладкая, шиповатая или слегка морщинистая.

Конидии пеницилловых грибов постоянно встречаются в воздухе и активно размножаются на плодах, ягодах, солоде, особенно на поврежденных зернах, пищевых продуктах, на оборудовании и стенах влажных, плохо вентилируемых помещений. Некоторые представители пеницилловых грибов применяются для получения антибиотика пенициллина [24], ферментного препарата глюкозооксидазы, участвуют в созревании специфических видов сыра. К плодосумчатым аскомицетам относятся: *склеротиния* (*Sclerotinia*), вызывающая порчу плодов и овощей – огурцов, моркови (белая гниль моркови); *спорынья* (заражает зерновые культуры), а также съедобные грибы – сморчок, трюфель.



а – *Aspergillus*; б – *Penicillium*; в, г – плодовые тела (общий вид и разрез)

Рисунок 3.20 – Конидиеносцы и плодовые тела (клейстотеции) грибов

**Дрожжи** – внетаксономическая группа одноклеточных грибов, утративших мицелиальное строение в связи с переходом к обитанию в жидкких и полужидких богатых органическими веществами субстратах. Объединяет около 1500 видов, относящихся к аскомицетам и базидиомицетам. Различить дрожжи, принадлежащие к разным отделам грибов, можно как по характеристикам их жизненного цикла, так и по признакам аффинитета (синтез каротиноидов) – базидиомицетные дрожжи, тип убихинонов с 5–7 изопренойдными остатками – у аскомицетных и с 8–10 у базидиомицетных, хотя есть исключения, тип почкования, наличие уреазы (характерна за некоторыми исключениями только базидиомицетным) и др.

Клетка дрожжей гораздо крупнее бактериальной, длина ее может достигать 6–10 мкм, а в отдельных случаях – 12–18 мкм, ширина – 4–8 мкм. Клетки имеют округлую, яйцевидную или овально-эллиптическую формы, реже – цилиндрическую, лимоновидную, колбасообразную. Форма и размеры клеток зависят от среды, в которой дрожжи развиваются.

Клеточная оболочка у дрожжей плотная, двухслойная, содержит 60–70 % гемицеллулозы, небольшое количество белков, липидов и хитина. В отличие от бактерий, дрожжи имеют дифференцированное (резко выраженное) ядро с двухслойной ядерной мембраной. Поэтому их относят к эукариотам.

В цитоплазме есть эндоплазматическая сеть, аппарат Гольджи, лизосомы, митохондрии, рибосомы. По мере развития клеток в цитоплазме появляются вакуоли, наполненные клеточным соком. В качестве запасных питательных веществ в цитоплазме дрожжей могут быть зерна гликогена, волютина, капельки жира. У некоторых разновидностей дрожжей жира накапливается так много, что их используют в промышленности.

Дрожжи являются хемоорганогетротрофами и используют органические соединения как для получения энергии, так и в качестве источника углерода. Им необходим кислород для дыхания, однако, при его отсутствии многие

виды способны получать энергию за счёт брожения с выделением спиртов (факультативные анаэробы).

В отличие от бактерий, среди дрожжей нет облигатных анаэробов, гибнущих при наличии кислорода в среде. При пропускании воздуха через сбраживаемый субстрат дрожжи прекращают брожение и начинают дышать (поскольку этот процесс эффективнее), потребляя кислород и выделяя углеводородный газ. Это ускоряет рост дрожжевых клеток (эффект Пастера). Однако даже при доступе кислорода в случае высокого содержания глюкозы в среде дрожжи начинают её сбраживать (эффект Кребтри).

Дрожжи достаточно требовательны к условиям питания. В анаэробных условиях дрожжи могут использовать в качестве источника энергии только углеводы, причём в основном гексозы и построенные из них олигосахариды. Некоторые виды (*Pichia stipitis*, *Pachysolen tannophilus*) усваивают и пентозы, например, ксилоzu. *Schwanniomyces occidentalis* и *Saccharomyces fibuliger* способны сбраживать крахмал, *Kluuyveromyces fragilis* – инулин. В аэробных условиях круг усвиваемых субстратов шире: помимо углеводов также жиры, углеводороды, ароматические и одноуглеродные соединения, спирты, органические кислоты. Гораздо больше видов способно использовать пентозы в аэробных условиях. Тем не менее, сложные соединения (лигнин, целлюлоза) для дрожжей недоступны.

Источниками азота для всех дрожжей могут быть соли аммония. Примерно половина видов имеет нитратредуктазу и может усваивать нитраты. Пути усвоения мочевины различны у аскомицетовых и базидиомицетовых дрожжей. Аскомицетовые сначала карбоксилируют её, затем гидролизуют, а базидиомицетовые – сразу гидролизуют уреазой.

Для практического применения важны продукты вторичного метаболизма дрожжей, выделяемые в малых количествах в среду: сивушные масла, ацетон (ацетилметилкарбинол), диацетил, масляный альдегид, изоамиловый спирт, диметилсульфид и др. Именно от них зависят органолептические свойства полученных с помощью дрожжей продуктов. Места обитания дрожжей связаны преимущественно с богатыми сахарами субстратами: поверхностью плодов и листьев, где они питаются прижизненными выделениями растений, нектаром цветов, раневыми соками растений, мёртвой фитомассой и т. д., однако они распространены также в почве и природных водах. Дрожжи (*r. Candida*, *Pichia*, *Ambrosiozyma*) постоянно присутствуют в кишечнике и ходах ксилофагов (питающихся древесиной насекомых), богатые дрожжевые сообщества развиваются на листьях, поражённых тлёй. Представители рода *Lipomyces* являются типичными почвенными обитателями.

Отличительной особенностью дрожжей является способность к вегетативному размножению в одноклеточном состоянии (рисунок 3.21). При сопоставлении с жизненными циклами грибов это выглядит как почкование спор или зиготы. Многие дрожжи также способны к реализации полового жизненного цикла (его тип зависит от аффинитета), в котором могут быть и мицелиальные стадии.

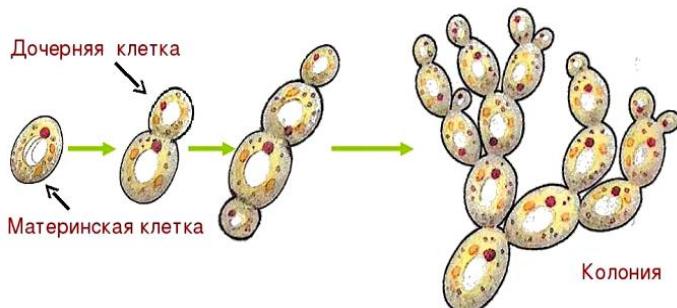


Рисунок 3.21 – Схема размножения дрожжей почкованием

У некоторых дрожжеподобных грибов, образующих мицелий, возможен его распад на клетки (артроспоры). Это роды *Endomyces*, *Galactomyces*, *Arxula*, *Trichosporon*. У последних двух артроспоры после образования начинают почковаться. *Trichosporon* также образует вегетативные эндоспоры внутри клеток мицелия.

Некоторые виды дрожжей с давних пор используются человеком при приготовлении хлеба, пива, вина, кваса и др. В сочетании с перегонкой процессы брожения лежат в основе производства крепких спиртных напитков. Полезные физиологические свойства дрожжей позволяют использовать их в биотехнологии. В настоящее время дрожжи применяют в производстве ксилита, ферментов, пищевых добавок, для очистки от нефтяных загрязнений. Также дрожжи широко используются в науке в качестве модельных организмов для генетических исследований и в молекулярной биологии [25]. Пекарские дрожжи были первыми из эукариот, у которых была полностью определена последовательность геномной ДНК. Важным направлением исследований является изучение прионов у дрожжей.

**Отдел Базидиомицеты** (*Basidiomycetes*). Мицелий базидиомицетов, как и аскомицетов, состоит из клеточных гиф. Характерный для них орган спороношения – базидия – по своему расположению (это клетка на конце гифы) соответствует аску. От базидии отшнуровываются четыре одноядерные гаплоидные базидиоспоры. Подобно аскоспорам, они образуются в результате плазмогамии, кариогамии и мейоза. Два последних процесса протекают соответственно в аске или в базидии. Базидиомицеты включают шляпочные, домовые, ржавчинные и головневые грибы, трутовики, всего более 30 тыс. видов.

**Шляпочные грибы** имеют плодовое тело, состоящее из шляпки и ножки. Нижняя поверхность шляпки состоит либо из пластинок (сыроежка, опёнок, ржик), либо из трубочек (белый гриб, подберёзовик), на боковых поверхностях которых развиваются базидии. Известно около 200 видов съедобных шляпочных грибов и около 25 видов ядовитых.

*Трутовики* разрушают древесину как живых деревьев, так и лесоматериалов. Например, грибы рода *Fomes* образуют веерообразные наросты на стволах деревьев, делая древесину непригодной для использования.

*Домовые грибы* можно отнести к трутовикам. Поражают деревянные части зданий, бочки и другие предметы. Наиболее опасен домовый гриб *Serpula lacrymans*, который, развиваясь на древесине, образует белый мицелий с розоватыми или желтоватыми пятнами и водянистой жидкостью.

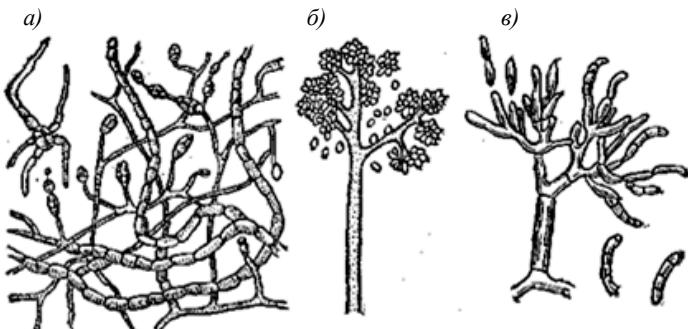
*Головневые грибы* – паразиты высших растений, вызывают у них заболевания, известные под названием головни. Большой вред наносят головневые грибы хлебным злакам. Всего известно (на культурных и дикорастущих растениях) около 700 видов, объединяемых в 42 рода. Представители головневых грибов распространены во всех частях света, встречаются повсюду, в том числе в высоких широтах и высокогорных областях.

*Ржавчинные грибы* – облигатные паразиты покрытосеменных, голосеменных и папоротникообразных, возбудители ржавчины растений. Мицелий эндофитный, межклетный, с внедряющимися в полость клеток гаусториями, через которые гриб поглощает питательные вещества. В клетках мицелия и особенно в спорах большинства ржавчинных грибов содержится большое количество масла в виде капель, окрашенных липохромом в оранжевый или ржавый цвет (отсюда название – «ржавчинные грибы»). У большинства ржавчинных грибов мицелий сосредоточен в месте проникновения инфекции: обычно после образования спороношений гриб вызывает гибель ткани растения-хозяина, после чего отмирает и сам. Некоторым представителям свойствен диффузный мицелий, который пронизывает ткань всего растения; он часто бывает многолетним и нередко вызывает значительные изменения в анатомическом строении поражённых органов (опухоли и др.).

**Отдел Дейтеромицеты** (*Deuteromycetes*), или несовершенные грибы (*Fungi imperfecti*), их тело состоит из расчленённых прозрачных или окрашенных многоклеточных гиф и иногда из почкующихся клеток. Размножаются исключительно бесполым путём, при котором образование конидий происходит на изолированных или расположенных группами конидиеносцах или специальных образованиях, называемых пикnidами. К этому классу относятся три порядка: *Sphaeropsidales*, *Melanconiales* и *Hypocreales* (*Moniliales*), представители которых широко распространены в почве.

Грибы порядка *Sphaeropsidales* характеризуются конидиями, которые образуются в пикницах, остающихся закрытыми или открывающихся наружу порами или трещинами. Сюда входят виды рода *Phoma* образующие микоризу с корнями некоторых растений. В порядок *Melanconiales* входят организмы, которые не имеют пикnidов. Конидии расположены на конидиеносцах. Грибы порядка *Hypocreales* имеют расчлененные, разветвленные, прозрачные или темноокрашенные гифы. Конидии находятся на конидиеносцах, последние расположены по одному или группами.

В почве имеются многие представители данного порядка – *Cephalosporium*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Fusarium* и др. (рисунок 3.22).



а – альтернария; б – ботритис; в – фузариум

Рисунок 3.22 – Несовершенные грибы (дейтеромицеты)

К классу несовершенных грибов, различающихся между собой типом мицелия и формой конидиеносцев, относят и группу грибов с неустановленным способом полового и бесполого размножения (порядок *Mycelia sterilia* – грибы со стерильным мицелием). Сюда входит ряд грибов (*Sclerotium*, *Rhizoctonia* и др.), имеющих значение в почвенных процессах.

### 3.1.6 Простейшие

**Протисты (Protista)** – гетерогенная группа эукариотических живых организмов, которые не относятся ни к животным, ни к растениям, ни к грибам. Для организмов, относящихся к данной группе, невозможно указать никаких положительных общих характеристик. Единственная объединяющая их особенность формулируется как отсутствие сложной структуры, что характерно для многих групп, формируемых «по остаточному принципу». Все простейшие – одноклеточные или многоклеточные, не имеют высокоорганизованных тканей.

Простейшие обладают тончайшими морфофизиологическими приспособлениями к обитанию в разных экологических условиях. Микроскопических размеров, они обитают в воде, влажной почве или в теле различных животных и человека. Форма тела разнообразна – от неопределённой (как у амёбы) до удлинённой, обтекаемой, веретеновидной, некоторые имеют наружную раковину (фораминиферы), а живущие в толще воды – причудливые выросты.

Тело большинства простейших состоит из одной клетки, содержащей одно или несколько ядер. У одних тело покрыто лишь тончайшей мембраной, у других помимо клеточной мембранны развит ряд структур, образую-

щих вместе с мембраной толстую оболочку, обычно эластичную, – пелликулу. Способны передвигаться с помощью ложноножек, жгутиков или ресничек, реагируют на различные раздражения (фототаксис, хемотаксис, термотаксис и др.). Питаются простейшие мельчайшими животными, растительными организмами и гниющими органическими веществами, паразитические формы обитают на поверхности тела, в полостях тела или тканях организмов своих хозяев. Пути поступления пищи в организм клетки также различны: пиноцитоз, фагоцитоз, осмотический путь, активный перенос веществ через мембрану. Поступившую пищу переваривают в пищеварительных вакуолях, заполненных пищеварительными ферментами. Некоторые из них имеют фотосинтезирующие внутриклеточные симбионты – хлореллы или хлоропласти (например, эвглены), способны синтезировать органическое вещество из неорганических веществ с помощью фотосинтеза.

Газообмен у простейших осуществляется всей поверхностью тела осмотическим путем; выделение продуктов обмена веществ и избытка воды происходит через поверхность тела, а также с помощью специальных периодически образующихся сократительных (или пульсирующих) вакуолей. Может быть одна или несколько вакуолей.

Размножение простейших происходит бесполым и половым путем в зависимости от условий существования. При бесполом размножении сначала ядро делится на две или несколько частей, а затем делится цитоплазма на две (равные или неравные) или много частей (соответственно числу вновь образовавшихся ядер). В результате из одного организма образуется два (одинаковых или не равных по величине) или несколько новых организмов. При половом размножении две равные или различные по величине и строению (мужская и женская) особи сливаются друг с другом, образуя зиготу, которая затем начинает размножаться бесполым путем. Иногда между двумя особями происходит обмен частью ядер при соприкосновении особей (образование зиготы не наблюдается).

При неблагоприятных условиях простейшие способны образовывать цисты: их тело округляется и покрывается толстой оболочкой. В таком состоянии они могут находиться долгое время. При благоприятных условиях простейшее освобождается от оболочки и начинает вести подвижный образ жизни. Протисты традиционно относят по схожести к вышестоящим царствам.

Животноподобные простейшие в большинстве своем одноклеточные, подвижные, питающиеся при помощи фагоцитоза (хотя есть и исключения). Обычно они имеют размеры 0,01–0,5 мм, как правило, слишком малы для наблюдений без микроскопа. Повсеместно распространены в водяных средах и почвах, обычно переживая сухие периоды в форме цист или спор. Именно к этому типу относятся некоторые общепринятые паразиты. Простейшие делятся на **группы по способам перемещения**:

– *саркомастигофоры* – способны к передвижению с помощью жгутиков

или псевдоподий (ложноножек), иногда оба способа используются совместно. Условно разделяют на две подгруппы – жгутиковые и саркодовые;

– *ресничатые* (*Ciliates*) – с большим количеством ресничек, например, инфузория (*Paramcium*);

– *споровики* (*Sporozoa*) – неподвижные паразиты, форма спор, например, малярийный плазмодий (*Plasmodium*).

Водоросли используют световую энергию при помощи фотосинтеза. Сюда входят многие одноклеточные, которые также считаются простейшими, такие как эвглена и *Paramcium bursaria*, которые приобрели хлоропласты путем эндосимбиоза. Другие неподвижны и по-настоящему многоклеточны. Среди таких – зеленые и красные водоросли. Некоторые биологи относят их к царству растений вопреки их простой организации, однако бурые водоросли сильно отличаются от других растений.

Существуют также грибоподобные протисты: шламовые плесени, спорообразующие амебы, проводящие часть жизненного цикла собранными в многоклеточные плодоносящие тела, а также тины и *labyrinthulids*. Два последних типа также связаны с бурыми, золотистыми и диатомовыми водорослями, формирующими группу, называемую гетероконты (*heterokonts*). Их можно рассматривать как отдельное царство *Chromista*, в таком случае оставшиеся протисты сформируют царство – простейшие (*Protozoa*).

Классификация протист перенесла периоды изменений. За исключением ресничатых и водяных грибков, традиционные группы полифилетичны и часто пересекаются. Новые критерии классификации пытаются представить монофилетичные группы, основанные на данных биохимии и генетики. Понимание эволюционных взаимоотношений между протистами всплыло только в последнее время, и положение многих групп по-прежнему неоднозначно. Роль простейших в жизни природы и человека значительна. В водоёмах они питаются бактериями и гниющими органическими остатками, очищая воду (санитарная роль), а также сами являются пищей для многих животных, играют большую роль в почвообразовательных процессах. Обитатели толщи воды океанов – фораминиферы (с известковыми раковинами), радиолярии (с кремниевым скелетом), кокколиты (из жгутиковых, имеющих известковый панцирь) – отмирая, образуют на дне отложения известковых и кремниевых пород, входящих в состав земной коры. Мел, например, состоит на 90–98 % из панцирей кокколитофорид. Ископаемые протисты используются в стратиграфии осадочных пород при определении возраста отложений, что особенно важно при поиске полезных ископаемых. Среди простейших есть паразиты, вызывающие тяжёлые патологии человека, животных и растений.

Большинство простейших – мелкие организмы. Средние размеры определяются несколькими десятками микрометров (1 мкм равен 0,001 мм). Самые мелкие простейшие – внутриклеточные паразиты – достигают 2–4 мкм,

а длина самых крупных видов, например некоторых грегарин, может достигать 1000 мкм. Ископаемые раковинные корненожки, например нуммулиты, в диаметр достигают 5–6 см и более.

Форма тела простейших разнообразна. Среди них имеются виды с непостоянной формой тела – амебы (рисунок 3.23).

Разнообразны типы симметрии у простейших. Широко распространены формы с радиальной симметрией: радиолярии, солнечники. Это в основном плавающие планктонные простейшие. Двусторонняя симметрия наблюдается у некоторых жгутиковых, фораминифер, радиолярий. Поступательно-вращательная симметрия характерна для фораминифер со спирально закрученной раковиной. У некоторых видов наблюдается метамерия – повторяемость структур по продольной оси.

Разнообразны жизненные формы простейших, или морфоадаптивные типы. Наиболее широко распространеными формами являются амебоидные, которые ведут ползающий образ жизни на различных субстратах в воде или в жидкой среде в теле хозяина; раковинные – малоподвижные бентосные формы; активно плавающие жгутиконосцы и ресничатые; парящие в составе планктона радиальные, или лучистые, формы; сидячие – стебельчатые; узкотельные или плоскотельные скважинки субстратов – интерстициалы, а также округлые неподвижные, покоящиеся формы (цисты, споры).

Строение клетки простейших характеризуется всеми основными признаками клеточного строения эукариот. Ультраструктура строения простейших изучена методом электронной микроскопии. Клетка простейших типична для эукариотных организмов и состоит из цитоплазмы и одного или нескольких ядер (рисунок 3.24).

Цитоплазма ограничена снаружи трехслойной мембраной. Общая толщина мембраны около 7–10 нм. В цитоплазме простейших различают наружный, более прозрачный и плотный слой – эктоплазму и внутренний зернистый слой – эндоплазму.

В эндоплазме сосредоточены все основные органеллы клетки: ядро, митохондрии, рибосомы, лизосомы, эндоплазматическая сеть, аппарат Гольджи и др. Кроме этого, у простейших есть особые органеллы: опорные, сократительные фибриллы, пищеварительные и сократительные вакуоли и др.

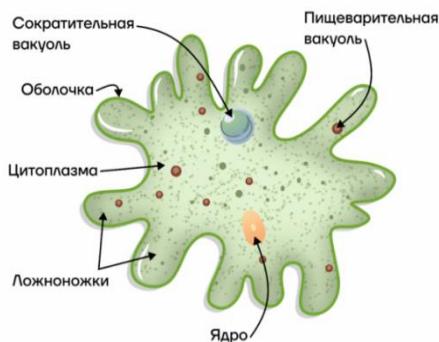


Рисунок 3.23 – Амба обыкновенная

Ядро покрыто двухслойной мембраной с порами. Внутри ядра находится ядерная плазма, в которой расположены хроматин и ядрышки.

Хроматин представляет собой деспирализованные хромосомы, состоящие из ДНК и белков типа гистонов. Ядрышки подобны рибосомам и состоят из РНК и белков. Ядра простейших разнообразны по составу, форме, размерам.

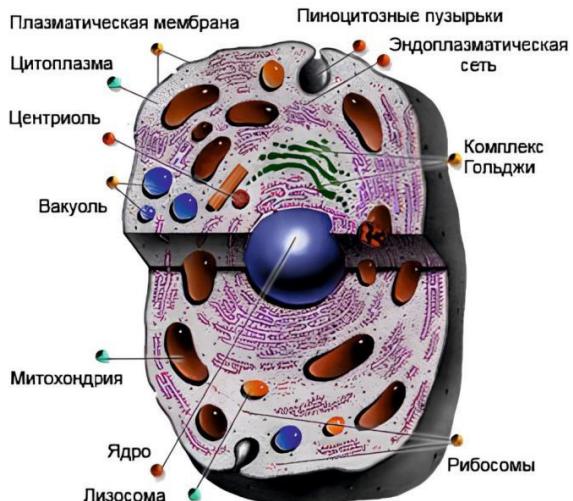


Рисунок 3.24 – Строение эукариотической клетки

У простейших можно выделить особые функциональные комплексы органелл, которые соответствуют системам органов и тканей многоклеточных (покровные и опорные органеллы). Часть видов одноклеточных не обладает покровными и опорными структурами. Клетка таких простейших ограничена лишь мягкой цитоплазматической мембраной – например, амёба.

### 3.1.7 Водоросли

**Водоросли (Algae)** – гетерогенная экологическая группа преимущественно фототрофных одноклеточных, колониальных или многоклеточных организмов, обитающих, как правило, в водной среде, в систематическом отношении представляющая совокупность многих отделов.

Водоросли – группа организмов различного происхождения, объединённых следующими признаками: наличие хлорофилла и фотоавтотрофного питания; у многоклеточных – отсутствие чёткой дифференцировки тела (называемого слоевищем или талломом) на органы, отсутствие ярко выраженной проводящей системы. К ним относятся пять-шесть (в зависимости от классификации) отделов эукариот, многие из которых не связаны общим

происхождением. Также к водорослям часто относят сине-зелёные водоросли, являющиеся прокариотами. Традиционно водоросли причисляются к растениям. В современной систематике есть тенденция к выделению их в отдельный таксон или даже несколько отдельных царств.

Некоторые водоросли способны к гетеротрофии (питанию готовой организацией) как осмотрофной или адсорбтивной поверхностью клетки, так и путём заглатывания через клеточный рот (эвглены, динофитовые).

Размеры водорослей колеблются от долей микрона (кокколитофориды и некоторые диатомовые) до 40 м (макроцистис). Среди многоклеточных водорослей наряду с крупными есть микроскопические (например, спороносная стадия ламинариевых). Таллом бывает как одноклеточный, так и многоклеточный. Среди одноклеточных есть колониальные формы, когда отдельные клетки тесно связаны между собой (соединены стенками или погружены в общую слизь, иногда соединены цитоплазматическими выростами).

Клетки водорослей – типичные для эукариот. Очень похожи на клетки наземных растений (мхов, плаунов, папоротникообразных, покрытосеменных и цветковых). Основные отличия – на биохимическом уровне (различные фотосинтезирующие и маскирующие пигменты, запасающие вещества, основы клеточной стенки и т. д.) и в цитокинезе (процессе деления клетки).

Фотосинтезирующие (и «маскирующие» их) пигменты находятся в особых пластидах – хлоропластах. Хлоропласт имеет две (красные, зелёные, харовые водоросли), три (эвглены, динофлагелляты) или четыре (охрофитовые водоросли) мембранны. Также он имеет собственный сильно редуцированный генетический аппарат, что позволяет предположить его симбиогенез. Внутренняя мембрана выпячивается внутрь, образуя складки – тилакоиды, собранные в стопки – ламеллы: монотилакоидные у красных и сине-зеленых, двух- и больше у зеленых и харовых, трехтилакоидные у остальных. На тилакоидах, собственно, и расположены пигменты. Хлоропласти у водорослей имеют различную форму (мелкие дисковидные, спиралевидные, чашевидные, звездчатые и т. д.). У многих в хлоропласте присутствуют плотные образования – пиреноиды.

Продукты фотосинтеза сохраняются в форме различных запасных веществ: крахмала, гликогена, других полисахаридов, липидов. Запасание липидов больше свойственно морским формам (особенно планктонным диатомовым, которые за счёт масла держатся на плаву со своим тяжёлым панцирем), а запасание полисахаридов (включая крахмал и гликоген) больше свойственно пресноводным.

Клетки водорослей (за исключением амёбоидного типа) покрыты клеточной стенкой и/или клеточной оболочкой. Стенка находится снаружи мембранны клетки, обычно содержит структурный компонент (например, целлюлозу) и аморфный матрикс (например, пектиновые или агаровые вещества); также в ней могут присутствовать дополнительные слои (напри-

мер, спорополлениновый слой у хлореллы). Клеточная оболочка представляет внешний кремнийорганический панцирь (у диатомитов и некоторых других охрофитовых) или уплотнённый верхний слой цитоплазмы (плазмалемму), в котором могут быть дополнительные структуры, например, пузырьки, пустые или с целлюлозными пластинками (своеобразный панцирь, тека, у динофлагеллятов). Если клеточная оболочка пластичная, клетка может быть способна к метаболическому движению – скольжению за счёт небольшого изменения формы тела.

Водоросли лишены корней и поглощают нужные вещества из воды всей поверхностью. Крупные донные водоросли имеют органы прикрепления – по-дошву (уплощённое основание) или ризоиды (разветвлённые выросты). У некоторых водорослей побеги стелются по дну и дают новые слоевища.

Размножение водорослей – вегетативное, бесполое, половое, деление на две части. Крупные водоросли размножаются вегетативно – частями слоевища или при помощи специальных почек (сфацеляриевые). Некоторые многоклеточные водоросли не имеют полового размножения, у большинства же образуются споры и гаметы либо в обычных клетках (зеленые водоросли, часть красных), либо в особых образованиях – спорангиях и гаметангиях (бурые водоросли); споры и гаметы бывают неподвижными (красные, конъюгаты) или подвижными – со жгутиками. У водорослей наблюдаются все формы полового процесса: изогамия, гетерогамия, оогамия и конъюгация (слияние протопластов двух вегетативных клеток). Образующаяся в результате полового процесса зигота делится сразу или после периода покоя. Одновременно в ней может происходить мейоз. У примитивных водорослей одна и та же особь дает гаметы или споры в зависимости от внешних условий. У других водорослей функции бесполого и полового размножения выполняют разные особи (спорофиты и гаметофиты). Они могут произрастать одновременно в одинаковых условиях (фурцелярия), одновременно, но в разных местообитаниях (бангиевые), в одних и тех же местообитаниях, но в разные сезоны. У ряда водорослей происходит строгое чередование гаметофита и спорофита, которое принято называть «чередованием поколений». При этом у высших водорослей зигота или прорастает на гаметофите, на нем же вырастает и спорофит (ламинариевые), а гаметофит отмирает, или спора, не отделяясь от спорофита, прорастает в гаметофит, который развивается на спорофите (фукусовые).

**Распространение водорослей.** Мелкие свободноплавающие водоросли входят в состав планктона и, развиваясь в больших количествах, вызывают «цветение» (окрашивание) воды. Есть водоросли, внедряющиеся в раковины и известняк (сверлящие); встречаются (среди красных) и паразитические. Крупные морские водоросли, в основном бурые, образуют нередко целые подводные леса. Большинство водорослей обитает от поверхности воды до глубины 20–40 м, единичные виды (из красных и бурых) при хоро-

шей прозрачности воды опускаются до 200 м. Водоросли нередко в большом количестве живут на поверхности и в верхних слоях почвы, одни из них усваивают атмосферный азот, другие приспособились к жизни на коре деревьев, заборах, стенах домов, скалах. Некоторые водоросли вступают в симбиотические отношения с грибами (лишайники) и животными.

Водоросли – главные производители органических веществ в водной среде. Около 80 % всех органических веществ, ежегодно создающихся на Земле, приходится на долю водорослей и других водных растений. Водоросли прямо или косвенно служат источником пищи для всех водных животных. Известны горные породы (диатомиты, горючие сланцы, часть известняков), возникшие в результате жизнедеятельности водорослей в прошлые геологические эпохи.

Некоторые, в основном морские, водоросли употребляются в пищу (морская капуста, порфира, ульва), участвуют в образовании лечебных грязей. В приморских районах водоросли идут на корм скоту и удобрение. В ряде стран водоросли культивируют для получения большого количества биомассы, идущей на корм скоту и используемой в пищевой промышленности.

Съедобные водоросли (богатый минеральными веществами, особенно йодом, продукт) используются в восточно-азиатской кухне. Одно из самых популярных блюд с водорослями – суши.

### 3.2 Физиология микроорганизмов

Физиология микроорганизмов изучает процессы их роста, развития, питания, способы получения энергии для осуществления этих процессов, а также происходящие при этом превращения веществ в клетке.

Понимание основ физиологии даёт возможность регулировать жизнедеятельность микроорганизмов в среде обитания, ориентироваться во взаимоотношениях, возникающих при совместном обитании с другими организмами, влиять на микробиологические процессы при переработке и хранении продуктов, т. е. открывает пути для борьбы с микрофлорой, когда это необходимо, и возможности использования ее в хозяйственных целях.

Питательное вещество, попав внутрь клетки микроорганизма, участвует во множестве химических реакций. Эти реакции, а также прочие химические проявления жизнедеятельности микроорганизмов носят общее название обмена веществ, или *метаболизма*. Обмен веществ состоит из двух групп жизненно важных процессов – анаболизма и катаболизма.

**Анаболизм** (конструктивный обмен) – объединяет процессы синтеза макромолекул (нукleinовых кислот, белков, полисахаридов и т. д.) из более простых соединений. Процессы синтеза связаны с потреблением свободной энергии, которая вырабатывается в результате дыхания или брожения и поставляется в форме аденоэозинтрифосфата (АТФ).

**Катаболизм** (энергетический обмен) – это процесс распада белков, жи-

ров, углеводов в основном за счёт реакций окисления. У микроорганизмов различают две основные формы катаболизма – дыхание и брожение. При дыхании происходит полное разрушение органических веществ с выходом большого количества энергии и образованием бедных энергией конечных продуктов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ). При брожении осуществляется неполный распад органических веществ с высвобождением незначительного количества энергии и накоплением богатых энергией конечных продуктов (этанового спирта, молочной, масляной и др. кислот). Высвобождающаяся при катаболизме органических веществ свободная энергия аккумулируется в форме энергии фосфатных связей АТФ.

Катаболизм и анаболизм протекают одновременно, многие реакции и промежуточные продукты являются для них общими. Конечные продукты обмена веществ (*метаболиты*) выделяются во внешнюю среду.

Большое разнообразие обменных процессов в микроорганизмах вызвано их различными потребностями в питательных веществах для синтеза веществ, из которых строятся их тела, различными способами добывания энергии и, кроме того, необычайной интенсивностью обмена веществ. За сутки при благоприятных условиях одна микробная клетка потребляет пищи в 30–40 раз больше своей массы. Основная часть пищи расходуется при катаболизме с выделением в окружающую среду большого количества продуктов обмена: спиртов, кислот, углекислого газа, водорода и др. Эта особенность микроорганизмов широко используется в практике переработки растительного и животного пищевого и непищевого сырья, а также обуславливает быструю порчу пищевых продуктов.

### 3.2.1 Питание микроорганизмов

Микроорганизмы, как и все другие живые существа, нуждаются в пище, которая поступает в клетки из внешней среды. Для роста микроорганизмов необходима вода. Питательные вещества – это растворенные в воде соединения, из которых микроорганизмы строят свои клетки и получают энергию. Требования, предъявляемые различными микроорганизмами в отношении состава питательной среды и прочих условий, весьма разнообразны.

**Потребность в химических элементах.** По количественному вкладу в построение клетки различают макро- и микроэлементы. К макроэлементам относят углерод, кислород, водород, азот, серу, фосфор, кальций, калий, магний, железо. К микроэлементам относят марганец, медь, кобальт, цинк, молибден, никель, ванадий, бор, селен, хлор, натрий, селен, кремний и др. Большинство из этих микроэлементов находятся в следовых количествах в качестве примесей в солях макроэлементов.

**Источники углерода и энергии.** В зависимости от источника углерода для конструктивного метаболизма все прокариоты делятся на две группы: *автотрофы*, к которым принадлежат организмы, способные синтезировать

все компоненты клетки из углекислого газа, и *гетеротрофы*, источником углерода для конструктивного метаболизма которых служат органические соединения.

Наибольшая степень гетеротрофности присуща прокариотам, относящимся к *облигатным внутриклеточным паразитам*, т. е. организмам, которые могут жить только внутри других живых клеток. Паразитический образ жизни привел к редукции некоторых метаболических путей у этих прокариот, что и обусловило полную их зависимость от метаболизма клетки хозяина. Другие паразитические прокариотные организмы (*факультативные паразиты*) удается выращивать на искусственных средах сложного состава.

*Сапротрофы* – гетеротрофные организмы, использующие для питания органические соединения мёртвых тел или выделения (экскременты) животных. К сапротрофам относятся бактерии, актиномицеты, грибы, высшие растения, в том числе паразитические цветковые и некоторые водоросли.

Особую группу гетеротрофных прокариот, обитающих в водоемах, составляют олиготрофные бактерии, способные расти в среде при низких концентрациях органических веществ. Организмы, предпочитающие высокие концентрации питательных веществ, относят к *копиотрофам*.

Различия между гетеротрофными прокариотами с высокими потребностями в готовых органических соединениях и теми, потребности которых минимальны и сводятся к одному какому-нибудь источнику углерода, заключаются, таким образом, в степени развития их биосинтетических способностей. Крайняя степень развития биосинтетических способностей – способность строить все клеточные компоненты из углекислого газа – присуща группе автотрофных прокариот.

Таким образом, в мире прокариот не существует резкой границы между авто- и гетеротрофными организмами, так как нет ее в ряду «одноуглеродных» соединений ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HCOOH}$ ,  $\text{HCHO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_4$ ), каждое из которых может служить источником углерода для определенной группы прокариот.

Помимо элементов минерального питания и источников углерода и энергии многие организмы нуждаются еще в некоторых дополнительных веществах, называемых *факторами роста*. Эти вещества входят в основной состав клетки, но некоторые организмы не способны их синтезировать. Факторы роста относят к трём группам соединений – к аминокислотам, пуринам и пиримидинам, а также к витаминам. Организмы, нуждающиеся в факторах роста, называют *ауксотрофными*.

**Сера и азот.** Эти элементы содержатся в клетках в виде сульфидильных групп или аминогрупп. Большинство микроорганизмов способны поглощать эти элементы в окисленной форме – в виде сульфата и нитрата, которые они могут восстанавливать. Наиболее обычный источник азота для микроорганизмов – соли аммония.

**Кислород** входит в состав воды и вместе с ней поступает в клетку. Кроме того, он содержится в углекислом газе и многих органических соединениях. Многим организмам помимо этого необходим молекулярный кислород. Он служит конечным акцептором электронов при аэробном дыхании.

По отношению к молекулярному кислороду можно выделить, по меньшей мере, три группы организмов. *Облигатные аэробы* способны получать энергию только путём дыхания и поэтому нуждаются в молекулярном кислороде  $O_2$ . *Облигатные анаэробы* могут расти только в среде, лишённой кислорода, он для них токсичен. *Факультативные анаэробы* растут как в присутствии, так и в отсутствии  $O_2$ .

**Типы питания.** Термины «гетеротрофный» и «автотрофный», введённые для определения типов питания животных и растений, недостаточны для того, чтобы охарактеризовать многообразие способов питания микроорганизмов. Поэтому для микроорганизмов были предложены новые термины, указывающие на источник энергии, доноров водорода (электронов) и источник углерода.

**Источники энергии.** В зависимости от механизма преобразования энергии в доступную для клетки биохимическую форму различают два главных типа метаболизма – фототрофный и хемотрофный. Организмы, способные использовать электромагнитное излучение (свет) в качестве источника энергии для роста, называются **фототрофными** (фотосинтезирующими). К фототрофным организмам относятся представители двух больших групп: анаэробные фототрофные бактерии, не выделяющие молекулярного кислорода, и аэробные фототрофные цианобактерии, водоросли и зелёные растения, которые на свету выделяют кислород. В отличие от этого **хемотрофными** (хемосинтезирующими) называют организмы, получающие энергию в результате окислительно-восстановительных реакций с участием субстратов, которые служат для них источником питания.

**Доноры водорода и источники углерода.** Все организмы, использующие в качестве доноров водорода органические соединения, называют **органотрофными**. Их противопоставляют **литотрофным** организмам, способным использовать неорганические доноры электронов (молекулярный водород, аммиак, сероводород, сера, оксид углерода (II) и др.).

**Поступление питательных веществ** в клетку микроорганизма из окружающей среды, а также выход продуктов обмена происходят через клеточную стенку, капсулу и слизистые слои. Капсула и слизистые представляют достаточно рыхлые образования и не оказывают значительного влияния на транспорт веществ, тогда как цитоплазматическая мембрана может служить барьером для поступления питательных соединений в клетку.

Активная роль в процессе поступления в клетку питательных веществ принадлежит цитоплазматической мембране, которая обладает полупроницаемостью и является осмотическим барьером, неодинаковым для различных веществ.

Процесс обмена между микробной клеткой и внешней средой протекает очень быстро и интенсивно. В основе механизма проникновения питательных веществ через клеточную оболочку лежат физико-химические явления: диффузия и обменная адсорбция, протекающие одновременно. В зависимости от температуры, концентрации, химической природы питательных веществ и некоторых других факторов, одно из этих явлений может преобладать.

**Диффузионный механизм** проникновения питательных веществ в клетку можно представить следующим образом. Вследствие того, что частицы вещества в объеме раствора стремятся выравнять свою концентрацию, возникает диффузный поток питательных веществ внутрь микробной клетки. Его интенсивность поддерживается тем, что внутри клетки полезные вещества быстро усваиваются. Благодаря этому, концентрация нужных для клетки веществ в поверхностном слое цитоплазмы все время оказывается низкой, что обуславливает их непрерывную диффузию из окружающей среды. Бесполезные или вредные для микроорганизма вещества химически не преобразуются клеткой. Поэтому концентрация их как внутри, так и снаружи клетки быстро выравнивается. В результате устанавливается подвижное диффузное равновесие, и поступление вредных веществ в клетку прекращается.

Диффузия может быть:

– *пассивной*, когда транспортирование вещества осуществляется по градиенту концентраций и диффузия идет с малой скоростью без затраты энергии;

– *облегченной*, которая осуществляется так же, как и пассивная, с тем отличием, что молекулы питательных веществ соединяются с молекулами-переносчиками снаружи мембранны, и образовавшийся комплекс дифундирует через мембрану внутрь клетки. Там он диссоциирует, и освобожденное вещество остается внутри клетки. Переносчик дифундирует наружу, где может присоединить другую молекулу вещества. Переносчиками являются связанные с цитоплазматической мембраной белки *пермеазы*. Облегченная диффузия не требует расхода энергии, если наружная концентрация веществ выше внутренней;

– *активной*, при которой растворенные вещества поступают в клетку против градиента концентрации. Считают, что большинство веществ проникает в клетку микроорганизма в результате активного переноса. Подобный транспорт веществ нуждается в энергии (АТФ), получаемой в результате дыхания или брожения. При отсутствии источников энергии накопление веществ внутри цитоплазмы не происходит.

Высокое осмотическое давление в клетках обусловливает способность микроорганизмов развиваться в сравнительно сухих средах. Так, плесневые грибы могут поражать товары и материалы, имеющие влажность 15 % и ниже. Если клетка оказывается в среде, где концентрация растворенных веществ выше, чем внутри клетки, происходит ее обезвоживание и цитоплазма сжимается. Такое состояние называется *плазмолизом*. Длительное нахождение микробной клетки

в таком состоянии делает ее нежизнеспособной и вызывает гибель. Если концентрация растворенных веществ снаружи ниже, чем в клетке, в последнюю проникает много воды. Это приводит к состоянию *плазмоптиса* (переполненности), в котором оболочка клетки может даже разорваться.

### 3.2.2 Дыхание микроорганизмов

**Дыхание микроорганизмов** – окислительно-восстановительный процесс, идущий с образованием АТФ. Роль доноров водорода (электронов) в нем играют органические или неорганические соединения, акцепторами водорода (электронов) в большинстве случаев служат неорганические соединения. Если конечный акцептор электронов – молекулярный кислород, процесс называют *аэробным дыханием*. У некоторых микроорганизмов конечным акцептором электронов служат иные соединения – нитраты, сульфаты, карбонаты и др. В таком случае говорят об *анаэробном дыхании*.

**Аэробное дыхание** присуще многим микроорганизмам. Однако есть как строгие аэробы, так и факультативные анаэробы, способные расти и в присутствии и при отсутствии кислорода. У факультативных анаэробов возможен синтез АТФ при брожении, а в присутствии молекулярного кислорода процесс осуществляется путем дыхания. К факультативным анаэробам относят такие микроорганизмы, у которых анаэробное дыхание происходит с помощью нитратов как акцепторов электронов. Микроорганизмы, у которых акцепторами электронов служат сульфаты и карбонаты, – строгие анаэробы. Микроорганизмы могут использовать в дыхательном процессе любые природные органические соединения, однако степень их окисления должна быть меньше, чем степень окисления  $\text{CO}_2$ .

Аэробное дыхание состоит из двух фаз. Первая фаза включает серию реакций, благодаря которым органический субстрат окисляется до  $\text{CO}_2$ , а освобождающиеся атомы водорода перемещаются к акцепторам. В этой фазе совершается цикл реакций, известный под названием *цикла Кребса*, или цикла трикарбоновых кислот. Он открыт в 1930-е годы английским биохимиком, лауреатом Нобелевской премии *X. Кребсом*. Обе фазы совместно ведут к окислению субстрата до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  и образованию биологически полезной энергии в виде АТФ и других соединений.

У некоторых микроорганизмов, усваивающих простые источники углерода, например, уксусную кислоту, имеется специфический цикл трансформации трикарбоновых кислот, известный под названием *глиоксалатного цикла* (открыт американским биохимиком, лауреатом Нобелевской премии *A. Корнбергом* и *X. Кребсом* в 1957 г.).

**Анаэробное дыхание** – биохимический процесс окисления органических субстратов или молекулярного водорода с использованием в дыхательной цепи в качестве конечного акцептора электронов, вместо  $\text{O}_2$ , других окислителей неорганической или органической природы. Как и в случае

аэробного дыхания, выделяющаяся в ходе реакции свободная энергия запасается в виде трансмембранных протонного потенциала, использующегося АТФ-синтазой для синтеза АТФ.

В анаэробных условиях дыхание осуществляется прокариотами. При этом факультативные анаэробы используют акцепторы электронов с высоким окислительно-восстановительным потенциалом ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , фумарат, диметилсульфооксид и т. д.), у которых это дыхание конкурирует с энергетически более выгодным аэробным и подавляется кислородом. Акцепторы с низким окислительно-восстановительным потенциалом (сера,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$ ) применяются только строгими анаэробами, гибнущими при появлении в окружающей среде кислорода.

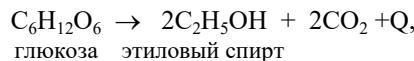
Механизмы окисления органических субстратов при анаэробном дыхании аналогичны механизмам окисления при аэробном дыхании. Исключением является использование в качестве исходного субстрата ароматических соединений. Обычные пути их катаболизма требуют молекулярного кислорода уже на первых стадиях, в анаэробных условиях осуществляются иные процессы, например, восстановительная деароматизация бензоил-КоА у *Thauera aromatic* с затратой энергии АТФ.

### 3.2.3 Брожение

**Брожение** – ферментативное расщепление органических веществ, преимущественно углеводов. Может осуществляться в организме животных, растений и микроорганизмов без участия или с участием  $O_2$  (соответственно, анаэробное или аэробное брожение).

В результате окислительно-восстановительных реакций при брожении освобождается энергия (в виде АТФ) и образуются соединения, необходимые для жизнедеятельности организма. Некоторые бактерии, микроскопические грибы и простейшие растут, используя только ту энергию, которая освобождается при брожении.

Спиртовое брожение осуществляется обычно с помощью дрожжей рода *Saccharomyces* и бактерий рода *Zymomonas* по схеме



где  $Q$  – выделение энергии.

Молочнокислое брожение – процесс получения энергии молочнокислыми бактериями родов *Lactobacillus* и *Streptococcus*. Глюкоза в этом процессе превращается в две молекулы молочной кислоты:



*Маслянокислое брожение* вызывается облигатно анаэробными маслянокислыми бактериями. Глюкоза при этом превращается в масляную кислоту, углекислый газ и водород:



Некоторые продукты обмена находят широкое применение в хозяйственной практике. Так, молочная и уксусная кислоты, спирт, углекислый газ и другие вещества применяются для защиты пищевых продуктов от микробиальной порчи.

### 3.2.4 Фотосинтез

Некоторым группам микроорганизмов (цианобактерии, гелиобактерии, пурпурные и зеленые бактерии) свойствен **фотосинтез** – способ образования АТФ, при котором источником энергии служит свет. Все известные в настоящее время фотосинтезирующие организмы используют в процессе фотосинтеза видимый и инфракрасный свет.

Фотосинтезирующие бактерии содержат магний-порфириновые пигменты – хлорофиллы (известно более десяти видов хлорофиллов).

Все фотосинтетические пигменты относятся к двум химическим классам соединений: 1) хлорофиллы и фикобилипротеины, 2) пигменты, основу которых составляют длинные полиизопреноидные цепи (каротиноиды).

У растений, водорослей и цианобактерий донором электронов при фотосинтезе бывает молекула воды, кислород, которой выделяется в окружающую среду. Такой фотосинтез называют *кислородным*, или *оксигенным*.

В отличие от них пурпурные и зеленые фотосинтезирующие бактерии не способны использовать воду как донор электронов, их фотосинтез никогда не протекает с образованием кислорода. Донорами электронов у таких бактерий служат  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$  или органические соединения, а данный вид фотосинтеза называют *бескислородным*, или *аноксигенным*.

Главный акцептор электронов большинства фотосинтезирующих организмов –  $\text{CO}_2$ , однако они часто могут восстанавливать нитрат [64], азот, ионы водорода. Процесс фотосинтеза идет в две стадии. Во время первой – под действием света происходит восстановление НАДФ (никотинамидаденидинуклеотидфосфат – кофермент) и фосфорилирование АДФ, на второй – энергия НАДФ·Н и АТФ используется для восстановления  $\text{CO}_2$  до гексозы. Ассимиляция  $\text{CO}_2$  высшими, низшими фотосинтезирующими организмами осуществляется через так называемый пентозофосфатный восстановительный цикл, или цикл Кальвина.

У фотосинтезирующих организмов АТФ образуется при переносе электрона, отданного молекулой хлорофилла (или бактериохлорофилла), при

поглощении энергии света фотосинтетической пигментной системой. Процесс называется фотофосфорилированием.

### 3.2.5 Рост и размножение микроорганизмов

Под ростом понимают необратимое увеличение количества живого вещества, обычно связанное с увеличением и делением клеток. У многоклеточных организмов увеличиваются размеры тела, у одноклеточных растет число клеток. Однако и у одноклеточных следует отличать увеличение числа клеток от увеличения клеточной массы.

**Рост** – увеличение размеров и упорядоченное воспроизведение всех химических компонентов и структур отдельной особи.

**Размножение** – процесс воспроизведения себе подобных особей, обеспечивающий продолжение существования вида и приводящий к увеличению количества бактериальных клеток в популяции.

Прокариоты обычно размножаются бесполым путём – бинарным делением, реже путём почкования. Образовавшиеся клетки содержат всю генетическую информацию, необходимую для жизнедеятельности микроорганизма. Её носителем является суперспирализованная и плотно уложенная молекула самореплицирующейся ДНК, известная под названием *репликона*. К репликонам относят также *плазмиды* – генетические структуры, способные к самостоятельной репликации (удвоению молекул ДНК). Вновь синтезированные молекулы ДНК «расходятся» в образующиеся дочерние клетки. Это позволяет дочерней клетке иметь совершенно тождественную материнской молекулу ДНК. Во время репликации ДНК и образования делящейся перегородки клетка микроорганизма непрерывно растёт. На последней стадии дочерние клетки отделяются друг от друга. У некоторых видов бактерий процесс идёт не до конца, в результате чего образуются цепочки клеток. Чаще всего клетка делится на две равные части (*изоморфное деление*), однако, встречается и неравномерное (*гетероморфное*) деление, когда дочерняя клетка больше материнской.

Спирохеты, риккетсии, а также некоторые дрожжи и мицелиальные грибы, простейшие и другие организмы размножаются поперечным делением клеток. Миксобактерии (*роды* *Myxococcus*, *Archangium*, *Sorangium*) делятся *перетяжкой*.

*Почекование*, т. е. тип бесполого размножения, при котором дочерние особи формируются из выростов тела материнского организма (почек), представляет разновидность бинарного деления и у ряда бактерий почти не отличается от деления.

**Цикл развития культуры бактерий**, культивируемых на жидкой среде, состоит из фаз, скорость которых неодинакова во времени. Внесенные в питательную среду микроорганизмы сначала не развиваются – «привыкают» к условиям среды (фаза 1). Затем начинается размножение с все возрастающей

скоростью, достигающей максимальной, на которую данный вид способен в данной среде (фаза 2). По мере исчерпания запаса питательных веществ и накопления продуктов обмена рост замедляется, а затем прекращается полностью (рисунок 3.25).



Рисунок 3.25 – Фазы роста периодической культуры

Первая фаза – *лаг-фаза, или задержки роста*, начинается после внесения микроорганизмов в питательную среду и продолжается 1–2 ч. Количество бактерий в это время не увеличивается и клетки не растут.

Вторая фаза – *логарифмическая*, характеризуется постоянной максимальной скоростью деления клеток. Эта скорость во второй фазы зависит от вида бактерий, а также от среды. Энтеробактерии делятся через каждые 15–30 мин. *Escherichiacoli* при 37 °C – примерно каждые 20 мин.

Третья фаза – *стационарная*, наступает тогда, когда число клеток перестаёт увеличиваться. Скорость зависит от концентрации субстрата – при уменьшении этой концентрации, ещё до полного использования субстрата, она начинает снижаться. Поэтому переход от экспоненциальной фазы к стационарной происходит постепенно. Скорость роста может снижаться не только из-за нехватки субстрата, но также из-за большой плотности бактериальной популяции, из-за низкого парциального давления  $O_2$  или накопления токсичных продуктов обмена.

Фаза *отмирания* и причины гибели бактериальных клеток в нормальных питательных средах изучена недостаточно. Сравнительно легко понять случаи, когда в среде накапливаются кислоты (при росте *Escherichia*, *Lactobacillus*). Число живых клеток может снижаться экспоненциально. Иногда клетки лизируются (разрушаются) под действием собственных ферментов (автолиз).

При культивировании в замкнутом резервуаре (при однократном внесении субстратов) микроорганизмы все время находятся в меняющихся условиях (*не-*

*проточная культура* микроорганизмов). Первое время они имеют в избытке все питательные вещества, затем постепенно начинают проявляться недостаток питания и отравление продуктами обмена. Это приводит к снижению скорости роста, в результате чего культура переходит в стационарную фазу.

Если добавлять в среду питательные вещества и одновременно удалять продукты обмена, то микроорганизмы могли бы пребывать в течение неопределённого времени в экспоненциальной фазе роста. Такой способложен в основу *проточного культивирования* микроорганизмов, осуществляемого в специальных ферmentерах (хемостатах и турбиостатах), которые обеспечивают непрерывную подачу среды с регулируемой скоростью и хорошее её перемешивание. Проточное культивирование микроорганизмов поддаётся автоматическому регулированию, является перспективным и внедряется в практику.

### 3.3 Основы экологической микробиологии

Слово «экология» образовано от греч. *Oikos*, означает дом или жилище, *logos* – учение. Экологическая микробиология изучает взаимоотношения микроорганизмов между собой и внешней средой, которые обусловливают их размножение, развитие и выживание. Под экологической системой при этом понимают совместное функционирование различных микробных сообществ (биоценозов), т. е. биотического сообщества, включающего все популяции, занимающие изучаемую площадь, и неживую окружающую природу (биотоп).

Основной единицей в экологии является экосистема. В нее входят биотические и абиотические компоненты. Биотические компоненты составляют сообщество организмов – **биоценоз**. Под абиотическими компонентами следует понимать физические и химические условия экосистемы, в которой живут организмы. Размеры таких систем разнообразны. Это может быть пруд, озеро или корневая система. Возможны и малые экосистемы (ротовая полость человека, кишечник).

В пределах экосистемы для каждого вида можно описать его местообитание. Это тот участок или жизненное пространство, в котором обычно живёт данный организм (индивидуум или популяция). Однако может быть и несколько таких мест, каждое в отдельной экосистеме. Например, бактерии рода *Rhizobium* растут как в почве, так и в растениях.

В нормальных условиях в почве или в воде (обилие питательных веществ и высокое содержание воды) развивается большое число видов. Чем больше условия в экосистеме отклоняются от нормальных, тем экстремальнее будут химические и физические характеристики среды, тем меньше разнообразие видов данной экосистемы, и выше численность видов, относящихся к одному и тому же виду. В экстремальных экосистемах преобла-

дают те организмы, которые полностью приспособились и не растут, если соответствующий экстремальный фактор проявляется в меньшей степени. Это относится к крайне термофильным, психрофильным, галофильным и другим микроорганизмам.

Все экосистемы рассмотреть невозможно, поэтому ограничимся несколькими. В эту выборку надо включить почву как предмет наземной экосистемы, и океаны, и моря как пример водных систем.

Изучение плодородного слоя почвы очень интересно, но из-за наличия большого разнообразия организмов в очень малом пространстве экосистемы, затруднительно. Поэтому сосредоточим внимание на водных системах, потому что большая часть микробиологических превращений происходит в водной среде. Типичными водными экосистемами являются океаны, моря, озера, пруды и проточные водоёмы.

Между разными микроорганизмами существуют взаимоотношения различного типа.

**Симбиоз** – форма тесного сожительства организмов разных видов. Обычно это приносит им взаимную пользу, они совместно развиваются лучше, чем каждый из них в отдельности. Иногда приспособленность организмов друг к другу становится столь глубокой, что они утрачивают способность существовать порознь (сожительство гриба и сине-зеленої водоросли, азотфиксацирующих микробов и целлюлозоразрушающих бактерий, симбиоз клубеньковых бактерий с бобовыми растениями, различных грибов с корнями растений и т. д.).

В относительной пользе, извлекаемой партнёрами при симбиозе, можно выделить несколько вариантов:

1) сожительство создаёт благоприятные моменты для обоих партнёров (взаимовыгодный симбиоз – мутуализм);

2) один из партнёров по симбиозу испытывает вредное воздействие другого (паразитизм);

3) во многих случаях партнёры могут не оказывать никакого влияния друг на друга (нейтрализм).

Если из симбиоза извлекает выгоду только один партнёр, не принося вреда другому, то говорят о комменсализме.

**Метабиоз** – взаимоотношение между микроорганизмами, при котором продукты жизнедеятельности одного вида служат источником питания для другого. Примером метабиоза является *процесс нитрификации*, т. е. процесс окисления азота аммонийных солей в соли азотистой и азотной кислот по схеме:



Окисление азота аммонийных солей протекает в две фазы, двумя видами бактерий. Нитритные бактерии, окисляя азот аммонийных солей, накапли-

вают в среде нитриты, которые являются исходным материалом для развития нитратных бактерий.

**Синергизм** характеризуется усилением физиологических функций у членов микробной ассоциации (дрожжи и молочнокислые бактерии). Одной из форм симбиоза является *вирогенез* – совместное сосуществование некоторых бактерий, дрожжей и простейших с вирусами.

**Антагонизм** – противоречие во взаимоотношениях микроорганизмов, характеризующееся борьбой за кислород, пищевые вещества и место обитания. Очень часто микробы-антагонисты выделяют в результате обмена веществ специфические вещества, которые, накапливаясь в окружающей среде, подавляют развитие и размножение других микроорганизмов, а иногда и убивают их. Некоторые химические соединения, выделяемые микроскопическими грибами и бактериями, получили название *антибиотиков*.

Антагонизм микробов играет большую роль в медицине, а также в производственной практике человека.

В обезвреживании внешней среды от патогенных микроорганизмов посредством антагонизма большую роль играют *фаги*, живущие в почве и воде, и *фитонциды* – биологически активные летучие вещества многих растений.

Антагонистические или конкурентные взаимоотношения микробов лежат в основе инфекции. Антагонизм бывает *явный*, когда антагонист выделяет антибиотические вещества постоянно, независимо от того, есть конкурент или нет; *вынужденный* – антибиотические вещества выделяются только в присутствии конкурента; *насильственный* – когда микробы не являются антагонистами, но при культивировании на «голодных» средах микроб с большей ферментативной активностью использует другой как продукт питания. Насильственный антагонизм основан на том, что при недостатке в среде питательных веществ бактерии, образующие протеолитические ферменты, используют в качестве пищи клетки других бактерий. Эта форма антагонизма установлена учеником И. И. Мечникова Н. Н. Шиллером (1914). Он наблюдал гибель стрептококка в совместной культуре с ацидофильной палочкой, которая при недостатке углеводов в среде выделяла в присутствии стрептококка активные протеолитические ферменты, разрушающие его.

Значительный удельный вес среди антагонистов составляют плесневые грибы – пенициллы (25 %), аспергиллы (40 %). Они обладают антагонистическими свойствами в отношении многих групп организмов: бактерий, актиномицетов, дрожжевых и дрожжеподобных грибов.

### **3.3.1 Микроорганизмы и окружающая среда**

Жизнедеятельность микроорганизмов находится в зависимости от факторов окружающей среды, которые могут оказывать бактерицидное, т. е. уничтожающее, действие на клетки или бактериостатическое – подавляющее их размножение. Различные воздействия на микроорганизмы оказыва-

ют физические, химические и биологические факторы окружающей среды.

**Влияние физических факторов.** По отношению к температуре микроорганизмы подразделяются на бактерии, растущие при низкой температуре (от  $-10$  до  $+20$  °C) – *психрофилы*, при средней (30–45 °C) – *мезофилы*, при высокой (45–90 °C) – *термофилы*.

К психрофильным (облигатным) микроорганизмам относят группу сaproфитов – обитателей почвы, морей, пресных водоемов, сточных вод, горных ледников. Некоторые из них вызывают порчу продуктов питания на холода. Способностью расти при низких температурах обладают некоторые патогенные бактерии (возбудитель псевдотуберкулеза размножается при  $T = 4$  °C). В зависимости от температуры культивирования свойства психрофилов меняются нестандартно. Так, *Serratiamarcescens* образуют при температуре 20–25 °C красный пигмент (продигиозана), а при температуре 37 °C – нет. Синтез полисахаридов, в том числе капсульных, активируется при более низких температурах культивирования. Интервал температур, при котором возможен рост психрофильных бактерий, колеблется от минус 10 до 20 °C, а температурный оптимум – от 15 до 20 °C, приближаясь к температурному оптимуму мезофильных бактерий.

Мезофилы образуют основную группу патогенных и условно-патогенных бактерий. Они активно растут в диапазоне температур 30–45 °C. Для бактерий, патогенных для человека и теплокровных животных, температурный оптимум составляет около 37 °C.

Термофилы развиваются при более высоких (от 40 до 90 °C) температурах. Они обитают в горячих источниках, участвуют в процессах самонагревания навоза, зерна, широко используются в биотехнологической промышленности для получения витаминов, ферментов, молочной кислоты, кормового белка и других веществ.

Микроорганизмы по-разному относятся к предельным (низким и высоким) температурам. Если температуру жидкого азота ( $-190$  °C) или жидкого водорода ( $-252$  °C) клетки микроорганизмов переносят, сохранив после размораживания способность к росту, то под влиянием высоких температур они довольно быстро погибают. Высокие температуры (60 °C и выше) вызывают разрушение цитоплазматической и других мембранных структур, повреждение нуклеиновых кислот, коагуляцию белков и др.

Температурный фактор учитывают при проведении стерилизации. Нагревание до температуры выше 100–120 °C используют для полного уничтожения вегетативных форм микроорганизмов и спор. В производстве применяют следующие физические методы регулирования жизнедеятельности микроорганизмов.

**Высушивание**, т. е. обезвоживание, вызывает нарушение функций большинства микроорганизмов. Наиболее чувствительны к высушиванию пато-

генные микроорганизмы – возбудители гонореи, менингита, холеры, брюшного тифа, дизентерии и др. Более устойчивыми являются микроорганизмы, защищенные слизью мокроты. Так, бактерии туберкулеза в мокроте выдерживают высушивание до 90 дней. Устойчивы к высушиванию некоторые капсул- и слизеобразующие бактерии. Особой устойчивостью обладают споры бактерий.

Высушивание под вакуумом из замороженного состояния – *лиофилизацию* – используют для продления жизнеспособности, консервирования микроорганизмов. Лиофилизированные культуры микроорганизмов и иммунобиологические препараты длительно (в течение нескольких лет) сохраняются, не изменяя своих первоначальных свойств.

**Лучистая энергия** – энергия, распространяющаяся в пространстве в виде электромагнитных волн. Свет – необходимый фактор для роста фотосинтезирующих зелёных и пурпурных бактерий, которые имеют пигменты, обеспечивающие возможность поглощать энергию света и превращать её в химическую.

Энергия излучения переносится порциями (*квантами*). Количество энергии зависит от длины волны: большая длина волны даёт немного энергии. Кванты инфракрасного света, имеющего длину волны более 1200 нм, содержат столь незначительное количество энергии, что не способны вызывать химические изменения в поглощающей материи, и их энергия превращается в тепло. Этим объясняется хорошо известный тепловой эффект инфракрасных ламп. Энергия радиации с длиной волны от 1200 до 200 нм (ультрафиолетовые (УФ) лучи) достаточна для того, чтобы произвести фотохимические изменения в поглощающих молекулах или атомах. При длине волны 200 нм и менее (рентгеновские лучи,  $\alpha$ -частицы, космические лучи) энергия квантов столь высока, что молекулы ионизируются. Этот вид радиации относят к ионизирующей.

Клетки организмов содержат многие виды молекул, химическая структура которых позволяет поглощать лучистую энергию. Такие молекулы могут подвергаться фотохимическим реакциям. Нуклеиновые кислоты и белки обладают структурами, допускающими очень сильное поглощение УФ *света*. Ближнее УФ-излучение с длиной волны 400–320 нм даже при не очень высоких дозах оказывает на бактерии определённое негативное воздействие – замедляет скорость роста, угнетает индукцию ферментов и др. Среднее УФ-излучение с длинами волн 320–290 нм и дальнее с длинами волн 290–200 нм оказывают на микроорганизмы сходное действие.

**Видимое излучение** оказывает некоторое отрицательное воздействие на микроорганизмы, особенно лишённые пигмента.

Эффекты, вызываемые облучением живых организмов, зависят от его дозы, т. е. от энергии и количества поглощенных квантов. В организмах излучение в диапазоне длин волн от 300 до 1100 нм, приходящееся в ос-

новном на видимый свет, индуцирует такие процессы, как фотосинтез, фототаксис, фотореактивацию ДНК, синтез некоторых макромолекул. Для излучений с длиной волны больше 1100 нм к настоящему времени не зарегистрировано каких-либо биологических эффектов. Основное действие ИК-излучения – ускорение движения молекул (нагревание). Действие коротковолнового излучения на организмы приводит к возникновению мутаций или вызывает смертельный исход.

**Рентгеновские и гамма-лучи** – радиоактивные излучения. Их губительное действие обусловлено многими факторами. Они вызывают радиолиз воды в клетках, образуя свободные радикалы, атомарный водород, перекиси. Эти вещества обладают высокой химической активностью, в результате чего возникает большое количество химических реакций, не свойственных нормально живущей клетке. В результате наступают необратимые нарушения обмена веществ, разрушаются ферменты, изменяются внутриклеточные структуры. Малые дозы стимулируют рост микробов. Микроорганизмы более устойчивы к радиоактивному излучению, чем высшие организмы. Их обнаруживают в воде атомных реакторов, залежах урановых руд (тионовые бактерии).

**Ультразвук** – не слышимые ухом человека упругие волны, частота которых превышает 20 кГц. Механизм бактерицидного действия ультразвука заключается в том, что в цитоплазме бактерий образуется кавитационная полость, которая заполняется парами жидкости под давлением до 10 000 атм, что приводит к дезинтеграции цитоплазматических структур.

**Влияние химических факторов.** Каждый микроорганизм может жить лишь при определенной химической реакции среды. Для патогенных микробов, паразитирующих на животных, благоприятна среда с pH = 7,2...7,4. Грибы и дрожжи лучше растут в кислой среде при pH = 4...6. Актиномицеты в целом предпочитают слабощелочные среды.

Химические соединения, воздействуя на микроорганизмы, могут вызывать три эффекта: стимулирующий, бактериостатический и бактерицидный. *Стимулирующий эффект* наблюдается в тех случаях, когда соединение служит питательным субстратом для микроорганизма. Потребление его стимулирует рост и размножение. Вещество, которое подавляет рост, а после его удаления рост микроорганизма возобновляется, оказывает *бактериостатическое* (задерживающее) или в более широком плане – *микробиостатическое* (от греч. stasis – остановить) действие. *Бактерицидным* является действие вещества, убивающее бактерии.

Вредные для микроорганизмов химические соединения делят на несколько групп:

– поверхностно-активные вещества (ПАВ) – жирные кислоты, мыла, детергенты, вызывающие повреждение клеточной стенки;

– фенол, крезол и их производные, повреждающие клеточную стенку и действующие на белки цитоплазмы;

- акридины (вещества типа дибензопиридина), обладающие сродством с нуклеиновыми кислотами и нарушающие процессы клеточного деления;
- формальдегид (40%-й раствор формалина), вызывающий денатурацию белков;
- соли тяжелых металлов, приводящие к коагуляции белков, а поэтому обусловливающие гибель микроорганизмов.

Наибольшей известностью из веществ, полученных путем химического синтеза, пользуются *сульфамидные препараты*, применяемые в химиотерапии для уничтожения патогенных бактерий. По структуре формулы сульфамидов сходны с клеточным метаболитом парааминобензойной кислоты, которая входит в состав фолиевой кислоты.

Эффект от действия ядовитого вещества – бактерицидный или бактериостатический – зависит от его концентрации, т. е. его токсичность определяется дозой, а также условиями определения.

Из совокупности antimикробных химических соединений выделяются две группы веществ – антибиотики и антисептики.

**Антисептики** – вещества, обладающие противомикробным действием и применяемые главным образом для дезинфекции [65]. Их эффективность зависит от дозы, pH среды и температуры. В очень малых дозах антисептики могут стимулировать размножение или биохимическую активность микробов. С повышением концентрации они подавляют развитие микробов, приводя к отмиранию. Чувствительность различных микробов к одному и тому же антисептику неодинакова.

Применение антисептиков для консервирования пищевых продуктов ограничено. Доза антисептика должна быть достаточной, чтобы обеспечить надлежащее консервирующее действие, но безвредной для человека и не влиять отрицательно на качество продукта.

**Антибиотики** – вещества природного или полусинтетического происхождения, подавляющие рост живых клеток, чаще всего прокариотических или простейших. Антибиотики природного происхождения чаще всего производятся актиномицетами, реже – немицелиальными бактериями, обладают высокой физиологической активностью по отношению к бактериям, грибам, вирусам и клеткам опухолей.

Особенностью антибиотиков является избирательность действия: каждый из них активен только по отношению к определенной группе микроорганизмов и ингибирует строго определенные биохимические функции. Например, пенициллин действует только на растущие клетки грамположительных бактерий, в то время как грамотрицательные к нему менее чувствительны. В этом состоит одно из существенных отличий антибиотиков от общебиологических ядов – мышьяка, фенола, которые подавляют жизнедеятельность любого организма, вступившего с ними в контакт.

Огромное разнообразие антибиотиков и видов их воздействия на орга-

низм человека явилось причиной классификации и разделения антибиотиков на группы. По характеру воздействия на бактериальную клетку антибиотики можно разделить на три группы:

- **бактериостатические** (бактерии живы, но не в состоянии размножаться);
- **бактерицидные** (бактерии погибают, но физически продолжают присутствовать в среде);
- **бактериолитические** (бактерии погибают, и бактериальные клеточные стенки разрушаются).

Микроорганизмы различаются по своей чувствительности к антибиотикам. Устойчивость к антибиотикам (*резистентность*) вызвана способностью клетки к замене одних звеньев обмена веществ на другие, а также наличием в клетках генетических факторов устойчивости. Устойчивость к антибиотикам может появляться в результате мутаций и рекомбинаций. В связи с широким использованием антибиотиков в различных сферах практической деятельности возникновение устойчивых форм микробов приобретает важное теоретическое значение. Практическое значение этой проблемы состоит в том, что появление резистентных форм при применении этих веществ может привести к существенному снижению лечебных свойств этих препаратов.

Совокупность антибиотиков включает препараты грибного, бактериального, актиномицетного, растительного и животного происхождения.

**Антибиотики грибного происхождения** представляет пенициллин.

**Пенициллин** получают из культуры плесневого гриба *Penicillium chrysogenum* методом глубинного выращивания при аэрации. Пенициллин – один из наименее токсичных антибиотиков, обладающих высоким лечебным действием. Он даёт хорошие результаты при лечении сепсиса (общая гнойная инфекция), стрептококковых и стафилококковых заболеваний. Пенициллин действует в основном на грамположительные микробы.

**Антибиотики актиномицетного происхождения** – самая многочисленная группа антибиотиков, многие из которых нашли применение в медицине, сельском хозяйстве, пищевой промышленности.

**Стрептомицин** открыт З. Ваксманом с сотрудниками в 1944 г. при изучении *Streptomyces globisporus streptomycini*. Он хорошо растворим в воде, устойчив при pH = 3...7, но быстро разрушается при кипячении, обладает широким антбактериальным действием, подавляя развитие многих грамположительных (стафилококки, стрептококки) и грамотрицательных бактерий.

**Тетрациклины** обладают широким спектром действия: активны в отношении микроорганизмов: *Staphylococcus* spp., *Listeria* spp., *Bacillus anthracis*, *Clostridium* spp. и др., грамотрицательных микроорганизмов: *Haemophilus influenzae*, *Haemophilus ducreyi*, *Bordetella pertussis*, большинства энтеробактерий: *Escherichia coli*, *Enterobacter* spp., включая *Enterobacter aerogenes* и др. Тетрациклины широко применяются в медицинской практике, в животноводстве – как стимуляторы роста животных и птиц, в пищевой промышленности – как консерванты скоропортящихся продуктов.

Актиномицин *D* – первый известный противораковый антибиотик, выделенный З. Ваксманом и Л. Вудрефом (американским биологом) из стрептомицетов в 1940 г. К противораковым антибиотикам, полученным из актиномицетов, относятся также брунеомицин, рубомицин, стрептонигрин, дауномицин и др.

**Антибиотики бактериального происхождения** (около 60 препаратов) токсичны для организма человека. В медицине используют грамицидин *C*, низины.

*Грамицидин C* – вещество полипептидной природы, полученное из культур аэробной споровой палочки *Bacillus brevis*. Обладает высокой антибактериальной активностью в отношении грамположительных и некоторых грамотрицательных бактерий: подавляет развитие фекального стрептококка, на который не действует ни пенициллин, ни сульфонамидные препараты.

*Низины* выделены из культуральной жидкости *Streptococcus lactis* и представляют смесь нескольких антибиотиков. Они являются ингибиторами роста стафилококков, многих стрептококков и анаэробных термостойких споровых бактерий – возбудителей порчи консервов. Низин активен по отношению ко многим грамположительным бактериям, воздействует на их споры.

**Антибиотики животного происхождения** представлены в медицине лизоцимом, экмолином, эритрином.

*Лизоцим* открыт русским ученым П. Н. Лященковым в 1909 г. в белке куриного яйца. Затем он был обнаружен в слюне, слезах, сердце, печени, селезенке и различных секреторных выделениях человека. В настоящее время кристаллический лизоцим получают из белка куриного яйца. Лизоцим обладает активным действием в отношении многих грамположительных болезнестворных и сапрофитных бактерий. В организме животных и человека он служит естественным защитным фактором против патогенных микробов.

*Экмолин* выделен советским микробиологом З. В. Ермольевой в 1950 г. из печени рыб. Антибиотик активен по отношению к дизентерийным и тифозным палочкам, стафилококкам, вирусам гриппа. При сочетании пенициллина со стрептомицином экмолин усиливает их активность и удлиняет срок действия.

*Эритрин* – антибиотическое вещество, получено советскими микробиологами Л. А. Зильбером и Г. Г. Якобсоном (1946 г.) из эритроцитов крови. Антибиотик подавляет развитие дифтерийной палочки, стрептококков и стафилококков. С успехом использовался при лечении и профилактике дифтерии.

Антибиотиком животного происхождения является белковое вещество *интерферон*, образующееся в клетках под действием вирусов, а также некоторых видов бактерий или бактериальных эндотоксинов.

**Антибиотики растительного происхождения** впервые изучены советским биологом Б. П. Токиным. В 1928 г. он обнаружил биологически активные соединения, образующиеся в результате жизнедеятельности высших

растений, и назвал их **фитонцидами**. Фитонциды широко распространены в мире растений. Они являются одним из факторов естественной сопротивляемости растений к поражению их микробами. Фитонцидными свойствами обладают бальзамы, смолы, вещества хиноидного строения, дубильные вещества, содержащие лактонное кольцо, антоцианы и др. Действие фитонцидов на микроорганизмы избирательно: сок того или иного растения губителен для одних микробов и безвреден для других. Биологическая активность фитонцидов меняется у одного и того же растения в зависимости от сезона года, например, осенью хвоя сосны менее бактерицидна, чем хвоя, собранная в мае или июне. Антимикробными свойствами обладают многие употребляемые в пищу овощи, пряности.

*Аллицин*, выделенный в 1944 г. из чеснока, характеризуется довольно высокой токсичностью. В чесноке аллицин содержится в виде вещества, которое может переходить в антибиотик под влиянием специфического фермента. Антибиотик подавляет развитие грамположительных и грамотрицательных микробов, а также туберкулезной палочки.

*Иманин* получен из такого растения, как зверобой. Применяется при лечении язв, ожогов, маститов и других заболеваний.

К антибиотическим веществам, образуемым высшими растениями, относятся также соединения, получившие название *фитоалексины* (*K. Мюллер*, 1966 г.). Образование фитоалексинов происходит в результате проникновения в растение микробы-паразита и продуктов его жизнедеятельности.

*Бактериоцины* – специфические белки, вырабатываемые некоторыми бактериями и подавляющие жизнедеятельность клеток других штаммов того же вида или близких видов бактерий, например, колицины, образуемые *E.coli*.

В отличие от антибиотиков бактериоцины характеризуются очень узким спектром действия – подавляют развитие бактерий только штаммов одного вида или родственных видов. Клетки, продуцирующие бактериоцины, резистентны к влиянию собственных, а также гомологичных бактериоцинов.

### 3.3.2 Микрофлора воды

Природная вода не является химически чистой и содержит достаточно много химических веществ и элементов. Поэтому вода является естественной средой обитания микроорганизмов и отражает микробный пейзаж почвы, так как микроорганизмы попадают в воду с частицами почвы. В воде формируются биоценозы с преобладанием микроорганизмов, которые адаптировались к определенным условиям. В 1 мл воды количество микробов может превышать несколько миллионов.

К специфическим водным аэробным микроорганизмам относятся *Pseudomonas fluorescens*, *Micrococcus roseus* и др. Анаэробные бактерии в воде встречаются крайне редко [25].

В иловых отложениях океанов, морей, болот, горячих минеральных ис-

точниках, нефтяных скважинах и других местах, лишённых кислорода, обитают наиболее древние живые существа – метанобразующие бактерии, которые для своей жизнедеятельности используют водород и углекислоту.

Вместе с загрязненными ливневыми, талыми и сточными водами в озера и реки попадают представители естественной микрофлоры человека и животных (кишечная палочка, цитробактер, энтеробактер, энтерококки, клостриди) и возбудители кишечных инфекций – брюшного тифа, паротитов, дизентерии, холеры, энтеровирусных инфекций и других, поэтому вода является фактором передачи многих инфекционных заболеваний. Некоторые возбудители могут даже размножаться в воде (холерный вибрион, легионеллы). Практически не содержит каких-либо микроорганизмов вода артезианских скважин.

Количественный и качественный состав микробоценозов воды зависит от физико-химического состояния водной среды, температуры, pH, концентрации минеральных и органических веществ, кислорода, CO<sub>2</sub>, от скорости движения воды, поступления ливневых и сточных вод. Загрязнение воды органическими веществами сопровождается увеличением анаэробных и аэробных бактерий, а также грибов.

Степень заражения воды микроорганизмами принято выражать *сапропельностью*, под которой подразумевают совокупность живых существ, живущих в водах, содержащих органические и неорганические вещества в определенных концентрациях.

Различают три степени микробного заражения воды. *Полисапробная* вода богата остатками погибших растений и животных – белками, жирами, клетчаткой и продуктами их разложения. Здесь протекают гнилостные процессы анаэробного типа, развиваются организмы, стойкие к повышенным дозам органического вещества, сероводорода, углекислоты и метана. Количество бактерий – до миллиона в 1 мл воды.

*Мезосапробная* вода инициирует минерализацию органического вещества с преобладанием окислительных процессов. Азот аммонийных солей переводится микробами в нитриты, сероводород – в соли серной кислоты. В этой воде органическое вещество минерализуется до CO<sub>2</sub>. Число бактерий в мезосапробной воде достигает 100 тыс. в 1 мл.

*Олигосапробная* вода – чистая вода. Количество микроорганизмов в 1 мл олигосапробной воды составляет десятки и сотни. В этой воде отсутствуют органические вещества. Типичными представителями являются железобактерии, которые окисляют железо Fe(II) в Fe(III).

Микроорганизмы играют главную роль в круговороте всех биологически важных элементов в природе, протекающем в водной среде.

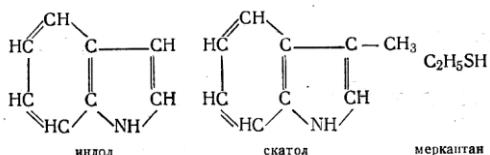
В круговороте углерода активное участие принимают растения, водоросли и цианобактерии, фиксирующие CO<sub>2</sub> в процессе фотосинтеза, а также микроорганизмы, разлагающие органические вещества отмерших растений

и животных с выделением  $\text{CO}_2$ . При аэробном разложении органических веществ образуются  $\text{CO}_2$  и вода, а при анаэробном брожении – летучие жирные кислоты, спирты,  $\text{CO}_2$ . Сбраживание углеводов дрожжами происходит с образованием этилового спирта. Процессы пропионовокислого, молочнокислого, маслянокислого, ацетонобутилового и других видов брожения сопровождаются образованием различных кислот и диоксида углерода.

*Атмосферный азот* связывают клубеньковые бактерии и свободноживущие или находящиеся в симбиозе с растениями микроорганизмы почвы. Органические азотсодержащие соединения в тканях растений и животных, попадая в почву, подвергаются минерализации до аммонийных соединений. Часть растительных остатков трансформируется в темноокрашенное, содержащее азот вещество – гумус.

Аммонийная форма азота подвергается в почве окислению нитрифицирующими бактериями с образованием солей азотной кислоты. При определенных условиях нитраты могут восстанавливаться до молекулярного азота и улетучиваются из почвы. Процесс образования аммиака при разрушении белка микроорганизмами получил название *аммонификации*, или *минерализации азота*.

Процесс распада белков или их производных под влиянием гнилостных бактерий называется *гниением*. Процессы гниения могут происходить аэробно или анаэробно. Гниение сопровождается выделением резко пахнущих веществ: аммиака, сероводорода, скатола, индола, меркаптанов и др.:



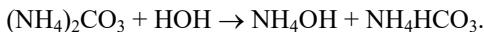
Распад белка не всегда происходит до образования этих веществ. Например, при минерализации органического вещества на очистных сооружениях происходит более глубокое разрушение белков до образования продуктов, не обладающих неприятным запахом.

Микроорганизмы используют в основном азот белка в виде промежуточных продуктов распада (*аминокислот*) и в форме конечного продукта – солей аммония – для вторичного синтеза протеинов. Одним из продуктов белкового обмена в животном организме является органическое соединение – мочевина ( $\text{H}_2\text{N} - \text{CO} - \text{NH}_2$ ). Под влияние микроорганизмов – *уробактерий* – в канализационной сети происходит гидролиз мочевины по уравнению



Этот процесс может происходить как в аэробных, так и в анаэробных условиях.

Карбонат аммония как соль слабой кислоты и слабого основания подвержен гидролизу



Для гидроксида аммония характерно равновесие



Продукты этой реакции обуславливают аммиачный запах в санитарных узлах.

Значительное количество азотсодержащих соединений усваивается микроорганизмами. Наиболее усвояемыми для растений являются нитраты – азотно-кислые соли. Они представляют собой продукт распада органических веществ в процессе окисления аммиака до азотистой, а затем азотной кислоты. Данный процесс называется *нитрификацией*, а микроорганизмы, его вызывающие, – *нитрифициирующими*.

Нитрифицирующие бактерии впервые выделил и описал (1890–1892 гг.) русский микробиолог *С. Н. Виноградский*. Нитрификация проходит в две стадии: первую стадию осуществляют нитритные бактерии рода *Nitrosomonas*: при этом аммиак окисляется до азотистой кислоты, образующей нитриты:



Во второй стадии участвуют нитратные бактерии рода *Nitrobacter*: азотистая кислота окисляется до азотной, образующей нитраты:



На скорость нитрификации, протекающей очень медленно, большое влияние оказывает температура. В интервале температур от 29 до 9 °C этот процесс мало изменяется, но ниже 9 °C замедляется, при 6 °C – резко, а при 0 °C нитрификация практически полностью прекращается.

Нитраты повышают плодородие почвы, однако, существует и обратный процесс: нитраты могут восстанавливаться в результате процесса денитрификации до выделения свободного азота, что обедняет его запас в виде солей в почве, приводя к снижению ее плодородия. Микроорганизмы, вызывающие *процесс денитрификации*, относят к роду *Pseudomonas*.

Энергетические возможности процесса окисления органических субстратов с участием нитратов сопоставимы с энергетическими возможностями процесса аэробного дыхания, т. е. с участием свободного кислорода. Большинство органических субстратов, участвующих в аэробном окислении, может быть потреблено при отсутствии кислорода, если в среде присутствуют нитраты.

В результате микробиологической денитрификации в атмосферу ежегодно поступает из почв и водоемов 270–330 млн т азота. Особенно существен данный процесс в переувлажненных почвах, а также в тех случаях, когда минеральные азотные удобрения вносят в форме нитратов совместно с навозом или другими органическими удобрениями.

### **3.3.3 Санитарная микробиология**

Санитарная микробиология – направление медицинской микробиологии, изучающее микрофлору окружающей среды и ее влияние на здоровье человека и состояние среды его обитания [26]. Началом развития санитарной микробиологии можно считать 1883 г., когда французский врач Э. *Mace* предложил рассматривать кишечную палочку как показатель фекального загрязнения воды. Изучение микрофлоры и микробиологических объектов в среде обитания человека необходимо для гигиенической оценки его взаимоотношений с окружающей средой. Санитарная микробиология разрабатывает методы контроля за состоянием воды, почвы, воздуха, пищевых продуктов и различных предметов обихода.

#### **Основные задачи санитарной микробиологии:**

- изучение биоценозов, в которых существуют микроорганизмы, патогенные для человека, и изучение его роли в их накоплении;
- разработка методов микробиологических исследований внешней среды, микробиологических нормативов и мероприятий по охране окружающей среды.

Базовые санитарно-микробиологические методы направлены на определение общего микробного числа, определение и титрование санитарно-показательных микроорганизмов (СПМ), выявление в исследуемых объектах патогенных микроорганизмов и их метаболитов, определение степени неброякачественности изучаемых объектов или продуктов, вызванной деятельностью микроорганизмов.

Практическая санитарная микробиология использует два основных метода оценки санитарно-эпидемического состояния внешней среды; прямое обнаружение патогенных микроорганизмов и выявление косвенных признаков пребывания патогенов во внешней среде.

**Метод прямого обнаружения патогенных микроорганизмов.** Методы прямого обнаружения – наиболее точные и надежные критерии оценки эпидемиологической опасности внешней среды [27, 28]. Наиболее часто проводят посев исследуемого материала на питательные среды. Однако на ожидаемые результаты исследований влияют следующие факторы:

1 Содержание патогенных микроорганизмов во внешней среде относительно невелико, так как они составляют лишь 1/30000 всего видового состава микрофлоры внешней среды. При этом патогенная микрофлора распределена во внешней среде неравномерно, что делает необходимым проведение серийных исследований в динамике определенного периода.

2 Выделение одного возбудителя не всегда свидетельствует о присутствии других патогенных видов. Поэтому необходимо проведение разнонаправленных исследований, что практически сложно осуществимо. Ситуацию значительно усугубляет возрастание роли условно-патогенных микроорганизмов, способных вызвать эпидемические вспышки заболеваний.

**Метод косвенной идентификации.** Предусматривает применение двух критериев, по которым можно косвенно судить о возможности присутствия возбудителя во внешней среде: общее микробное число (ОМЧ) и содержание СПМ.

ОМЧ определяют путем подсчета всех микроорганизмов (растущих на питательных средах) в 1 г или 1 мл субстрата. Используя этот критерий, обычно исходят из предположения, что чем больше объект загрязнен органическими веществами, тем выше ОМЧ и тем вероятнее присутствие патогенов. Например, ОМЧ для воды не должно превышать 100. Однако это не всегда так: ОМЧ может быть большим за счет сапрофитов, а патогены могут отсутствовать, либо преобладание сапрофитов значительно укорачивает сроки выживания патогенов во внешней среде. Поэтому более адекватно расценить ОМЧ как показатель интенсивности загрязнения внешней среды органическими веществами.

*Санитарно-показательные микроорганизмы (СПМ)* – это представители нормальной микрофлоры, которые выделяются естественным путем в окружающую среду и служат показателями санитарного неблагополучия, потенциальной опасности исследуемых объектов. Так, если на объектах обнаруживают нормальных обитателей кишечника, делают заключение о наличии фекального загрязнения и возможном присутствии патогенных энтеробактерий (бактерий, живущих в кишечнике). Поскольку патогенных представителей меньше и выделить их труднее, вначале выявляют в окружающей среде СПМ, после чего проводят поиск патогенных. Содержание СПМ определяют двумя методами.

*Прямой подсчет количества бактерий.* Проводят с помощью специальных камер (например, Петрова или Гельдера) либо специальных электронных счетчиков. Метод применяют в экстренных случаях при необходимости срочного подсчета количественного содержания бактерий (например, при авариях в системе водоснабжения, при очистке, определении эффективности работы очистных сооружений и др.) [29, 30].

*Посев на питательные среды.* Менее точный метод, так как выявляет группы микроорганизмов, растущих при заданном режиме (на определенных средах и при определенной температуре) [31].

Содержание СПМ выражают в титрах и индексах.

**Титр СПМ** – наименьший объем исследуемого материала (в миллилитрах) или количество (в граммах), в котором обнаружена хотя бы одна особь СПМ.

**Индекс СПМ** – количество СПМ, обнаруженное в определенном объеме

или количестве исследуемого объекта. Для не питьевой воды – в 1 г. Индекс – величина, обратная титру. Зная один показатель, можно вычислить другой.

Все СПМ расценивают как индикаторы биологического загрязнения. Их подразделяют на группы:

– *A* – включает обитателей кишечника человека (обнаружено более 260 видов) и животных. В нее входят бактерии группы кишечной палочки (БГКП) – эшерихии, энтерококки, протеи, сальмонеллы. Также в группу А включены сульфитвосстанавливающие клоストридины (*Clostridium perfringens* и др.), термофилы, бактериофаги, бактероиды, синегнойная палочка, кандиды и др.;

– *B* – включает обитателей верхних дыхательных путей и носоглотки. Микроорганизмы расцениваются как индикаторы орального загрязнения. В нее входят стрептококки, стафилококки и др.;

– *C* – включает сапрофитические микроорганизмы, обитающие во внешней среде. Микроорганизмы расценивают как индикаторы процессов самоочищения. В нее входят бактерии-протеолиты, бактерии-аммонификаторы и бактерии-нитрифициаторы, некоторые спорообразующие бактерии, грибы, актиномицеты, целлюлозобактерии, сине-зеленые водоросли.

**К основным объектам санитарно-микробиологических исследований** относят объекты внешней среды (почву, воздух, воду), пищевые продукты и др. [32].

*Коли-индекс, коли-титр* – количественные показатели фекального загрязнения воды, пищевых продуктов, почвы и других объектов окружающей среды, основанные на исследовании содержания в них кишечной палочки. Кроме этого, кишечная палочка легко выращивается в обычных условиях на простых питательных средах. Присутствие ее в исследуемых субстратах указывает на возможность наличия в них других, в том числе патогенных для человека микроорганизмов кишечной группы, непосредственное обнаружение которых затруднено. Высокое содержание кишечной палочки в тех или иных субстратах может свидетельствовать об интенсивном фекальном загрязнении и повышает эпидемиологическую опасность этих субстратов. Поэтому питьевая вода и различные пищевые продукты подвергаются постоянному санитарно-бактериологическому контролю, предусматривающему определение коли-титра или коли-индекса.

*Коли-индекс* – количество кишечных палочек, обнаруживаемое в 1 л жидкости, 1 кг твердого вещества (для пищевых продуктов) и в 1 г почвы. Для определения коли-индекса используют метод мембранных фильтров или непосредственный посев различных количеств исследуемого материала на плотные питательные среды. Сущность метода мембранных фильтров заключается в фильтровании определенных объемов исследуемой жидкости (или твердого вещества, разведенного в воде) через мембранные фильтры № 2 или 3, на которых задерживаются бактерии. Фильтры переносят на чашки со средой Эндо, инкубуемые при  $T = 37^{\circ}\text{C}$ , а затем исследуют выросшие на поверхности фильтра темно-красные с металлическим блеском,

розовые и прозрачные колонии. Из колоний каждого типа готовят мазки и окрашивают их по Граму. Колонии разных типов проверяют на оксидазную активность, которая должна быть отрицательной. Бесцветные и розовые колонии дополнительно засевают на полужидкую среду с глюкозой и индикатором, на которой в течение 24-часовой инкубации при  $T = 37^{\circ}\text{C}$  должны образовываться кислота и газ. Для определения коли-индекса подсчитывают выросшие на фильтре колонии кишечной палочки и затем проводят перерасчет на 1 л, 1 кг или 1 г в зависимости от исследуемого материала.

*Коли-титр* – наименьшее количество жидкости или твёрдого вещества (выраженное соответственно в миллилитрах или граммах), в котором обнаруживаются кишечные палочки.

Коли-титр определяют бродильным методом, заключающимся в посеве определенных объемов исследуемого субстрата на среды накопления, которые выдерживают  $T = 37^{\circ}\text{C}$ . Большие объемы засевают на концентрированную среду, малые объемы – в пробирки со средой нормальной концентрации. Из всех помутневших пробирок вне зависимости от образования кислоты и газа делают высеив на среду Эндо с последующей идентификацией выросших колоний. Ориентировочно за коли-титр принимают тот наименьший объем, при посеве которого на среды накопления выявлены кишечные палочки. Наиболее вероятное значение коли-титра воды, молока, пива и других сред определяют с помощью специальных таблиц, сопоставляя с ними полученные результаты. В целом бродильный метод менее точен, чем учет выросших бактерий на плотных средах и мембранных фильтрах.

Коли-титр – величина, обратная коли-индексу, который является прямым показателем фекального загрязнения. Возможен пересчет коли-титра на коли-индекс и обратно. Предельно допустимые величины коли-титра (коли-индекса) нормированы общесоюзным стандартом или республиканскими техническими условиями, а также специальными инструкциями органов здравоохранения и других ведомств.

Для получения более точных данных о наличии фекального загрязнения объектов и его степени считается целесообразным наряду с определением коли-титра (коли-индекса) проводить одновременный количественный учет в исследуемом материале и других санитарно-показательных микроорганизмах (например: энтерококки, споровые анаэробы, кишечные бактериофаги).

**Санитарно-микробиологическое исследование почвы.** Почва представляет собой наиболее насыщенный микроорганизмами биотоп, отличающийся стабильностью состава микрофлоры. На формирование почвенных биоценозов, имеющих, в том числе и санитарное значение, на их качественный и количественный состав влияет множество факторов:

- тип почвы и степень её окультуренности;
- физико-химические свойства почвы: структурированность, аэрация, влажность, водопроницаемость, наличие свободного и связанного кислорода;

- возраст, географическое расположение почвы;
- климатические условия и сезонность. Весной в почве преобладают анаэробные, летом – спорообразующие бактерии. К концу лета увеличивается содержание актиномицетов, усваивающих органические вещества, не утилизированные бактериями. Биологическая активность всех почвенных микроорганизмов увеличивается осенью и заметно снижается в зимний период;
- глубина почвенного слоя. Выделяют три основных горизонта: А (0–10 см), В (10–20 см) и С (20–30 см). На поверхности и в горизонте А микроорганизмов мало вследствие низкой влажности и действия прямого солнечного света. На глубине 1 м выделяют единичные микроорганизмы. Виды, выделяемые на глубине 4 м и более, рассматривают не как почвенные, а как имеющие геологическое значение.

**Санитарно-микробиологическое исследование воды.** Вода – естественная среда обитания разнообразных микроорганизмов. В воде рек, открытых водоемов, морей, океанов обнаруживают представителей всех таксономических групп бактерий, а также грибы, водоросли, простейшие.

- Регулярному санитарно-микробиологическому надзору подвергают:
- воду питьевую – централизованное водоснабжение и местное с забором воды из открытых водоемов (реки, водохранилища) или из подземных источников (скважины, родники, колодцы);
  - воду плавательных бассейнов, лед медицинский и хозяйственный;
  - сточные воды: хозяйственно-фекальные, промышленные, смешанные (хозяйственно-фекальные и промышленные), талые и ливневые.

Все санитарно-микробиологические исследования воды регламентируют соответствующие нормативные документы. Основания для санитарно-микробиологического исследования воды следующие:

- выбор источника централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения и периодический контроль над ним;
- контроль эффективности обеззараживания питьевой воды централизованного водоснабжения;
- наблюдения за подземными источниками централизованного водоснабжения (артезианские скважины, почвенные воды и т. д.);
- определение состояния и степени пригодности воды источников индивидуального водопользования (колодцев, родников и т. д.);
- наблюдение за санитарно-эпидемиологическим состоянием воды открытых водоемов;
- контроль эффективности обеззараживания воды плавательных бассейнов;
- проверка качества и степени очистки сточных вод;
- расследование водных вспышек инфекционных болезней.

**Санитарно-микробиологический контроль над водами открытых водоемов.** В контроль над поверхностными водоемами входят исследование и заключение о возможности использовать водоем (для питьевых, хозяй-

ственных и других нужд), выяснение причин фекального загрязнения, определение способности водоема к самоочищению. Проводят определение ОМЧ, выделяют бактерии группы кишечной палочки (БГКП), кишечную палочку, энтерококки, стафилококки и патогенные микроорганизмы (салмонеллы, холерные вибрионы, шигеллы, энетровирусы и др.). Количество последних не должно превышать 100 в 1 л в зоне купания и не более 20 в 1 л воды бассейнов и морской воды.

**Санитарно-микробиологический контроль качества питьевой воды** включает определение ОМЧ, количества энтеробактерий, спор сульфитредуцирующих клостридий и колифагов.

**Санитарно-микробиологическое исследование воды плавательных бассейнов.** Пресная вода, поступающая в бассейн, должна отвечать гигиеническим требованиям, предъявляемым к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Морская вода в системах водозаборов должна содержать колiformные бактерии в количестве не более 1000 КОЕ в литре.

При производственном контроле основные микробиологические показатели определяют один раз в десять дней. При лабораторном контроле основные микробиологические показатели определяют один раз в месяц.

**Санитарно-бактериологическое исследование сточных вод.** Основная задача санитарно-микробиологического исследования сточных вод – проверка эффективности очистки и обеззараживания сточных вод и их осадков перед спуском в водоемы и на поля орошения. В ряде случаев исследуют сточные воды неочищенные или на этапах очистки до хлорирования для контроля работы очистных сооружений на наличие только лактозоположительных колiformных бактерий, а после хлорирования определяют бактерии семейства *Enterobacteriaceae* как в питьевой воде.

**Санитарно-микробиологическое исследование воздуха.** Основная задача санитарно-микробиологического исследования воздуха – гигиеническая и эпидемиологическая оценка воздушной среды, а также разработка комплекса мероприятий, направленных на профилактику аэрогенной передачи возбудителей инфекционных болезней. При оценке санитарного состояния закрытых помещений в зависимости от задач исследования определяют ОМЧ, наличие СПМ (стафилококков, стрептококков).

## **4 БИОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД**

---

### **4.1 Свойства активного ила и их влияние на процессы очистки**

**В** природе биологическая очистка среды происходит естественным путем. За миллионы лет сложились устойчивые экологические отношения, где даже самые мельчайшие живые организмы играют важную роль. Изучив эти сложные взаимосвязи, специалисты научились использовать их при создании различных типов очистных сооружений: биофильеры, где действующим объектом является тонкая бактериальная пленка; биологические пруды – здесь в очистке сточных вод принимают участие все водные организмы; аэротенки – бетонные резервуары, в которых поступающие сточные воды продуваются снизу мощным потоком мелких пузырьков воздуха. Очищающим объектом в аэротенке является активный ил – совокупность микроскопических растений и животных различных групп: бактерий, актиномицетов, простейших, водорослей, вирусов, членистоногих и др. [33].

При избытке кислорода, диффундирующем в воду из пузырьков, и притоке органических веществ из сточных вод в активном иле бурно развивается бактериальное население и микрофауна. Бактерии склеиваются в хлопья, обладающие огромной удельной поверхностью – до  $1200\text{ m}^2/\text{m}^3$ , выделяют ферменты, расщепляющие органические соединения до простых молекул. Происходит так называемая минерализация органики. Поглощая в избытке органические вещества, бактерии активно делятся, их масса непрерывно увеличивается. Число бактерий на 1 г сухого вещества ила колеблется от  $10^8$  до  $10^{14}$  клеток. Активный ил имеет очень развитую удельную поверхность – до  $100\text{ m}^2/\text{g}$  сухой массы, а размер клеток колеблется от 0,1 до 3 мм. Частицы ила имеют отрицательный заряд при  $\text{pH} = 4...9$ . При очистке бытовых сточных вод обычно наиболее многочисленными в активном иле оказываются грамотрицательные палочки, затем по численности следуют кокковые формы и бациллы. Состав микрофлоры и микрофауны активных илов зависит от состава поступающих сточных вод, количества растворенного кислорода,  $\text{pH}$ , температуры, гидродинамики потока, солености, нагрузки органическими загрязнениями и в процессе очистки может изменяться.

Важнейшее свойство ила – способность к хлопьеобразованию (флокуляции) и седиментации. Бактериальная флокуляция – это физиологическое состояние микроорганизмов, которое происходит после окончания их фазы роста и наступления фазы эндогенной респирации. Флокуляция не опреде-

ляется одним видом микроорганизмов, а свойственна многим бактериальным культурам. Существует прямая зависимость между накоплениями внеклеточных полимеров в массе бактерий и микробиальным хлопьеобразованием. В период образования хлопьев увеличивается отношение содержания внеклеточных полимеров к массе бактерий. Внеклеточные полимеры представлены четырьмя основными категориями: полисахаридами, белками, РНК и ДНК.

Хлопья ила можно дефлокулировать, если с поверхности клетки удалить внеклеточные полимеры; при внесении полимеров обратно в ил бактерии вновь образуют хлопья. Флокуляцию можно усилить добавлением неорганических веществ: каолина; сульфата аммония; кремнезема и др. Из физических параметров, влияющих на флокуляцию, основным является pH. Благодаря флокуляции и седиментации активный ил быстро оседает и отделяется от уже чистой воды. Отстоявшаяся вода готова к дальнейшему использованию, а ил снова включается в процесс очистки. На поверхности бактериальных хлопьев и между ними обитает бесчисленное множество невидимых глазом животных, как многоклеточных – коловраток, червей, клещей, так и одноклеточных – инфузорий, жгутиковых, амеб, выполняющих очень важные функции. Они питаются бактериями, уничтожая старых и неработоспособных, тем самым омолаживаю бактериальное население. Но самое главное – генетический контроль: бактерии, не слипающиеся в хлопья, будут съедены. Таким образом, микрофауна очищает воду от всех оторвавшихся от хлопьев частиц. Если этих «хищников» в воде нет, то очищенная вода остается мутной.

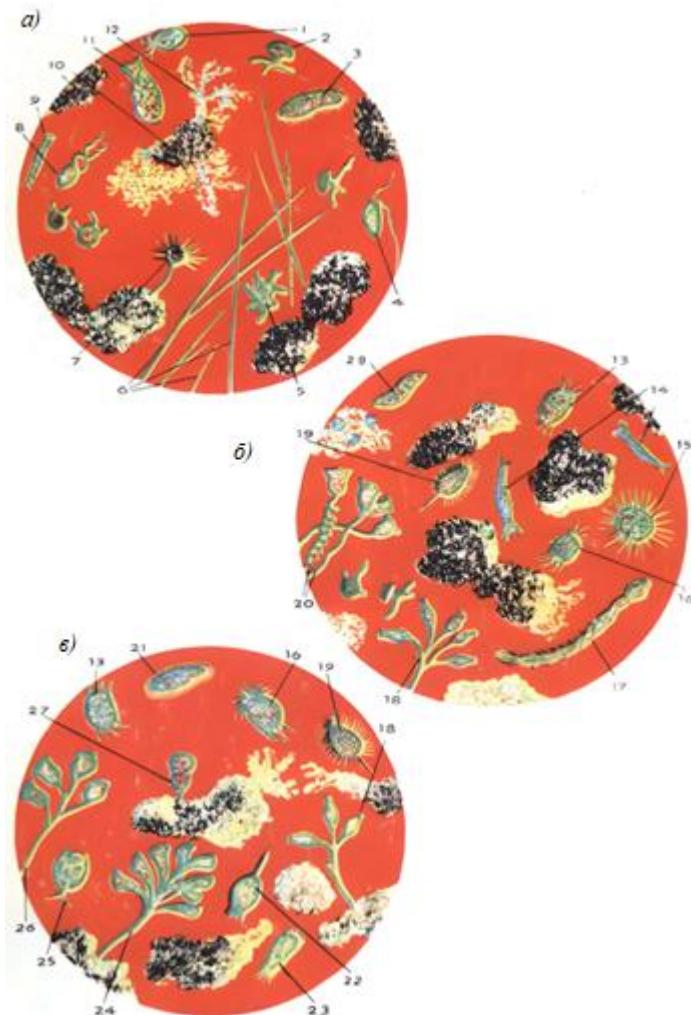
Активный ил не сразу приспосабливается к очистке определенного стока: должно пройти, по крайней мере, несколько месяцев, прежде чем образуется оптимальное для данного типа стоков сообщество организмов. Работу аэротенка контролируют химическими анализами стоков. Существуют методы и биологического контроля. Изучив под микроскопом пробу ила и выявив, какие присутствуют микроорганизмы, можно сделать вывод о работе данного очистного сооружения. Если степень очистки воды снижается, то в активном иле появляется много нитчатых бактерий; вместо брюхоресничных инфузорий, обычно бегающих по хлопьям активного ила, появляются туфельки (парамеции). При нехватке кислорода большинство прикрепленных форм простейших заменяется свободноплавающими видами животных. Увеличив дозу кислорода, подаваемого в аэротенк, можно сместить равновесие живого населения в нужную сторону. Самым активным показателем деятельности активного ила служит набор составляющих его микроорганизмов. По видовому составу этих живых существ можно определить, насколько эффективно идет процесс очистки; какие стоки – промышленные или бытовые очищает активный ил; какова токсичность загрязненных вод. На рисунке 4.1 изображена микроскопическая картина активного ила [34].



- 1 – зуглифа (раковинная амеба); 2 – арцелла (раковинная амеба); 3 – инфузория туфелька;  
 4 – бодо (жгутиковое); 5 – амеба протей; 6 – нитчатые бактерии; 7 – сосущая инфузория;  
 8 – политома (жгутиковая); 9 – коловратка нотоммата; 10 – хлопья активного ила;  
 11 – амеба дисковидная; 12 – зооглея «оленины рога»; 13 – аспидиска (брюхоресничная инфузория);  
 14 – коловратка филодина; 15 – солнечник; 16 – эуплOTES (брюхоресничная инфузория);  
 17 – аэлозома (малоресничный червь); 18 – оперкулярия (колониальная инфузория);  
 19 – циклодиум (инфузория); 20 – сувойка; 21 – окситриха (брюхоресничная инфузория);  
 22 – коловратка моностила; 23 – стилонихия (инфузория); 24 – кархезиум (колониальная  
 инфузория); 25 – коловратка катипна; 26 – эпистилис (колониальная инфузория); 27 – фабдоста  
 (прикрепленная инфузория); 28 – амеба террикола

Рисунок 4.1 – Микроскопическая картина активного ила [34]

На рисунке 4.2 – пробы ила в поле зрения поляризационно-интерференционного микроскопа при очистке производственных и бытовых стоков и разном режиме работы аэротенка [34].



α – при очистке производственных сточных вод и плохой работе аэротенка;  
β – при очистке производственных сточных вод и хорошей работе аэротенка;  
γ – при очистке бытовых сточных вод (обозначения те же, что и на рисунке 4.1)

Рисунок 4.2 – Пробы ила в поле зрения микроскопа [34]

От физического состояния ила и его биологического состава зависит эффективность процесса биологической очистки сточных вод. Показателем рабочего состояния активного ила является присутствие в нем инфузорий круглоресничных, например сувоек, брюхоресничных, червей, коловраток и др. При нарушении режимов биологической очистки может наблюдаться процесс всухания активного ила с последующим выносом его с очищенными сточными водами и прекращением очистки. Свидетельством этого является исчезновение простейших, развитие грибов, нитчатых бактерий.

Вспухание ила обусловливается следующими причинами: уменьшение концентрации растворенного кислорода, избыточное количество углеводов, недостаток азота и фосфора, резкие изменения нагрузок на ил, чрезмерная аэрация. Вспущий ил обладает развитой удельной поверхностью, повышенной биохимической активностью и очень высокой очистительной способностью по сравнению с обычным активным илом. Однако нормальная эксплуатация сооружений со вспущим илом невозможна из-за отсутствия в настоящее время удовлетворительных технических решений отделения вспущего ила от очищенной воды.

Химический состав активного ила очень сложен, и для расчетов скорости метаболических процессов, определения выхода клеточного вещества и другого используют среднестатистическую формулу органического вещества ила  $C_5H_{10}O_2N$  [35]. При этом надо учитывать количество поступающих стоков, количество и качественный состав загрязнений в них, начальное и остаточное БПК.

Для нормального протекания процессов биохимической очистки необходимо перемешивать стоки с целью предотвращения образования застойных зон и гомогенизации смеси хлопьев ила со стоками, а также растворить кислород в водной среде для обеспечения жизнедеятельности аэробных бактерий и микроорганизмов. Обе эти функции выполняют системы аэрации различных типов.

## **4.2 Механизм удаления органических веществ из сточных вод микроорганизмами активного ила**

Основные закономерности изъятия органических загрязнений из сточных вод и прироста биомассы активного ила подробно описаны в работе [36]. Ниже приведены из данной работы некоторые основные положения, поясняющие процесс биохимической очистки сточных вод.

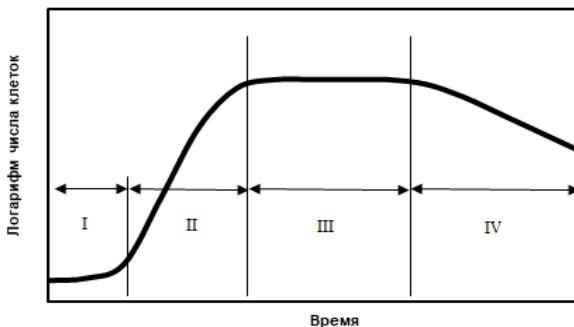
Процесс изъятия органических веществ из стоков можно разделить на три стадии: массопередача органического вещества из жидкости к поверхности клетки; диффузия вещества через полупроницаемые мембранны (при необходимости – гидролиз органических загрязнений с образованием продуктов, способных диффундировать через мембранны клеток); метаболизм

диффундированных продуктов с выделением энергии и синтезом нового клеточного вещества.

Скорость протекания первой стадии определяется законами диффузии и гидродинамическими условиями в аэротенке. Процесс диффузии вещества от поверхности внутрь клетки может осуществляться двумя путями: последовательным растворением вещества в стенке и цитоплазматической мембране; присоединением проникающего вещества к специальному белку-переносчику, находящемуся в мембране, перехода комплекса «вещество – белок-переносчик» в растворимое состояние и его диффузия через мембрану клетку, где комплекс распадается, а белок-переносчик высвобождается для совершения нового цикла. Диффузии может предшествовать гидролиз вещества под воздействием внеклеточных ферментов. Но прежде чем начнется процесс переноса вещества или его гидролиза, вещество должно попасть на поверхность клетки и сорбироваться ею. При этом за исключением начального момента процессы сорбции и диффузии идут одновременно. Рядом экспериментальных результатов в работе [36] показано, что количество адсорбируемого активным илом вещества относительно невелико, поэтому сорбция в очистку сточных вод вносит незначительный вклад. Основную роль в процессах очистки стоков имеют процессы превращения вещества внутри клеток микроорганизмов. В результате этих процессов происходит окисление вещества с выделением энергии и синтез новых белковых веществ, который протекает с затратой энергии. Процесс синтеза белков идет через образование промежуточных продуктов типа углеводов, поликислот и т. п.

#### **4.3 Основные фазы роста микроорганизмов в процессах биохимической очистки**

Способность микроорганизмов к быстрому размножению и связанная с этим большая скорость потребления загрязнений является причиной их использования в технологии очистки сточных вод [36]. Интенсивность размножения микроорганизмов определяется многими факторами, главный из которых – наличие питательных веществ. При отсутствии постоянного восполнения потребленного субстрата микроорганизмы размножаются вначале в условиях избытка питательных веществ, содержание которых затем постепенно уменьшается. Одновременно в среде происходит накопление продуктов метаболизма. Поэтому микроорганизмы, выросшие в период культивирования, физиологически отличаются от выросших в более поздние стадии. Это ведет к образованию гетерогенной культуры микроорганизмов, меняющейся во времени. Динамика роста культуры во времени представлена на рисунке 4.3 [35, 36].



I – фаза приспособления; II – фаза роста; III – стационарная фаза; IV – фаза распада

Рисунок 4.3 – Динамика роста микробной культуры [36]

При внесении микробной структуры в питательную среду клетки вступают в фазу приспособления I. Продолжительность этой фазы зависит от адаптированности микроорганизмов к органическим веществам, содержащимся в среде. В это время скорость роста непрерывно увеличивается и достигает максимума к началу фазы роста II, во время которой прирост биомассы во времени определяется экспоненциальной зависимостью. В замкнутой среде питательные вещества со временем заканчиваются, и их недостаток лимитирует рост клеток – культура переходит в стационарную фазу III. В этой фазе существует равновесие между ростом живых и распадом отмерших клеток. Количество биомассы находится на одном уровне. Когда наступает медленный, а затем все более быстрый распад клеток, отмирание микроорганизмов в культуре превышает их рост, наступает фаза распада IV.

Регулируя условия среды, можно управлять развитием микробной культуры. При постоянных условиях среды развитие культуры стабилизируется. Это может быть обеспечено при культивировании микроорганизмов в непрерывно обновляющейся среде, что обеспечивается стационарной подачей и интенсивным перемешиванием субстрата в культуральной среде. Одновременно такое же количество культуральной среды постоянно выводится из установки вместе с частью микроорганизмов. Такой способ культивирования получил название непрерывного, или проточного. Правильно применяя этот способ, можно постоянно поддерживать микроорганизмы в стадии молодости, когда они, интенсивно размножаясь, будут быстро потреблять питательные вещества (органические загрязнения) из жидкости, что в конечном итоге повышает производительность процесса биохимической очистки. Следует при этом обратить внимание на то, что не всякий непрерывный с технологической точки зрения процесс является также непрерывным и с биологической точки зрения. Так, в аэротенках-вытеснителях тех-

нологический процесс очистки стоков идет непрерывно, в то время как микроорганизмы от впуска до выпуска проходят весь цикл развития [36]. В аэротенках-смесителях при определенных режимах эксплуатации может быть обеспечено непрерывное выращивание культуры.

#### **4.4 Прирост биомассы и потребление кислорода в процессе очистки стоков**

В процессе потребления микроорганизмами органических веществ, содержащихся в стоках, в клетке одновременно происходят два взаимосвязанных процесса – синтез протоплазмы и окисление органических веществ [36]. В процессе окисления клетки потребляют кислород, растворенный в стоках. Скорость потребления кислорода активным илом зависит от многих взаимосвязанных факторов: величины биомассы, скорости роста и физиологической активности клеток; вида и концентрации питательных веществ; накопления токсических продуктов обмена; количества и природы биогенных веществ; содержания кислорода в воде.

Скорость биохимического окисления растворенных веществ, как правило, выше скорости окисления веществ, находящихся в дисперсной (коллоидной) фазе. Интенсивность и последовательность окисления микробами зависит от многих факторов, но решающее влияние на эти процессы оказывает химическое строение вещества – длина и топография углеродной цепи, степень окисления углеродных атомов. Наименее подвержены окислению углеводороды, так как углерод и водород прочно связаны и клетка для осуществления реакции должна затратить большое количество энергии для преодоления высокого энергетического барьера. Наиболее легко используются микроорганизмами органические кислоты. Лучшим субстратом для большинства микроорганизмов является уксусная кислота. Добавление муравьиной кислоты оказывает катализитическое действие при окислении других органических кислот.

Способность вещества биохимически окисляться и даже его величина БПК не дают представления о целесообразности применения биохимического метода для извлечения этого вещества из стоков. Следует иметь в виду, что скорость окисления некоторых веществ очень мала и время их пребывания в аэротенке, необходимое для очистки, будет слишком велико. Другие вещества могут не окисляться микроорганизмами до углекислого газа и воды, а продукты метаболизма могут быть еще более токсичны, чем исходное вещество. Степень использования органического вещества для синтеза веществ протоплазмы в зависимости от класса окисляемого вещества представлена в таблице 4.1 [36].

**Таблица 4.1 – Степень потребления органических веществ для синтеза веществ протоплазмы [36]**

| Класс веществ        | Степень использования, % |
|----------------------|--------------------------|
| Углеводы             | 65–85                    |
| Спирты               | 52–66                    |
| Аминокислоты         | 32–68                    |
| Органические кислоты | 10–60                    |
| Углеводороды         | 10–30                    |

Кроме характера окисляемого вещества прирост биомассы зависит от многих факторов. Чем меньше прирост активного ила, тем больший процент веществ, содержащихся в сточной воде, окисляется до углекислого газа и воды, и значит, стоки полнее освобождаются от органических веществ, так как «приросшая» биомасса также является загрязнением и нуждается в извлечении и очистка стоков целесообразна биохимическим путем.

В зависимости от состава загрязнений стоков возможны следующие варианты их удаления: все вещества в стоках потребляются микроорганизмами одновременно с близкой скоростью; все вещества потребляются одновременно с разными скоростями; все вещества потребляются последовательно.

Продолжительность аэрации стоков первого типа будет определяться скоростью реакции и общей концентрацией содержащихся веществ. При стоках второго типа продолжительность очистки будет зависеть не только от вышеуказанных факторов, но и от соотношения концентраций различных веществ и скоростей их окисления.

У этого типа стоков возможен вариант, когда время аэрации будет определяться требуемой степенью превращения самого медленно окисляемого вещества. Для стоков третьего типа время аэрации определяется суммой продолжительности окисления каждого вещества в отдельности. На практике в чистом виде каждый из вышеуказанных типов стоков весьма редко встречается. Чаще встречаются стоки, в которых присутствуют все типы одновременно. В этом случае продолжительность аэрации определяется суммарным временем, необходимым на окисление каждой из групп веществ, и соотношением концентраций и скоростей окисления отдельных продуктов каждой группы.

Процесс потребления органического вещества из сточных вод определяется кинетикой ферментативных реакций, протекающих внутри клетки. При этом общая скорость протекания биохимической очистки определяется скоростью самой медленной реакции.

В работе [36] на основе анализа закономерностей роста биомассы и убыт ли загрязнений от продолжительности аэрации получено выражение для расчета последней:

$$t = \frac{BPK_{вх} - BPK_{вых}}{c_1 a} + \frac{c_2}{a} \lg \frac{BPK_{вх}}{BPK_{вых}}, \quad (4.1)$$

где  $t$  – время аэрации;  $BPK_{вх}$  и  $BPK_{вых}$  – значения БПК на входе и выходе из аэротенка соответственно;  $c_1$  – скорость окисления загрязнений в мг  $BPK_{пол}$  на 1 г ила в час;  $a$  – величина биомассы, г/л;  $c_2$  – константа.

В свою очередь, константы  $c_1$  и  $c_2$  можно определить из выражений:

$$c_1 = \mu_m \alpha, \quad (4.2)$$

$$c_2 = \frac{2,3K_m}{\mu_m \alpha}, \quad (4.3)$$

где  $\mu_m$  – предел, к которому стремится скорость роста биомассы  $\mu$ ;  $\alpha$  – количество мг  $BPK_{пол}$  субстрата, из которого образуется 1 г ила;  $K_m$  – концентрация субстрата, при которой скорость ферментативной реакции равна половине максимальной скорости.

Анализ выражения (4.1) показывает, что при низких значениях  $BPK_{вх}$  разность  $BPK_{вх} - BPK_{вых}$  мала и основное значение приобретает второй член уравнения, а при высоких значениях  $BPK_{вх}$  – основное влияние на величину времени аэрации оказывает первый член уравнения (4.1). Поэтому для разбавленных загрязнений, содержащихся в водоемах, можно пренебречь первым членом уравнения (4.1), а для концентрированных стоков – вторым.

В случае очистки стоков в сооружениях с интенсивным перемешиванием всего объема в установившемся режиме концентрация загрязнений на входе равна концентрации в аэротенке, а скорость поступления загрязнений равна скорости их удаления.

Уравнение материального баланса в этом случае выглядит следующим образом:

$$\frac{BPK_{вх}}{t} = -\frac{dBPK}{dt} + \frac{BPK_{вых}}{t} \quad \text{или} \quad \frac{BPK_{вх} - BPK_{вых}}{t} = \alpha \frac{\mu_m BPK_{вых}}{K_m + BPK_{вых}} a \quad (4.4)$$

С учетом (4.4) выражение (4.1) примет вид

$$t = \frac{BPK_{вх} - BPK_{вых}}{\alpha \mu_m a \frac{BPK_{вых}}{K_m + BPK_{вых}}} . \quad (4.5)$$

Из выражения (4.5) следует, что чем тщательнее очистка, тем больше на величину дроби в знаменателе оказывает константа  $K_m$ , тем меньше скорость очистки сточных вод в аэротенке. Константа  $K_m$  характеризует устойчивость вещества к биохимическому воздействию.

#### 4.5 Влияние физико-химических и гидродинамических факторов на скорость биохимического окисления

Рассматривая кинетику биохимической очистки стоков, авторы [36] установили, что основными факторами, определяющими продолжительность процесса являются концентрация поступающих загрязнений, требуемая степень очистки, химическая природа загрязнений (определяет величины  $\mu_m$ ,  $a$ ,  $K_m$ ) доза активного ила.

Из уравнений (4.1) и (4.5) видно, что количество микроорганизмов оказывает обратно пропорциональное влияние на длительность очистки при прочих равных условиях. Исследованиями [36] установлено, что доза активного ила в аэротенках может быть увеличена в 10 и более раз по сравнению с установленным нормативом. Однако стандартные вторичные отстойники не в состоянии за 1,5 часа удержать дозу ила более 2–3 г/л.

На величину дозы ила в аэротенке оказывает влияние иловый индекс (мг/г), характеризующий седиментационную способность. Чем меньше иловый индекс, тем активнее ил осаждается во вторичном отстойнике и тем большую дозу ила можно поддерживать в аэротенках. Авторы [36] рекомендуют соотношения между иловым индексом (при концентрации ила 1 г/л) и дозой ила в аэротенках, приведенные в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Соотношение между иловым индексом и дозой ила в аэротенке

|                     |    |     |     |     |     |     |     |
|---------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Иловый индекс, мг/г | 50 | 80  | 120 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| Доза ила, г/л       | 6  | 4,3 | 3   | 2,5 | 2   | 1,5 | 1   |

При повышении дозы активного ила в аэротенке не сохраняется прямая пропорциональная зависимость между дозой и скоростью потребления загрязнений, так как при высоких концентрациях биомассы вокруг отдельных бактериальных клеток образуются микрозоны, до которых не доходят новые порции органических веществ. Чтобы устранить этот неблагоприятный эффект, необходимо интенсивно перемешивать стоки в аэротенке, разбивая хлопья ила и увеличивая тем самым поверхность раздела фаз, что ведет к повышению скорости очистки. Положительный эффект перемешивания оказывается и в избирательном воздействии на формообразование бактерий. При интенсивном перемешивании развиваются зооглейные и цилиндрические формы бактерий, обладающие самой высокой биохимической активностью [36].

Основным фактором, влияющим на жизнедеятельность микроорганизмов активного ила, является снабжение их кислородом. В процессе очистки стоков скорость растворения кислорода должна быть больше либо равна скорости его потребления микроорганизмами. В противном случае может произойти временный или локальный недостаток кислорода, который приведет к нарушению обмена веществ клетками и снижению скорости окисления загрязнений. Критическая концентрация кислорода изменяется в зависимости от размеров хлопьев активного ила. В работе [36] приведены данные, свидетельствующие о том, что снижение концентрации растворенного кислорода с 5 до 0,5 мг/л уменьшает скорость потребления кислорода хлопьями ила размером около 70 мкм на 50 %, а хлопьями ила размером около 30 мкм – лишь на 8 %. На рисунке 4.4 [36] приведена зависимость скорости потребления кислорода бактериальными клетками от его концентрации в стоках при значении константы  $K_m$ , равной 0,032 мгO<sub>2</sub>/л.

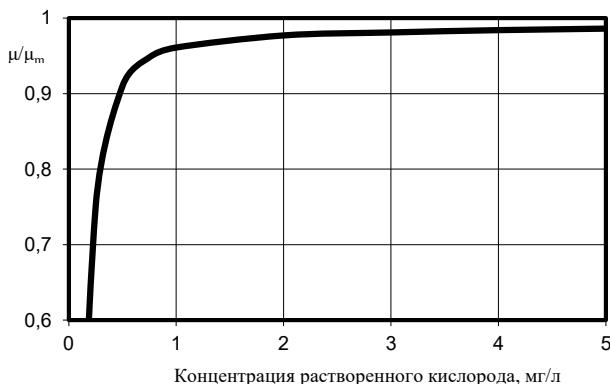


Рисунок 4.4 – Зависимость скорости потребления кислорода бактериальными клетками от его концентрации в стоках [36]

Из рисунка 4.4 видно, что скорость потребления кислорода при его концентрации 2 мг/л и более приближается к максимуму. Достаточно высока она и при концентрации 1 мг/л. При снижении концентрации растворенного кислорода менее 0,5 мг/л скорость потребления кислорода лавинообразно падает. По этим причинам рекомендуется [36] поддерживать концентрацию кислорода в аэротенке для обеспечения качественного процесса биохимической очистки стоков в пределах 1–2 мг/л. Низкая концентрация кислорода не только снижает скорость потребления кислорода, но и снижает степень переработки загрязнений. В этом случае лишь незначительная часть потребленного углерода переходит в протоплазму клетки, а большая часть остается в растворе в виде продуктов обмена.

Такое же сильное воздействие на процесс биохимической очистки оказывает недостаток биогенных веществ, основные из которых – азот, фосфор и калий. Отсутствие или недостаток этих элементов в очищаемых стоках ведет к ухудшению физических и биохимических свойств активного ила. При этом биогенные элементы легче усваиваются в том случае, когда они находятся в соединениях, аналогичных соединениям протоплазмы клетки: азот – в восстановленном до  $\text{NH}_4^+$ , а фосфор – в окисленном до  $\text{H}_3\text{PO}_4$  состоянии. Искусственная добавка биогенных веществ стимулирует рост бактерий и окисление органических веществ.

В работе [36] отмечено, что чем выше доза активного ила, тем дольше система может выдерживать отсутствие или недостаток биогенных элементов. Кроме этого, недостаток азота и фосфора в стоках ведет к образованию труднооседающего ила. Для технических расчетов потребного количества азота и фосфора можно воспользоваться соотношением [36]

$$\text{БПК : N : P} = 100 : 5 : 1.$$

Производственные сточные воды содержат, как правило, азот и фосфор в недостаточном количестве. Для доведения их содержания до оптимальных значений могут использоваться минеральные удобрения, но более дешевым их источником являются бытовые стоки.

Еще одним фактором, влияющим на жизнедеятельность микроорганизмов, является температура [36]. Повышение температуры с 20 до 37–40 °С ведет к увеличению окислительной способности на 60 %. Однако по ряду причин для большинства микроорганизмов активного ила оптимальная температура находится в пределах 20–30 °С. Низкие температуры ухудшают процессы нитрификации, флокуляции, повышают иловый индекс, а, следовательно, ведут к выносу взвешенных веществ из вторичных отстойников.

Отрицательное воздействие неблагоприятных температур усиливает отклонение pH от оптимальных значений. Наиболее эффективное действие активного ила наблюдается в интервале значений pH = 6,5...8,0 (даже в интервале pH = 5...9). Вне этих пределов эффективность активного ила резко снижается.

Ингибирующее действие на ферментативные реакции биохимической очистки оказывают соли тяжелых металлов, хлориды, токсичные органические соединения. При этом их действие не ограничивается только прямым снижением биохимической активности ила, но и ведет к его вспуханию.

Отрицательное воздействие на процесс очистки стоков в аэротенках оказывает повышенная минерализация. Принято считать верхним пределом минерализации содержание солей до 10 г/л [36]. При преимущественном поступлении в стоки хлоридов (за исключением хлорида магния), содержание солей допускается до 20 г/л.

Технологическим приемом, позволяющим интенсифицировать процесс биохимической очистки, является регенерация активного ила. Повышение производительности аэротенков в этом случае обусловлено следующими причинами [36]: окисление в регенераторе коагулированных илом нерастворенных органических веществ при более высокой в 3–4 раза, чем в аэротенке, дозе активного ила; увеличение числа жизнеспособных организмов в активном иле; отмирание в регенераторе образующихся при высоких нагрузках в аэротенке видов бактерий, препятствующих седimentации ила и снижающих его допустимую дозу.

Также оказывает влияние конструкция аэротенка. В аэротенке-вытеснителе, несмотря на сделанный выше вывод о «старении» активного ила от входа к выпуску данного типа сооружения, введение регенератора, в котором отсутствуют питательные вещества, ведет при неизменной массе активного ила к повышению доли жизнеспособных клеток, а, следовательно, к росту скорости окисления. Аэротенки-отстойники, в которых продолжительность пребывания ила в отстойной зоне мала, а также аэротенки-смесители, работающие с повышенным отбором возвратного ила, не требуют устройства регенератора, так как в них микроорганизмы постоянно находятся в стадии «молодости» [36].

Следует при этом иметь в виду, что длительный период регенерации (голодания) активного ила ведет к гибели клеток и снижает его способность удалять органические примеси.

Таким образом, проведенный выше анализ процессов, происходящих при биохимическом окислении органических веществ в стоках, физико-химических, биологических и конструктивных факторов, на них влияющих, показывает, что растворение кислорода в воде и интенсивное перемешивание стоков являются необходимыми условиями протекания эффективного процесса биохимической очистки. Обе эти функции выполняет система аэрации. Поэтому от технико-экономических показателей системы аэрации во многом зависит эффективность всего процесса биохимической очистки. Кроме этого, аэрация является самым действенным рычагом регулирования параметров данного процесса.

#### **4.6 Многоступенчатая схема биологической очистки**

Для очистки концентрированных сточных вод рекомендуется [37] экспериментально обоснованная многоступенчатая схема одно-, двух- и трехступенчатой очистки в аэротенках с пневматической аэрацией. Каждая ступень имеет свой илоотделитель, поэтому на всех ступенях формируется свой биоценоз активного ила, наиболее приспособленный к поступающим загрязнениям, что интенсифицирует процесс биологической очистки. В ходе проведенных исследований [37] время аэрации составляло 9–10 часов, а

доза ила изменялась в пределах 0,5–4,5 г/л. Время пребывания воды в илотделителях составляло 0,5 ч. В этих условиях время аэрации составляло: при одноступенчатой схеме – 9,5 ч; при двухступенчатой – по 4,5 ч на первой и второй ступенях; при трехступенчатой – по 2,5 ч на каждой ступени. Концентрация кислорода в аэротенках поддерживалась в среднем на уровне 1,9 мг/л. На рисунке 4.5 представлено снижение БПК<sub>5</sub> в зависимости от времени аэрации и дозы ила на трех ступенях очистки, а на рисунке 4.6 – зависимость снижения содержания биогенных элементов при одно-, двух- и трехступенчатой очистке, построенные по данным работы [37].

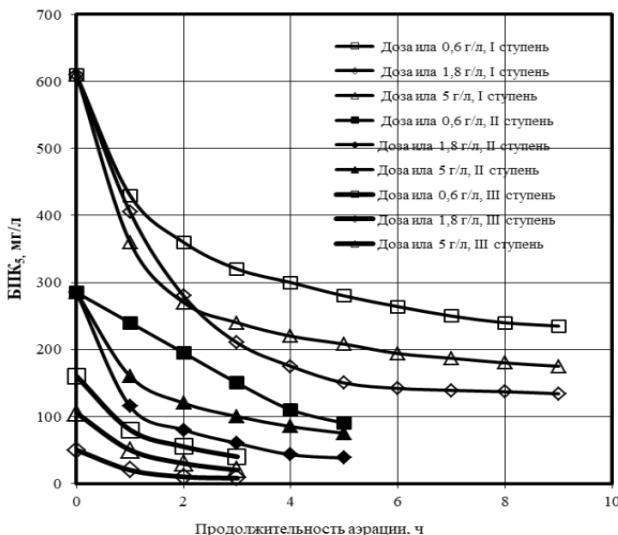


Рисунок 4.5 – Зависимость снижения БПК<sub>5</sub> от продолжительности аэрации и дозы ила на разных ступенях очистки концентрированных сточных вод [37]

Как видно из рисунков 4.5 и 4.6, многоступенчатая схема перспективна для очистки концентрированных сточных вод. Так, при одноступенчатой схеме очистки и периоде аэрации до 12 ч сточных вод рыбоперерабатывающего производства, характеризуемых следующими параметрами: БПК<sub>пол</sub> – 2200 мг/л; концентрация аммонийного азота – до 70 мг/л, а фосфора – до 31 мг/л; концентрация взвешенных веществ (включая жиры) – до 1900 мг/л, как показано в работе [37], эффективность очистки не превышает 70 %.

В результате проведенных теоретико-экспериментальных исследований [37] оптимизации дозы ила и продолжительности аэрации на каждой ступени очистки, даны рекомендации по оптимальным параметрам процесса, которые приведены в таблице 4.3.

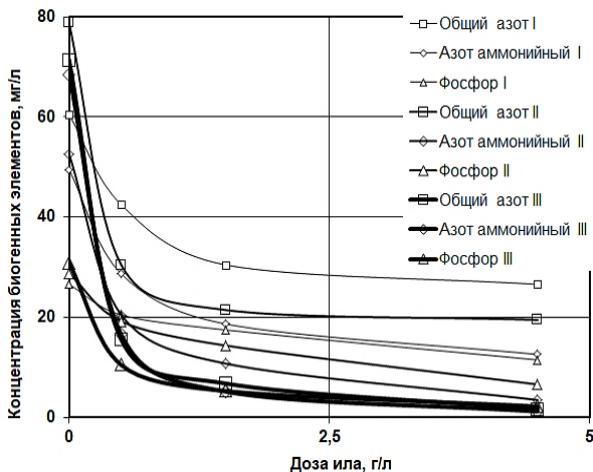


Рисунок 4.6 – Зависимость содержания биогенных элементов при одно- (I), двух- (II) и трехступенчатой (III) схемах биохимической очистки от дозы ила, построенная по данным работы [37]

**Таблица 4.3 – Оптимальные значения параметров технологии очистки стоков по многоступенчатым схемам [37]**

| Параметр ступени очистки                       | Схема очистки    |                 |
|--|------------------|-----------------|
|  | двуихступенчатая | трехступенчатая |
| I<br>Время аэрации, $T_{a1}$ , ч               | 6,33             | 3,28            |
| БПК <sub>вых1</sub> , мг/л                     | 200,0            | 300,0           |
| Доза ила, $a_1$ , г/л                          | 4,0              | 4,0             |
| Вынос ила, $a_{t1}$ , мг/л                     | –                | –               |
| Время пребывания в илоотборнике, $T_{o1}$ , ч  | 0,5              | 0,5             |
| Общее время: $T_1 = T_{a1} + T_{o1}$ , ч       | 6,85             | 3,78            |
| II<br>Время аэрации, $T_{a2}$ , ч              | 10,45            | 4,8             |
| БПК <sub>вых2</sub> , мг/л                     | 15,0             | 75,0            |
| Доза ила, $a_2$ , г/л                          | 2,5              | 4,0             |
| Вынос ила, $a_{t2}$ , мг/л                     | 15,0             | 40,0            |
| Время пребывания в илоотборнике, $T_{o2}$ , ч  | 2,15             | 1,03            |
| Общее время: $T_2 = T_1 + T_{a2} + T_{o2}$ , ч | <b>19,45</b>     | 9,61            |
| III<br>Время аэрации, $T_{a3}$ , ч             | –                | 3,75            |
| БПК <sub>вых3</sub> , мг/л                     | –                | 15,0            |
| Доза ила, $a_3$ , г/л                          | –                | 1,0             |
| Вынос ила, $a_{t3}$ , мг/л                     | –                | 15,0            |
| Время пребывания в илоотборнике, $T_{o3}$ , ч  | –                | 1,59            |
| Общее время: $T_3 = T_2 + T_{a3} + T_{o3}$ , ч | –                | <b>14,95</b>    |

Из таблицы 4.3 видно, что при переходе от двух- к трехступенчатой схеме изменяются и технологические параметры: периоды аэрации сокращаются примерно в 2 раза за счет возможности повышения выноса ила из илоотделителя II ступени с 15 до 40 мг/л; существенно уменьшается время пребывания в нем (с 2,15 до 1,03 ч); увеличивается доза ила в аэротенке II ступени с 2,5 до 4 г/л. Введение третьей ступени позволило сократить общее время пребывания воды в очистных сооружениях с 19,45 до 14,95 ч. В целом применение трехступенчатой схемы позволяет на 30 % сократить объемы сооружений по сравнению с двухступенчатой схемой.

## 4.7 Гидродинамика аэрируемых сооружений

Как показано выше, для нормального протекания процессов биохимической очистки требуется не только растворить кислород в воде для питания микроорганизмов активного ила, но и обеспечить его равномерное распределение по объему. Вынужденное движение жидкости в сооружениях с пневматической аэрацией возникает вследствие ввода энергии с потоком воздуха [38]. При этом, из-за низкой плотности воздуха по сравнению с водой, а также невысокой скорости воздушной струи, ее кинетическая энергия мала, а основным источником энергии является потенциальная энергия сжатия, необходимая для преодоления сопротивления пористого элемента аэратора и статического давления столба воды над ним. Физическим условием обмена энергией между газом и жидкостью является вязкое трение по поверхности раздела фаз. Обмен импульсом между генерируемыми пузырьками и жидкостью приводит к возникновению спутной струи в зоне подъема пузырьков. Пузырьки воздуха, попадая в воду, образуют над аэратором несколько расширяющийся по мере подъема водо-воздушный факел (рисунок 4.7), называемый ядром струи.

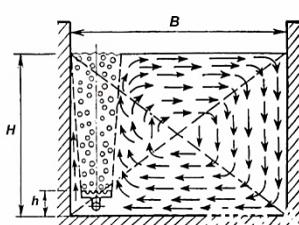


Рисунок 4.7 – Схема поперечного сечения потока в аэротенке с боковой установкой аэраторов

В работе [38] отмечено, что ядро струи, в котором сосредоточены практически все пузырьки воздуха, движется с максимальной скоростью, имеет форму конуса с углом раскрытия около  $10^\circ$ , причем скорость движения ядра возрастает с увеличением глубины слоя аэрируемой воды и зависит от нее сильнее, чем от расхода

Внешняя часть струи состоит из воды, которую эjectирует или увлекает в результате трения ядро струи. Движение ядра обусловлено разностью плотностей жидкости и газа, причем скорость движения пузырей в этих условиях равна сумме скоростей жидкой части струи и собственного движения пузырей под действием архимедовой силы.

В работе [38] отмечено, что ядро струи, в котором сосредоточены практически все пузырьки воздуха, движется с максимальной скоростью, имеет форму конуса с углом раскрытия около  $10^\circ$ , причем скорость движения ядра возрастает с увеличением глубины слоя аэрируемой воды и зависит от нее сильнее, чем от расхода

воздуха через аэратор. При расходе воздуха  $3,6\text{--}10,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$  и глубине погружения аэраторов на 4–5 м в аэротенке с шириной коридора 8–12 м газосодержание двухфазной среды, образующей восходящую струю, может достигать 1–5 %, а разность плотностей столба двухфазной среды и окружающей воды –  $10\text{--}50 \text{ кг/м}^3$  [38]. Такое различие в плотности ведет к появлению газлифтного эффекта. Вследствие взаимодействия восходящей струи с соседними слоями воды область восходящего потока распространяется до оси коридора. При этом симметрично этой оси возникает движение жидкости в нисходящем потоке, а в поперечном сечении коридора появляется циркуляционный поток.

При равномерном прямолинейном движении жидкости должно обеспечиваться равенство нормального давления и касательного трения. При уставновившейся циркуляции жидкости (вращательном движении) должен обеспечиваться принцип сохранения момента: крутящий момент, приложенный к жидкости относительно центра вращения, должен быть равен моменту сил гидравлического сопротивления относительно того же центра.

Поскольку движущая сила, создающая крутящий момент, возникает вследствие разности плотностей воды и водо-воздушной смеси, то, с учетом расширения воздуха, она может быть определена из соотношения [38]:

$$P_{\text{дв}} = g (\rho - \rho_{\text{ср}}) F_{\text{ср}} H, \quad (4.6)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{ср}}$  – средняя по высоте плотность водо-воздушной смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $F_{\text{ср}}$  – средняя площадь поперечного сечения водо-воздушной струи,  $\text{м}^2$ .

Плотность водо-воздушной смеси зависит от ее локального газосодержания  $\phi$ :

$$\rho_{\text{ср}} = \rho (1 - \phi). \quad (4.7)$$

Величина  $\phi$  может быть найдена из отношения приведенной скорости газа  $w'(h)$  на глубине  $h$ , определяемой из выражения

$$w(h) = \frac{V_r(h)}{F_{\text{ср}}}, \quad (4.8)$$

к скорости подъема пузырьков  $w$  [38]. Скорость подъема пузырьков в спутной струе равна скорости потока жидкости  $v_o$  и скорости движения пузырьков относительно жидкости – скорости всплыния  $w_{\text{вс}}$  [38]. Отсюда можно найти газосодержание  $\phi$ :

$$\varphi = \frac{w(h)}{w} = \frac{v_r(h)}{(w_{bc} + V_0)F_{cp}} . \quad (4.9)$$

Выражая расход газа на глубине  $h$  как

$$v_r(h) = v_r \frac{T}{293} \left[ \frac{P_a + \rho g H}{P_a + \rho g (H - h)} \right], \quad (4.10)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $T$  – температура воды, К;  $v_r$  – расход газа при нормальных условиях,  $\text{м}^3/\text{с}$ ; а также определяя среднее значение объемного расхода газа как

$$v_{cp} = \frac{1}{H} \int_0^H v_r(h) dh \quad (4.11)$$

получим

$$v_{cp} = v_r (1 - k_l), \quad (4.12)$$

где

$$k_l = 1 - \frac{P_a}{\rho g H} \frac{T}{293} \ln \left( 1 + \frac{\rho g H}{P_a} \right). \quad (4.13)$$

При глубине установки аэраторов 5 м поправка  $k_l$ , учитывающая изменение объема воздушной фазы по мере всплытия, может достигать значения 0,2 и должна учитываться в расчетах. Тогда с учетом (4.13) выражение (4.6) примет вид

$$P_{db} = \frac{\rho g k_l v_r H}{w_{bc} + v_0}. \quad (4.14)$$

Создаваемый силой  $P_{db}$  крутящий момент определяется из выражения (4.13) по формуле

$$M_{kp} = \frac{\rho g k_l v_r H B}{2(w_{bc} + v_0)}, \quad (4.15)$$

где  $B$  – ширина коридора аэротенка, м.

Из рисунка 4.7 видно, что момент гидравлического сопротивления создается вследствие касательных напряжений на стенках и днище аэротенка, а также сопротивления, возникающего из-за изменения направления потока. В работе [38] отмечено, что касательными напряжениями можно пренебречь, тогда приращение момента на элементарном участке сечения потока определяется выражением

$$dM = \xi \frac{\rho v^2(r)}{2} L r dr, \quad (4.16)$$

где  $L$  – длина коридора, м;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления на повороте;  $v(r)$  – локальное значение скорости потока на радиусе  $r$ , м/с. Профиль скорости  $v(r)$ , по данным работы [38], близок к квадратичной параболе и может быть описан уравнением

$$v(r) = v_{\max} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (4.17)$$

где  $R = 0,5\sqrt{H^2 + B^2}$ . Приняв значение  $\xi = 0,5$  [38] и проинтегрировав (4.16) получим

$$M_{\text{сопр}} = 0,2 \rho v_{\max}^2 L (H^2 + B^2). \quad (4.18)$$

Приравняв (4.15) и (4.18), приняв по рекомендациям [38]  $v_{\max} = v_o$ , получим уравнение, связывающее скорость восходящего потока в зоне аэрации с размерами аэротенка и удельным расходом воздуха:

$$(w_{bc} + v_0) v_0^2 = 2,5 \frac{\rho v_r}{L} \frac{HB}{H^2 + B^2}. \quad (4.19)$$

Для инженерных целей рекомендуется [38] пользоваться не численным расчетом уравнения (4.19), а построенным на его основе графиком (рисунок 4.8). При этом принимается [38], что скорость всплытия пузырьков  $w_{bc} = 0,34$  м/с, что справедливо для пузырьков диаметром более 10 мм, характерных для устаревших аэрационных систем – фильтросов, перфорированных труб и т. п. Для современных мелкопузырчатых аэраторов средняя скорость всплытия пузырьков может существенно отличаться от указанного значения и вносить значительные погрешности в расчеты. В следующем разделе будет это показано более подробно.

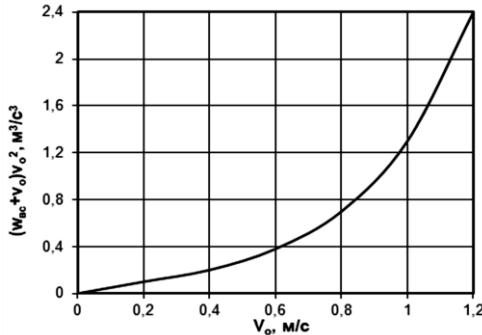


Рисунок 4.8 – Графическое решение уравнения (4.19) для определения скорости восходящего потока [38]

Для оценки циркуляционного расхода воды в аэротенке можно воспользоваться выражением [38]

$$q_{\Pi} = L \int_0^R V(r) dr = \frac{1}{3} V_0 L \sqrt{H^2 + B^2}. \quad (4.20)$$

В качестве примера в работе [38] приведен расчет скорости восходящего потока воды в аэротенке с аэрацией через фильтры. Ширина коридора – 10 м, длина – 100 м, рабочая глубина погружения – 5 м, расход воздуха на коридор – 10000 м<sup>3</sup>/ч. Расчетом по уравнению (4.19) с использованием графика рисунка 4.8 получено значение  $w_{bc} = 0,52$  м/с.

#### 4.8 Движение воздушных пузырьков в воде

Подробно данный вопрос освещен Г. С. Попковичем и Б. Н. Репиным в работе [39]. Ниже изложены некоторые положения указанной работы, а также результаты исследований авторов.

При малых скоростях истечения воздух поступает из отверстия аэратора, погруженного в воду, в виде последовательно отрывающихся от его поверхности пузырьков. Баланс сил в момент отрыва при условии пренебрежения влиянием конвективных токов, вязкости воды и гидравлического сопротивления в момент образования и роста пузырька можно записать в виде равенства архимедовой силы и силы поверхностного натяжения [39]:

$$\frac{\pi d_{\text{пуз}}^3}{6} (\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}}) = \pi d_{\text{пор}} \varphi_0 \sigma, \quad (21)$$

где  $d_{\text{пуз}}$  – диаметр воздушного пузырька в момент отрыва, м;  $\gamma_{\text{ж}}$  и  $\gamma_{\text{г}}$  – удельный вес воды и воздуха соответственно, Н/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{пор}}$  – размер поры аэратора, м;  $\phi_0$  – коэффициент сужения диаметра шейки пузырька перед его отрывом;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м.

Из выражения (4.21) можно оценить размер пузырьков

$$d_{\text{пуз}} = \sqrt[3]{\frac{6d_{\text{пор}}\phi_0\sigma}{\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}}}} \quad (4.22)$$

или получить выражение в безразмерном виде:

$$\frac{d_{\text{пуз}}}{d_{\text{пор}}} \approx 1,82 \sqrt[3]{\frac{\phi_0\sigma}{(\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}})d_{\text{пор}}^2}}. \quad (4.23)$$

Безусловно, выражения (4.22) и (4.23) получены при ряде допущений, принятых при составлении баланса сил (4.21). Действительные механизмы выделения воздуха из пор аэратора в воду значительно сложнее. Так, при увеличении напора воздуха под аэратором, а, следовательно, и его расхода через поры происходит стабилизация частоты генерации воздушных пузырьков. Очевидно, что при некотором значении скорости выделения пузырек формируется не на периметре поры, а на конце вытянутой струи [39]. Следует при этом ожидать, что и диаметр пузырька будет выше, чем при малых скоростях выделения воздуха.

Рассмотрим процесс всплыния пузырьков воздуха в воде [39].

Движение пузырька воздуха в воде от поверхности аэратора до выхода в атмосферу является результатом действия подъемной силы (архимедовой), обусловленной разностью плотностей воздуха и воды и преодолевающей силу гидравлического сопротивления движению. Условие равновесия этих сил можно записать следующим образом [39]:

$$\gamma_{\text{ж}}\psi \frac{w_{\text{вс}}^2}{2g} S = (\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}})V, \quad (4.24)$$

где  $\psi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $w_{\text{вс}}$  – скорость всплытия пузырька, м/с;  $S$  – площадь поперечного сечения пузырька, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем воздушного пузырька.

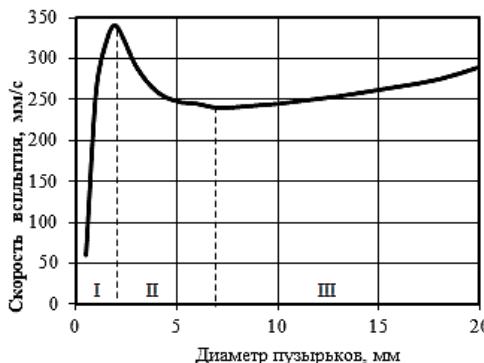
Решая (4.24) относительно  $w_{\text{вс}}$  и принимая, что для сферического пузырька  $S = \pi d_{\text{пуз}}^2 / 4$ ,  $V = \pi d_{\text{пуз}}^3 / 6$ , получим формулу Стокса [39]

$$w_{bc} = \sqrt{\frac{4g}{3\psi} \left(1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_{\infty}}\right) d_{\text{пуз}}} . \quad (4.25)$$

Если принять за характерный размер  $\delta$  пузырька любой несферической формы отношение его объема к площади поперечного сечения  $\delta = V / S$ , то выражение (4.25) можно записать в следующем виде:

$$w_{bc} = \sqrt{\frac{2g}{\psi} \left(1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_{\infty}}\right) \delta} . \quad (4.26)$$

Как видно из выражений (4.25) и (4.26), чем больше размер пузырька, тем выше скорость его всплытия. Однако границы применимости зависимости (4.25) согласно [8] – до размеров пузырьков 2 мм. На рисунке 4.9 приведена зависимость скорости всплытия пузырьков воздуха в воде от их размеров [39] при различных режимах течения.



I – ламинарный режим, сферическая форма, прямолинейная траектория;  
II – переходный режим, эллипсоидная форма, зигзагообразная траектория; III – турбулентный  
режим, грибовидная форма, траектория зависит от степени деформации сферы

Рисунок 4.9 – Зависимость скорости всплытия пузырьков от их размеров [39]

В выражениях (4.25) и (4.26) коэффициент гидравлического сопротивления  $\psi$  является функцией ряда величин:

$$\psi = f(Re); \quad Re = f_l(Ar), \quad (4.27)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса,  $Ar$  – число Архимеда. В свою очередь,

$$Re = \frac{w_{bc} \delta}{v_{\infty}} ; \quad Ar = \frac{g \delta^3}{v_{\infty}^2} \left( 1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_{\infty}} \right), \quad (4.28)$$

где  $v_{\infty}$  – кинематическая вязкость воды, Па·с.

Согласно фундаментальным законам гидравлики, для всплытия пузырьков воздуха в воде характерны 3 режима движения [39].

**Режим Стокса.** Воздушный пузырек сохраняет сферическую форму и у поверхности раздела фаз ведет себя как квазиверное тело.  $Re < 2$ ;  $\psi \sim Re^{-1}$ ;  $Re \sim Ar$ . В этом режиме скорость всплытия

$$w_{bc} \approx \frac{g \delta^3}{v_{\infty}} \left( 1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_{\infty}} \right). \quad (4.29)$$

**Режим Адамара – Рыбчинского,** или ламинарного пограничного слоя. Воздушный пузырек укрупнен, но сохраняет стабильную форму сферы или слабосплощенного сфериоида. В отличие от режима Стокса наблюдается свободное движение поверхности раздела фаз  $2 < Re < 500$ ;  $\psi \sim Re^{-0.5}$ ;  $Re \sim Ar^{0.75}$ . В этом случае скорость всплытия

$$w_{bc} \approx \delta^3 \sqrt{\frac{g}{v_{\infty}^2} \left( 1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_{\infty}} \right)}. \quad (4.30)$$

**Режим Тейлора,** или квадратичного сопротивления. Воздушный пузырек грибообразный, размеры и форма нестабильны.  $Re > 500$ ;  $\psi \sim Re \rightarrow 1$ ;  $Re \sim Ar^{0.5}$ . Для этого режима

$$w_{bc} \approx \sqrt{g \delta \left( 1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_{\infty}} \right)}. \quad (4.31)$$

Реально между режимами (4.29) и (4.31) может осуществляться режим течения, отличающийся от (4.30), поскольку зависимость  $\psi = f(Re)$  имеет более сложный вид, чем приведенные выше функции.

Важным фактором, влияющим на размеры воздушного пузырька, скорость всплытия и время пребывания в воде, является направление набегающего потока. Подробно этот вопрос также рассмотрен в работе [39]. При этом существуют два характерных режима, реализуемых в аэрируемых очистных сооружениях, – прямоточный (направления потока воды и движе-

ния пузырьков совпадают) и противоточный (направления потоков противоположны).

Выражение (4.21), связывающее архимедову силу с силой поверхностного натяжения, получено для условий неподвижного объема жидкости. С учетом движения потока в правую часть уравнения (4.21) добавится сила гидродинамического давления. Тогда (4.21) можно будет записать в виде [39]:

$$\frac{\pi d_{\text{пуз}}^3}{6} (\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}}) = \pi d_{\text{пор}} \Phi_0 \sigma \pm \gamma_{\text{ж}} \psi \frac{v_{\text{ж}}^2}{2g} S, \quad (4.32)$$

где  $v_{\text{ж}}$  – скорость потока жидкости, м/с. Знак «+» соответствует прямоточному режиму, а знак «–» относится к противоточному. С учетом  $S = \pi d_{\text{пуз}}^2 / 4$  (4.32) принимает вид

$$d_{\text{пуз}}^3 \pm d_{\text{пуз}}^2 \frac{3\psi v_{\text{ж}}^2 \gamma_{\text{ж}}}{4g(\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}})} - \frac{6d_{\text{пор}} \Phi_0 \sigma}{\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}}} = 0. \quad (4.33)$$

При этом знаки меняют свое соответствие: «–» относится к прямоточному режиму, а «+» к противоточному.

Приближенное решение уравнения (4.33) позволяет определить размер пузырька при его отрыве от поры аэратора при прямоточном и противоточном режиме:

$$d_{\text{пуз}} \approx \sqrt{\frac{6d_{\text{пор}} \Phi_0 \sigma}{\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}}} \pm v_{\text{ж}}^2 \frac{\psi \gamma_{\text{ж}}}{4g(\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}})}}. \quad (4.34)$$

Второй член в правой части уравнения (4.34), характеризующий динамическое воздействие потока на пузырек воздуха, при  $v_{\text{ж}} \rightarrow 0$  также стремится к нулю и выражение (4.34) принимает вид, близкий (4.21). При увеличении значения  $v_{\text{ж}}$  значение второго члена уравнения (4.34) резко возрастает. Поэтому в противоточном режиме, за счет суммирования двух членов правой части уравнения (4.34), размеры пузырьков будут увеличиваться пропорционально  $v_{\text{ж}}$  в квадрате. Безусловно, для технологии биохимической очистки этот эффект, впервые отмеченный Г. С. Попковичем и Б. Н. Репиным, нежелателен.

При установившемся движении воздушного пузырька в потоке воды архимедова сила уравновешивается силой гидродинамического сопротивления:

$$\gamma_{\text{ж}} \psi \frac{v^2}{2g} \frac{\pi d_{\text{пуз}}^2}{4} = \frac{\pi d_{\text{пуз}}^3}{6} (\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{г}})^3, \quad (4.35)$$

где  $v = w_{bc} \pm v_k$  – результирующая скорость подъема пузырька, равная разности (противоток) или сумме (прямоток) скорости всплытия пузырька и скорости потока воды. После преобразования (4.35) принимает вид

$$v = \sqrt{\frac{4g}{3\psi} \left(1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_k}\right) d_{\text{пуз}} \pm v_k} . \quad (4.36)$$

Среднее время пребывания пузырька в потоке жидкости  $t$  при глубине погружения аэратора  $h$  с учетом (4.36) можно определить по выражению

$$t = \frac{h}{\sqrt{\frac{4g}{3\psi} \left(1 - \frac{\gamma_r}{\gamma_k}\right) d_{\text{пуз}} \pm v_k}} . \quad (4.37)$$

Анализ выражения (4.37) показывает, что если в противоточном режиме  $w_{bc} \approx v_k$ , то знаменатель стремится к нулю, а значение  $t$  стремится к бесконечности. Таким образом, в противоточном режиме, несмотря на увеличение диаметра пузырька в момент его отрыва согласно (4.34), увеличивается и время его пребывания в воде согласно выражению (4.37). В прямоточном режиме увеличение  $v_k$  ведет к росту знаменателя (4.37) и сокращению времени газожидкостного контакта [39].

#### **4.9 Массоперенос кислорода из воздушного пузырька в воду**

Кислород является газом, малорастворимым в воде. Концентрация его насыщения в чистой воде при температуре 20 °C и нормальном давлении составляет 9,17 мг/л при содержании в воздухе 20,9 %.

Механизмом массопереноса кислорода из газовой фазы в жидкость является диффузия молекул. Она может быть молекулярной, конвективной и турбулентной. В работе [39] подробно рассмотрены вопросы массопереноса кислорода из пузырька в воду на основе различных теоретических предложений – пленочной теории Льюиса – Уитмена, теории пенетрации Хигби, теории обновления поверхности раздела фаз Данквертса, показаны их достоинства и недостатки, границы применимости, а также выполнены собственные расчеты. В работе [8] проведено исследование влияния на процесс массопереноса циркуляции внутри газового пузырька одновременного биохимического потребления и показано, что в этом случае известные уравнения Хигби дают удовлетворительное схождение с экспериментом.

На рисунке 4.10 [39, 40] представлена схема передачи кислорода из газового пузырька в процессе биохимической очистки.

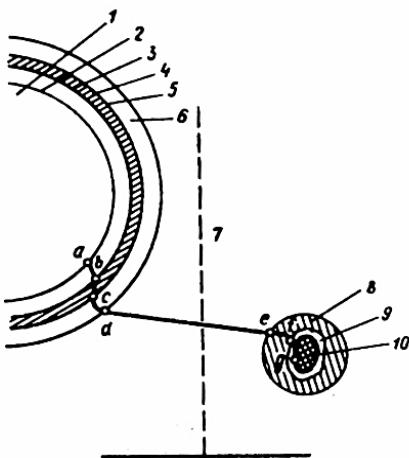


Рисунок 4.10 – Массоперенос кислорода в процессе биохимической очистки [39, 40]

Так, на участке «*a – d*», где заметную роль играют процессы молекулярной диффузии, скорость растворения кислорода зависит главным образом от площади поверхности раздела фаз, определяемой размерами пузырьков, а также наличия загрязнений в воде. На участке «*d – e*», имеющем пологий характер и отражающем влияние конвективной диффузии, концентрация кислорода меняется незначительно, так как гидродинамика очистных сооружений характеризуется развитой турбулентностью.

На участке «*e – g*» уклон профиля кислорода в установившемся режиме определяется скоростью его потребления микробиальной клеткой, зависящей, в свою очередь, от технологических нагрузок по органическим загрязнениям.

Кислород из газового пузырька 1 (см. рисунок 4.10) с граничной пленкой 2 через поверхность фазового контакта 3, дополнительную пленку 4, образуемую например ПАВ, границу раздела 5 и пограничный слой жидкости 6 переходит в основную массу перемешиваемой жидкости 7. Далее преодолевается пограничная пленка 8, клеточная оболочка 9 вокруг микробиальной клетки 10. Профиль концентрации изображает ломая линия «*a – g*», крутизна которой тем выше, чем выше сопротивление массопереносу на отдельных участках.

## **5 ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПЬЕВОЙ ВОДЫ**

---

### **5.1 Качество воды в природных источниках**

**П**риродные воды представляют сложную дисперсную систему, в состав которой входят соли (в виде ионов, молекул и комплексов), минеральные и органические вещества (в молекулярных соединениях, в коллоидном состоянии и взвеси), газы, гидробионты (планктон, бентос, нейстон, пагон), бактерии, вирусы и др.

Взвешенные вещества в природных водах представляют глинистые, песчаные, гипсовые и известковые частицы, а также коллоиды (вещества органического происхождения, кремнекислота, фульвокислоты, гуматы) [41–43]. Химический состав природных вод делится на пять групп (О. А. Алекин):

- ионы (натрий  $\text{Na}^+$ , магний  $\text{Mg}^{2+}$ , сульфаты  $\text{SO}_4^{2-}$ , карбонаты  $\text{CO}_3^{2-}$ , хлориды  $\text{Cl}^-$ , гидрокарбонаты  $\text{HCO}_3^-$ );
- растворенные газы (азот  $\text{N}_2$ , кислород  $\text{O}_2$ , оксид углерода  $\text{CO}_2$ , сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  и др.);
- биогенные элементы (соединения фосфора, азота, кремния);
- микроэлементы – соединения всех остальных химических элементов;
- органические вещества.

Классификация примесей воды из четырех групп, основанных на их фазовом состоянии и дисперсности, предложена Л. А. Кульским [41–45].

Примеси I группы представляют нерастворимые в воде суспензии и эмульсии, включая планктон и бактерии, кинетически неустойчивые и находящиеся во взвешенном состоянии. Попадают в воду вследствие эрозии контактирующих с водоемом пород и смыва с поверхности почв, в состоянии покоя выпадают в осадок.

Примеси II группы являются гидрофобные и гидрофильные органические и минеральные коллоидные частицы, а также детергенты и вирусы, которые по своим размерам близки к коллоидным примесям.

Примеси III группы – это молекулярно-растворенные вещества (органические соединения, растворимые газы и т. п.).

Примеси IV группы представляют вещества, диссоциированные на ионы. Устойчивость образующих гидрооксидов металлов прямо пропорциональна их заряду и обратно пропорциональна радиусу.

Концентрации отдельных примесей определяют свойства воды, т. е. ее качество. Различают следующие группы показателей качества воды:

- биологические (цветность, ХПК, БПК, перманганатная окисляемость);
- физические (температура, мутность и прозрачность, цветность, запах, вкус и др.);
- химические (жесткость, щелочность, активная реакция, окисляемость, сухой остаток и др.);
- бактериологические (общее количество бактерий, коли-индекс и др.).

Для определения качества воды проводят физические, химические, бактериологические и технологические анализы в специализированных лабораториях в наиболее характерные для конкретного источника периоды года.

## 5.2 Физические показатели качества воды

**Температура воды** для подземных вод характеризуется относительно постоянной величиной 8–12 °С, а для поверхностных – зависит от температуры воздуха и от сбросов различных видов хозяйственных и технологических стоков (0,1–30 °С). Рекомендуемое значение температуры воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения составляет 7–11 °С.

**Мутность воды** (мг/л) является одним из основных ее физических показателей и определяется специальными мутномерами. Включает практически все примеси, относящиеся к первой и второй группам (по Л. А. Кульскому). По нормативным показателям вода хозяйственно-питьевого назначения должна иметь мутность не более 1,5 мг/л.

Подземные воды обычно имеют малую мутность 0–10 мг/л (пробы воды, отобранные в начальный момент времени). Для поверхностных вод мутность различна и зависит от вида источника и от поры года (например, весенний или осенний паводки, зимний период). Наиболее чистыми являются горные реки. В озерах и водохранилищах мутность меньше, чем в реках. В поверхностных источниках Республики Беларусь мутность составляет 20–350 мг/л.

По мутности вода поверхностных источников может быть:

- маломутная – до 50 мг/л;
- мутная – до 250 мг/л;
- высокомутная – до 1500 мг/л;
- сверхмутная – выше 1500 мг/л.

**Цветность воды** обусловлена присутствием в воде гумусовых и дубильных веществ и других органических соединений, входящих в состав живых и растительных организмов и продуктов их жизнедеятельности. Этот показатель характеризует степень окрашиваемости воды. Например, при массовом развитии водорослей вода приобретает окраску от светло-зеленой до темно-буровой («цветение» водоемов).

Цветность воды измеряют в градусах по платиново-кобальтовой шкале (в воде питьевого качества она не должна превышать 20°) и определяют приборами, основанными на изменении оптической плотности воды. За 1 грамм принято условно растворение одного грамма кобальта и платины в одном литре воды.

По цветности различают воды:

- малоцветные – меньше 50°;
- цветные – меньше 100°;
- высокоцветные – меньше 300°;
- концентрированные цветные – выше 300°.

Наряду с этим окраску воде могут придавать и минеральные растворимые или нерастворимые вещества: соединения железа, марганца и др.

**Прозрачность** – субъективный показатель воды – может служить предварительной оценкой мутности и цветности в источнике водоснабжения. Определяется степенью видимости определенных символов от уровня воды в цилиндре и должна составлять не менее 30 см по «кресту» или 100 см по «шрифту Снеллена».

**Привкус и запах воды** могут быть естественного или искусственного происхождения. В последнем случае частой причиной является сброс различных категорий сточных вод.

Различают четыре основных вкуса воды: соленый (хлорид натрия), горький (сульфат магния), сладкий (фруктозы, сахарозы) и кислый (растворенная углекислота).

К запахам естественного происхождения относят землистый, рыбный, гнилостный, болотный, железистый и т. д., а к искусственным – хлорный, фенольный, аптечный, запах нефтепродуктов и т. д.

Интенсивность и характер этих показателей определяют органолептическим путем, т. е. с помощью органов чувств, по 5-балльной шкале (для населения – не более 2 баллов) или по «порогу разбавления» дистиллированной водой. При этом необходимо отдельно указывать характер привкуса и запаха (болотистый, железистый). По балльной системе:

- 0 баллов – не ощущается дегустатором;
- 1 балл – ощущается дегустатором, не ощущается потребителем;
- 2 балла – может слабо ощущаться потребителем;
- 3 балла и выше – сильно ощущается потребителем.

### 5.3 Химические показатели качества воды

**Стабильность воды.** Вода называется стабильной, если она не имеет коррозионных свойств или не выделяет в осадок  $\text{CaCO}_3$ , т. е. с одной стороны происходит коррозия металлов в водной среде, а с другой – отложение на стенках сооружений и коммуникаций углекислого кальция.

Оценка стабильности воды производится по соотношению

$$C = \frac{\text{Щ}_0}{\text{Щ}_{\text{обр}}} = 1 , \quad (5.1)$$

где  $\text{Щ}_0$  – щелочность исходной воды, мг-экв/л ( $\text{г-экв}/\text{м}^3$ );  $\text{Щ}_{\text{обр}}$  – щелочность воды, обработанной при ее водоподготовке различными реагентами, в результате чего происходят химические реакции, изменяющие щелочность воды, мг-экв/л ( $\text{г-экв}/\text{м}^3$ ).

Если величина С (5.1) меньше единицы, то вода имеет коррозионные свойства, а если больше единицы – вода выделяет осадок  $\text{CaCO}_3$ .

**Щелочность воды** – суммарное содержание соединений щелочных металлов (мг-экв/л), но в природных водах обычно представлена ионами калия и натрия с преобладанием последнего:

$$\text{Щ} = \frac{\text{Na}^+}{\text{eNa}} + \frac{\text{K}^+}{\text{eK}} . \quad (5.2)$$

Показатель (5.2) также определяется суммой содержащихся в воде гидроксильных ионов и анионов слабых кислот – угольной, органических, а также бикарбонатных и карбонатных ионов. Различают бикарбонатную, карбонатную и гидратную щелочность. Щелочность воды нормативными документами не регламентируется, но данный показатель оказывает большое влияние на стабильность воды и на процессы ее химической обработки.

**Активная реакция воды** (величина  $\text{pH}$ ) является показателем ее щелочности или кислотности и количественно характеризуется концентрацией водородных ионов. Этот показатель, как и щелочность, влияет на стабильность воды. Оценить стабильность воды при помощи величины  $\text{pH}$  можно следующим выражением (метод Ланжелье):

$$J = \text{pH}_0 - \text{pH}_s , \quad (5.3)$$

где  $J$  – индекс стабильности;  $\text{pH}_0$  – активная реакция исходной воды в нормальных условиях;  $\text{pH}_s$  – активная реакция воды, обработанной реагентами в процессе водоподготовки при равновесном ее насыщении карбонатом кальция. Если индекс стабильности  $J$  не равен нулю, то вода нестабильна.

Величина  $\text{pH}$  играет очень важную роль в процессах водоподготовки, так как химические соединения в зависимости от нее могут иметь различные формы. Величина  $\text{pH}$  воды изменяется от 0 до 14, при этом для нейтральной среды  $\text{pH} = 7$ , кислой –  $< 7$  и щелочной –  $> 7$ .

Природные воды по величине pH можно классифицировать следующим образом:

- кислые ( $\text{pH} = 1\ldots 3$ );
- слабокислые ( $\text{pH} = 4\ldots 6$ );
- нейтральные ( $\text{pH} = 7$ );
- слабощелочные ( $\text{pH} = 8\ldots 10$ );
- щелочные ( $\text{pH} = 11\ldots 14$ ).

Активная реакция природных вод обычно варьируется в пределах 6,5–8,5, что соответствует нормативам питьевой воды.

**Жесткость воды** (мг-экв/л) обусловлена наличием в ней кальция и магния:

$$Ж = \frac{\text{Ca}^{2+}}{20} + \frac{\text{Mg}^{2+}}{12}. \quad (5.4)$$

Различают карбонатную, некарбонатную и общую жесткость воды (41). Карбонатная жесткость обусловлена содержанием в воде карбонатных и бикарбонатных солей кальция и магния. Некарбонатная жесткость обусловлена кальциевыми и магниевыми солями серной, соляной, кремниевой и азотной кислот. Жесткость природных вод не является вредной для здоровья человека, а скорее наоборот, кальций способствует выводу из организма кадмия, отрицательно влияющего на сердечно-сосудистую систему. Но повышенное значение жесткости делает воду непригодной для хозяйствственно-бытовых нужд и приводит к значительному расходу моющих средств.

Согласно ГН-3 от 25.01.2021 № 37 Гигиенический норматив «Показатели безопасности питьевой воды» в воде питьевого качества норма общей жесткости установлена 7 мг-экв/л, но кратковременно может быть разрешено до 10 мг-экв/л.

Жесткость воды ограничивается в питательной воде котлов, так как соли кальция и магния образуют накипь на стенах котлов, что приводит к снижению их экономичности, а иногда к авариям. Жесткость воды лимитируется при использовании ее на предприятиях бумажной и текстильной промышленности, при производстве искусственного волокна, в добавочной воде оборотных систем водоснабжения и т.п. Для подземных источников общая жесткость, как правило, высокая и представлена, в основном, бикарбонатными анионами (карбонатная жесткость), а для поверхностных вод – наоборот, обычно малая и представлена некарбонатной жесткостью.

**Железо и марганец** присутствуют в природных водах в многовалентных формах, зависящих от величины pH, щелочности, окисляемости, содержания диоксида углерода и т. д. Общая концентрация железа представляет сумму двух- и трехвалентных ионов. В воде подземных источников железо содержится в двухвалентной форме (гидрокарбоната, гидроксида и сульфида железа, реже – различных органических комплексов), около 60–90 % от

общего железа. Практически на всей территории Республики Беларусь вода подземных источников содержит повышенную концентрацию растворенного железа. Марганец содержится в двухвалентной форме, в основном в виде оксида.

Учитывая действие кислорода в воздухе, что характерно для поверхностных водных источников, основной формой содержания железа являются трехвалентные ионы (солей, органических и неорганических комплексных соединений, коллоидных частиц или тонкодисперсных взвесей), а марганца – четырех- или шестивалентные ионы. Обычно содержание железа и марганца в природных водах не превышает нескольких десятков мг/л, но в шахтных водах может достигать нескольких сотен мг/л и более. Повышенная концентрация соединений железа в воде:

- влияет на здоровье людей; длительное употребление воды человеком может привести к заболеванию печени (гемосидерит), увеличивает риск инфарктов, негативно влияет на репродуктивную функцию организма;
- придает окраску воде, а также железистый привкус, что делает ее непригодной для питьевых целей;
- придает окраску санитарным приборам, что нежелательно;
- способствует образованию железобактерий, особенно в кислых средах, продукты которых в виде твердых отложений прикрепляются на стенках коммуникаций, уменьшая площадь живого сечения труб;
- отправляет фильтрующие материалы органического происхождения, например, ионообменные смолы при умягчении и обессоливании воды.

Избыток марганца вызывает окраску и вяжущий привкус, заболевание костной системы, развитие марганцовокислых бактерий.

Отечественными санитарными нормами установлены предельно допустимые концентрации в питьевой воде для железа – 0,3 мг/л и марганца – 0,1 мг/л. Эти значения соответствуют рекомендациям Всемирной организации здравоохранения, стандартам США и некоторых других стран. Наиболее жесткие нормы приняты в Швеции и в некоторых странах Европейского сообщества до 0,2 и 0,05 мг/л соответственно.

Содержание железа и марганца строго ограничено в воде, используемой при производстве пластмасс, кино-, фотопленки и бумаги, в текстильной, пищевой промышленности и т. п.

**Фтор** в природных водах Республики Беларусь обычно характеризуется малым содержанием (до 0,5 мг/л), хотя в некоторых случаях его концентрация может быть 10–15 мг/л. Является активным в биологическом отношении микроэлементом, содержание которого в воде питьевого качества во избежание кариеса или флюороза рекомендуется в пределах 0,7–1,5 мг/л.

**Йод** в природных водах обычно находится в ничтожно малых концентрациях. Является очень важным биологическим микроэлементом, содержание которого в питьевой воде не должно превышать  $10^{-8}$  мг/л во избежание эндемического зоба.

**Бор и бром** также являются важными биологическими микроэлементами. Их содержание в питьевой воде не должно превышать соответственно 0,5 и 0,2 мг/л. В подземных водах их концентрации достигают 8–12 мг/л. Бор в питьевой воде в концентрации выше ПДК негативно воздействует на организм человека, ухудшая обмен веществ, вызывает заболевание печени и желудочно-кишечного тракта. Повышенное содержание брома в питьевой воде влияет на изменение скорости импульса по нервным волокнам, отрицательно сказывается на функции печени и почек, обуславливает снижение калия в крови и увеличивает содержание азота (мочевины).

**Ионный состав воды** обусловлен содержанием растворенных веществ в воде и включает две группы: катионы и анионы.

Основные катионы, представленные в воде, это  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , а анионы:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ ; концентрация перечисленных ионов составляет более 95 % от общего количества ионов, присутствующих в природных водных источниках (не подверженных антропогенному и техногенному вмешательству).

Ионный состав влияет на величину pH и стабильность воды.

Сумма катионов и анионов (мг/л) определяет **общее солесодержание воды**. По этому показателю воды подразделяются следующим образом: пресные (до 1000 мг/л, эта же величина является нормативом для питьевой воды), малосоленые (до 2500 мг/л), соленые (до 10000 мг/л), сильносоленые или концентрированные (до 30000 мг/л), сверхконцентрированные (до 40000 мг/л) и рассолы (свыше 40000 мг/л).

В ионном составе воды большую роль играют **хлориды и сульфаты**, которые благодаря высокой растворимости присутствуют во всех природных водах обычно в виде натриевых, кальциевых и магниевых солей. При значительном содержании в воде хлориды ( $>350$  мг/л) и сульфаты ( $>500$  мг/л) являются причиной ее агрессивности по отношению к бетону. Воды, содержащие свыше 250 мг/л сульфат-ионов, оказывают разрушающее действие на бетонные конструкции вследствие образования гипса (результат реакции между сульфатами и известью цемента), что вызывает увеличение объема и образование трещин в бетоне. Присутствие в воде значительных количеств хлор-иона ведет к выщелачиванию и разрушению бетонного камня вследствие образования с известью растворимых хлоридов магния и кальция. Также повышенное содержание в воде хлоридов и сульфатов препятствует ее использованию как для питания паровых котлов, так и для производства полимеров, синтетического каучука, бумаги и др.

Присутствие в питьевой воде больших количеств сульфата и хлорида натрия нарушает деятельность желудочно-кишечного тракта, кроме этого, сульфаты и хлориды магния и кальция обуславливают некарбонатную жесткость воды. Сульфаты в количестве свыше 500 мг/л придают воде горький вкус.

**Растворенные газы** могут присутствовать в подземных и поверхностных источниках, они способны выделяться из воды самостоятельно либо под действием принудительных аэрационных или окислительных процессов. Наиболее распространенными растворенными газами являются углекислый газ, сероводород, кислород, азот, метан.

Концентрация углекислого газа в воде нормативно не регламентируется, но его содержание влияет на величину pH и стабильность воды. Этот газ является производным угольной кислоты  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (неустойчивое соединение) и в зависимости от pH воды может присутствовать в ней в виде свободной углекислоты, представляющей растворенный в воде газ  $\text{CO}_2$ , полусвязанной углекислоты (в виде бикарбонат-ионов  $\text{HCO}_3^-$ ) и связанной углекислоты (в виде карбонат-ионов  $\text{CO}_3^{2-}$ ):



Сумма соединений  $\text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$  в воде должна быть постоянной и называется уравнением карбонатного равновесия. Любое нарушение этого равновесия делает воду нестабильной. Например, повышенное содержание агрессивной углекислоты ( $\text{CO}_2 + \text{HCO}_3^-$ ) приводит к коррозионным свойствам воды: углекислота растворяет карбонат кальция, разрушающее воздействует на бетон и катализирует ход электрохимической коррозии металла.

Как правило, в поверхностных водах присутствие агрессивной углекислоты очень мало, а в подземных водах может быть значительным.

**Сероводород** может присутствовать как в поверхностных источниках (реки и озера болотного питания), так и в подземных водах, и встречается органического (продукт распада органических соединений) и неорганического (продукт растворения минеральных солей – серного колчедана, гипса и др.) происхождения.

Повышенная концентрация сероводорода (нормативное значение до 0,5 мг/л) из-за резкого неприятного запаха делает воду непригодной для питья, способствует коррозии металла, вызывает зарастание трубопроводов в результате интенсивного развития серобактерий. Формы сероводорода в зависимости от величины pH могут быть представлены в воде слабодиссоциированной кислоты  $\text{H}_2\text{S}$ , гидросульфидных  $\text{HS}^-$  или сульфидных  $\text{S}^{2-}$  ионов, что влияет на процесс их удаления из воды.

**Кислород** попадает в воду при ее контакте с воздухом. В артезианских водах кислород отсутствует, а в поверхностных его концентрации довольно велики. В поверхностных водах содержание кислорода меньше теоретического за счет «дыхания» различных организмов, брожения, гниения органи-

ческих остатков и т. п. Резкое снижение содержания кислорода в воде указывает на ее загрязнение. Растворенный в воде кислород интенсифицирует коррозию металла, поэтому в питательной воде теплоэнергетических установок наличие кислорода строго ограничено.

**Азот** в природные воды поступает из воздуха, при разложении органических остатков, а также при восстановлении соединений азота денитрифицирующими бактериями. Образующийся в воде в процессе гниения растений аммиак существенно влияет на технологию хлорирования воды.

**Метан** присутствует в природных водах, используемых для водоснабжения, как правило, в незначительных количествах. Однако в болотных водах, где в больших объемах протекают процессы разложения клетчатки растительных остатков, содержание метана доходит до 30 мг/л и более.

**Окисляемость воды** характеризует количество кислорода в мг/л, эквивалентное расходу окислителя, необходимого для окисления примесей в данном объеме; обусловливается присутствием органических и некоторых легкоокисляющихся неорганических примесей, таких, как железо (II), сульфиты, сероводород и др. В зависимости от применяемого окислителя различают перманганатную и бихроматную окисляемость. При этом окисляемость 1 мг  $O_2$ /л соответствует окисляемости 0,253 мг  $KMnO_4$ /л.

Артезианские воды характеризуются низкой окисляемостью (около 2 мг  $O_2$ /л), а окисляемость грунтовых вод зависит от глубины их залегания. Окисляемость воды озер составляет до 8 мг  $O_2$ /л, рек – до 60 мг  $O_2$ /л, а окисляемость болотных вод достигает 400 мг  $O_2$ /л.

Повышенное значение отношения цветности к окисляемости указывает на преобладание в воде устойчивых гумусовых веществ болотного происхождения, а пониженное – гумусовых веществ планктонного происхождения. Промежуточное значение этого отношения указывает на преобладание почвенного гумуса. Характерно, что окисляемость воды после коагулирования, отстаивания и фильтрования снижается меньше, чем цветность.

В воде питьевого качества окисляемость не лимитируется. Но для питательной воды котлов (из-за ее вспенивания), охлаждающей воды (из-за возможного биообразования труб и аппаратуры), а также для воды, используемой при изготовлении синтетических волокон и некоторых пластмасс, эта величина имеет ограничения.

**Азотсодержащие вещества** (ионы аммония, нитраты и нитриды) образуются в воде в результате восстановления нитритов и нитратов железом (II), сероводородом, гумусовыми веществами и т. п., либо разложения белковых соединений, вносимых в водоем со сточными водами. В последнем случае вода опасна в санитарном отношении. Наличие в питьевой воде более 45 мг/л нитратов приводит к нарушению окислительной функции крови, известной под названием метгемоглобинемии, способствует образованию злокачественных опухолей.

**Соединения кремния** встречаются в природных водах в форме органических и минеральных соединений. Количество кремния в воде поверхностных источников невелико и изменяется от десятых долей до нескольких мг/л. В подземных водах оно может достигать несколько десятков мг/л. Содержание кремния в питьевой воде не лимитируется, но в питательной воде котлов высокого давления оно недопустимо из-за возможности образования плотной силикатной накипи.

**Фосфор** встречается в природных водах в виде соединений минерального и органического происхождения, а также ионов ортофосфорной кислоты или сложного органического комплекса. В природных водах соединения фосфора присутствуют в малых количествах, но оказывают существенное влияние на водную растительность. Концентрация соединений фосфора в питьевой воде не регламентирована.

**Ядовитые, токсические и радиоактивные вещества** – мышьяк, стронций, бериллий и т. д., а также уран, радий и другие представляют большую группу веществ, которые обычно попадают в водоемы со сбросом сточных вод. Содержание их в питьевой воде ограничено ГН-3 от 25.01.2021 № 37 Гигиенический норматив «Показатели безопасности питьевой воды».

## 5.4 Биологические и бактериологические показатели воды

Общую концентрацию органических веществ принято оценивать такими показателями, как цветность, ХПК, БПК, перманганатная окисляемость. При этом ХПК и БПК не должны превышать 2–3 мг/л. Если эти величины выше указанных значений, то вероятнее всего происходит загрязнение водоемов неочищенными сточными водами.

**Гидрофлора** водоемов открытых источников определяется макро- и микрофитами. К первым относится высшая водная растительность, а ко вторым – водоросли (фитопланктон и фитобентос). При отмирании и разложении макрофитов вода обогащается органическими веществами, а появляющиеся пахнущие вещества ухудшают органолептические показатели качества воды. Микрофиты, подразделяемые на зеленые, сине-зеленые, диатомовые и другие, не только поглощают углекислоту, кислород (а сине-зеленые – азот, включая аммиак), но и продуцируют кислород. Массовое развитие микрофитов в отдельные периоды цветения воды значительно осложняет технологию улучшения ее качества, особенно для питьевых целей, так как возникает необходимость в дезодорации и микрофильтровании воды.

**Гидробионты**, населяющие природные воды, в процессе жизнедеятельности влияют на состав и качество воды. Они делятся следующим образом:

– планктон (обитатели, пребывающие в толще воды от дна до поверхности);

- бентос (обитатели, находящиеся на дне водоема);
- нейстон (организмы, населяющие поверхностную пленку воды и адаптировавшиеся к жизни в специфических условиях ее поверхностного натяжения);
- пагон (организмы: моллюски, ракообразные, коловратки и т. д.).

**Патогенные кишечные простейшие:** лямблии, балантидии, дизентерийные амебы, криптоспоридии определяют зараженность питьевой воды в паразитарном отношении. Бактерии и вирусы из числа патогенных, т. е. паразиты, живущие на живом субстрате, развиваются в воде, могут вызвать заболевания брюшным тифом, амебиазом, паратифом, дизентерией, бруцеллезом, инфекционным гепатитом, острым гастроэнтеритом, сибирской язвой, холерой, полиомиелитом, туляремией, туберкулезом, диареей и др.

**Вирусы** – мельчайшие живые существа, внутриклеточные паразиты. Среди них встречаются бактериофаги, паразитирующие в клетках бактерий и вызывающие их разрушение и гибель.

Поскольку при биологическом анализе воды определение патогенных бактерий затруднено, бактериологический анализ сводится к нахождению общего числа бактерий в 1 мл воды, растущих при 37 °С, и кишечной палочки – бактерии коли. Наличие последней имеет индикаторные функции, т. е. свидетельствует о загрязнении воды выделениями людей, животных и т.п. Минимальный объем испытуемой воды, мл, приходящейся на одну кишечную палочку, называется коли-титром, а количество кишечных палочек в 1 л воды – коли-индексом. Допускается коли-индекс до 3, коли-титр – не менее 300, а общее число бактерий в 1 мл – до 100.

## 5.5 Требования к качеству и составу воды

В зависимости от целевого назначения к воде предъявляют требования, в соответствии с которыми ее можно классифицировать как используемую для хозяйствственно-питьевых целей, коммунальных предприятий, пищевой и некоторых других отраслей промышленности; для охлаждения (технологического оборудования, продуктов, доменных и марганцовских печей, турбин и паровых машин и др.); для нужд паросилового хозяйства (питание паровых котлов ГРЭС и ТЭЦ); для технологических нужд промышленности, где вода может входить в состав продукции или контактировать с ней; для заливания нефтяных пластов; нужд сельского хозяйства и т. д. Вода хозяйствственно-питьевого назначения должна быть безвредна для здоровья человека, иметь хорошие органолептические показатели и быть пригодной для использования в быту [45, 46].

Качество хозяйствственно-питьевой воды регламентировано ГН-3 от 25.01.2021 №37 Гигиенический норматив «Показатели безопасности питьевой воды», основные показатели ее следующие:

|  |         |
|--|---------|
| Мутность, мг/л.....                      | до 1,5  |
| Цветность, °С.....                       | до 20   |
| Запахи и привкусы при 20 °С, баллов..... | до 2    |
| Водородный показатель.....               | 6,5–8,5 |
| Общая жесткость, мг-экв/л.....           | до 7    |
| Содержание, мг/л:                        |         |
| железо.....                              | до 0,3  |
| бром.....                                | до 0,2  |
| бор.....                                 | до 0,5  |
| хлориды.....                             | до 350  |
| сульфаты.....                            | до 500  |
| марганец.....                            | до 0,1  |
| сухой остаток (общее солесодержание)...  | до 1000 |
| Общее количество бактерий в 1 мл.....    | до 100  |
| Коли-индекс.....                         | до 3    |

Ряд отраслей пищевой промышленности предъявляют к воде дополнительные требования. В воде, используемой в пивоварении, должны отсутствовать сульфаты, содержание железа не должно превышать 0,1 мг/л; в воде для винокуренного производства не должны содержаться хлориды магния и кальция; в воде для сахарного производства должно быть минимальное солесодержание и т. д.

Охлаждающая вода применяется для охлаждения непрерывно работающих агрегатов или для отведения теплоты от производственных продуктов. Использование воды при охлаждении может быть прямоточным, т. е. после однократного применения производится ее сброс в водоем, или с ее возвратом и многократным применением (оборотные и повторно используемые системы). Качество и состав охлаждающей воды зависит от условий применения, например, охлаждающая вода не должна давать отложений в трубах и аппаратах, по которым подается, так как они затрудняют теплопередачу и сокращают живое сечение, снижая интенсивность циркуляции и эффект охлаждения. Охлаждающая вода не должна содержать крупных минеральных взвешенных веществ, большого количества железа и органических веществ во избежание засорения или биообрастания трубок холодильных аппаратов и конденсаторов. Вода для технологических нужд промышленности в зависимости от целевого использования должна отвечать разным требованиям. Так, в воде, используемой в горнодобывающей промышленности при добыче, отмывке, гидротранспорте, обогащении и сортировке полезных ископаемых, должны отсутствовать грубые взвешенные частицы.

Вода для заводнения нефтяных пластов не должна вызывать застарение или закупорку отверстий фильтров скважин и не должна кольматировать поры нефтеносной породы в результате образования нерастворимых соединений при взаимодействии с пластовой водой и частицами породы, а также

при изменении температуры. Поэтому в закачиваемой воде должно содержаться не более 0,2 мг/л железа, 1 мг/л взвешенных веществ, 1 мг/л нефтепродуктов и др. Бикарбонаты в закачиваемой воде должны содержаться в минимальной концентрации, так как при их распаде, который происходит при нагреве воды, образуется осадок карбоната кальция. Аналогичные явления наблюдаются, когда в закачиваемой воде присутствует растворенный кислород, который, оксидаируя железо (II) и сероводород, присутствующие в пластовой воде, способствует кольматации пор породы. Эти вопросы по качеству закачиваемой воды должны решаться индивидуально в зависимости от свойств пластовой воды, пористости призабойных зон и др.

Весьма специфические требования предъявляют к воде, применяемой для обработки готовой продукции, а также к входящей в состав продукта. В воде, идущей на изготовление кино- и фотопленки, фотобумаги, не должно содержаться марганца, железа, кремнекислоты, ограничивается окисляемость воды и содержание хлоридов. В воде, применяемой для изготовления растворов кислот и щелочей, красителей и мыла, жесткость должна быть не более 0,35 мг-экв/л.

Вода для нужд сельского хозяйства (птице- и зоофермы, для орошения, мелиорации и др.) по качеству должна соответствовать целевому назначению. Нормы качества воды принимают адекватно виду и возрасту животных. Например, для водопоя птиц, зверей и животных на фермах желательно подавать воду питьевого качества. Водопой животных и птиц водой непитьевого качества в каждом конкретном случае должен быть согласован с органами ветеринарного надзора.

## 6 МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ИЗ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ

---

**Н**аличие в поверхностных и подземных водных источниках широкой гаммы загрязнителей различной природы, описанное в предыдущих главах, ведёт к не меньшему разнообразию методов очистки воды от них, которые можно классифицировать следующим образом:

- физические;
- химические;
- физико-химические;
- биологические.

Каждая из групп включает множество конкретных вариантов реализации процесса очистки и его аппаратного оформления. Так же необходимо учитывать, что очистка воды, как правило, – комплексная задача, требующая для успешного решения комбинации различных методов [41, 47].

### **Физические методы очистки воды**

В основе физических способов очистки воды лежат физические явления, которые используются для воздействия на воду или содержащиеся в ней загрязнения. При очистке больших объёмов воды эти методы используются преимущественно для удаления достаточно крупных твёрдых включений и выступают в качестве предварительной стадии грубой очистки, призванной снизить нагрузку на последующие стадии тонкой очистки. В то же время существует ряд физических методов, способных проводить глубокую очистку воды, но, как правило, производительность таких методов мала.

К основным физическим методам очистки воды относят:

- процеживание;
- отстаивание;
- фильтрование (в том числе центробежное);
- ультрафиолетовую обработку.

**Процеживание** представляет пропускание очищаемой воды через разные решётки и сита, на которых происходит задержание крупных частиц. Этот метод относится к грубой очистке и часто выступает в качестве предварительной стадии. Его назначение – удалить из очищаемой воды легко отделяемые механические загрязнители для снижения нагрузки на очистные сооружения и обеспечить работоспособность установок на следующих стадиях тонкой очистки, которые могут выйти из строя из-за попадания крупных механических включений.

**Отстаивание** заключается в отделении части механических загрязнений, прошедших сквозь решётки и сита, из воды под действием сил гравитации, заставляющих частицы опускаться на дно, образуя осадок. Отстаивание может выступать как в качестве предварительной стадии очистки, на которой отделяются наиболее крупные загрязнители, так и в качестве промежуточных стадий. Данный процесс осуществляется в отстойниках – резервуарах, снабжённых устройствами для удаления осадка, время пребывания воды в которых рассчитывается из условия полного осаждения всех загрязняющих частиц.

**Фильтрование** осуществляется при прохождении очищаемой воды, преимущественно после отстаивания, через пористый слой фильтрующего материала, на котором происходит задержание частиц определённого размера. Фильтрация позволяет удалять такие загрязнения как ил, песок, окалина, а также разные твёрдые включения размером до нескольких микрометров. Кроме этого, с помощью фильтрации можно улучшить органолептические качества воды. Механическая фильтрация получила широкое распространение, как в крупных установках водоочистки, так и в бытовых фильтрах малой производительности.

**Ультрафиолетовая дезинфекция** воды хоть и не производит непосредственно очистку, но все более широко применяется в водоподготовке и заключается в обработке уже предварительно очищенной воды ультрафиолетовой (УФ) частью спектра света (используется диапазон волн длиной 200–400 нм) для обеззараживания воды. Гибель живых организмов при воздействии УФ-излучения наступает вследствие повреждений молекул ДНК и РНК, что вызвано фотохимическими реакциями, возникающими в их структуре. Преимуществами такого способа обеззараживания является независимость процесса от состава воды и сохранение этого состава после УФ-обработки. Тем не менее необходимо учитывать наличие в воде твёрдых примесей, способных оказывать экранирующий эффект по отношению к излучению.

#### **Химические методы очистки воды**

Методы основаны на химическом взаимодействии определённых веществ (реагентов) с загрязнителями, которые в результате либо разлагаются на неопасные компоненты, либо переходят в иное состояние (например, образуют нерастворимые соединения, выпадающие в осадок). Несмотря на огромное разнообразие загрязнителей и возможных с ними химический реакций, выделяют ряд способов очистки, принципиально отличающихся по типу химического взаимодействия:

- нейтрализация;
- окисление;
- восстановление.

**Нейтрализация** заключается в выравнивании кислотно-щелочного баланса за счёт взаимодействия кислот и щелочей с образованием соответствующих солей и воды. Нейтрализацию проводят как путём смешивания очищаемых

вод с кислой или щелочной средой, так и путём добавления реагентов, создающих в воде определённую среду (кислую или щелочную). Для нейтрализации кислых вод обычно используют аммиачную воду ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), гидроксиды натрия и калия ( $\text{NaOH}$  и  $\text{KOH}$ ), кальцинированную соду ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), известковое молоко ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) и др. В случае щелочных вод применяют разные растворы кислот, а также кислые газы, содержащие такие оксиды как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ .

**Окисление и восстановление** также используется для очистки воды, хотя как правило, соотношение их использования сильно смешено в сторону окислителей. Несмотря на то, что в реакции нейтрализации также параллельно протекают процессы окисления и восстановления, данный метод отличается использованием более сильных окислителей и восстановителей, так как целевые загрязнители просто не будут вступать в реакцию с веществами, используемыми в методе очистке нейтрализацией. С их помощью проводят обезвреживание разных токсичных веществ и также веществ, трудно извлекаемых из воды иными способами. Осуществлением реакций окисления добиваются переведения токсичных загрязнителей в менее токсичные или нетоксичные формы. Также за счёт использования сильных окислителей достигается гибель микроорганизмов, наступающая вследствие окисления клеточных структур. В основном применяют хлорсодержащие соединения: газообразный хлор ( $\text{Cl}_2$ ), диоксид хлора ( $\text{ClO}_2$ ), гипохлориды калия, натрия и кальция ( $\text{KClO}$ ;  $\text{NaClO}$ ;  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ). Также используют перекись водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), перманганат калия ( $\text{KMnO}_4$ ), озон ( $\text{O}_3$ ), кислород воздуха ( $\text{O}_2$ ), дихромат калия ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) и т. д.

Хлорирование – обработка хлорсодержащими соединениями для обеззараживания воды более 100 лет широко применяется в водоподготовке. Обработка хлором обладает также пролонгированным бактерицидным действием, что особенно важно при водоснабжении с использованием изношенных трубопроводов, где может происходить вторичное загрязнение воды. Кроме того, реагенты для хлорирования доступны и недороги. Однако у этого метода есть ряд недостатков. В некоторых случаях побочные соединения, образующиеся после хлорирования, могут быть токсичными, кроме этого сам хлор является ядовитым веществом, поэтому требуется тщательно соблюдать условия дозирования при хлорировании. В последнее время все большее распространение получает обработка воды озоном (озонирование), поскольку эффективность этого метода многократно превосходит хлорирование, озон не образует опасных соединений и со временем распадается на неопасный кислород ( $\text{O}_2$ ), благодаря чему передозировка озона не влечёт опасных последствий. Широкому распространению озонирования препятствуют техническая сложность его получения, относительно высокая себестоимость и высокие требования к квалификации обслуживающего персонала. Токсичность озона при высоких концентрациях требует соблюдения строгих правил безопасности на очистных сооружениях.

## **Физико-химические способы очистки воды**

Методы данной группы совмещают химическое и физическое воздействие на загрязнители воды и применяются для удаления разных веществ. В их числе растворённые газы и вещества, тонкодисперсные жидкие или твёрдые частицы, гели, ионы тяжёлых металлов. Физико-химические методы могут применяться как на стадии предварительной очистки, так и на поздних этапах для глубокой очистки.

Наиболее распространённые методы данной группы:

- флотация;
- сорбция;
- экстракция;
- ионообмен;
- электродиализ;
- обратный осмос;
- термические методы.

**Флотация**, применительно к водоочистке, представляет процесс отделения гидрофобных частиц при пропускании через воду большого числа пузырьков газа (обычно воздуха). Показатели смачиваемости отделяемого загрязнителя таковы, что частицы закрепляются на поверхности пузырьков и вместе с ними поднимаются на поверхность, где образуют слой пены, который можно легко удалить. Если отделяемая частица оказывается больше по размерам чем пузырьки, то вместе они (частица + пузырьки) образуют флотокомплекс. Нередко флотацию комбинируют с использованием химических реагентов, к примеру, сорбирующихся на частицах загрязнителя, чем достигается снижение его смачиваемости, или являющихся коагулянтами и приводящих к укрупнению удаляемых частиц. Флотацию преимущественно используют для очистки воды от нефтепродуктов и масел, но также удаления твёрдых примесей, отделение которых другими способами неэффективно.

Существуют следующие варианты осуществления флотации:

- пенная;
- напорная;
- механическая;
- пневматическая;
- электрическая;
- химическая и т. д.

Наиболее широко используется метод пневматической флотации, при которой образование восходящего потока пузырьков создаётся за счёт установки на дне резервуара пористых дисковых или трубчатых аэраторов. Подаваемый под давлением воздух проходит сквозь поры, за счёт чего дробится на отдельные пузырьки, осуществляющие процесс флотации. При напорной флотации поток очищаемой воды смешивается с потоком воды, перенасыщенной газом и находящейся под давлением, и подаётся в камеру флотации. При резком паде-

нии давления растворённый в воде газ начинает выделяться в виде пузырьков малого размера. В случае электрофлотации процесс образования пузырьков проходит на поверхности расположенных в очищаемой воде электродов при протекании по ним электрического тока.

**Сорбционные методы** основаны на избирательном поглощении загрязняющих веществ в поверхностном слое сорбента (адсорбция) или в его объёме (абсорбция). В частности для очистки воды используется процесс адсорбции, который может носить физический и химический характер, что делает его предпочтительным в качестве методов доочистки на завершающих стадиях процесса водоочистки и водоподготовки. Сорбционными методами можно удалять гербициды, пестициды, фенолы, поверхностно активные вещества.

В качестве адсорбентов используются такие вещества как активированные угли, силикагели, алюмогели, цеолиты. Их структура пористая, что значительно увеличивает удельную поверхность адсорбента и повышает эффективность процесса. Процесс адсорбционной очистки может быть осуществлён путём смешения очищаемой воды и адсорбента, или же путём фильтрации воды через слой адсорбента. В зависимости от сорбирующего материала и извлекаемого загрязнителя процесс может быть регенеративным (адсорбент после регенерации используется вновь) или деструктивным, когда адсорбент подлежит утилизации ввиду невозможности его регенерации.

Очистка воды методом жидкостной **экстракции** заключается в использовании экстрагентов. Применительно к очистке воды, экстрагент – это несмешиваемая или мало смешиваемая с водой жидкость, значительно лучше растворяющая в себе извлекаемые из воды загрязнители. Процесс осуществляется следующим образом: очищаемая вода и экстрагент перемешиваются для создания большой поверхности контакта фаз, после чего в них происходит перераспределение растворённых загрязняющих веществ, большая часть которых переходит в экстрагент, затем две фазы разделяются. Насыщенный извлекаемыми загрязнителями экстрагент называется экстрактом, а очищенная вода – рафинатом. Далее экстрагент можно утилизировать или регенерировать в зависимости от условий процесса. Данным методом из воды удаляются преимущественно органические соединения, такие как фенолы и органические кислоты.

**Ионный обмен** в основном используется в водоподготовке с целью умягчения воды (удаления солей жёсткости). Суть процесса заключается в обмене ионами между водой и ионитом. Иониты подразделяются на катиониты и аниониты в зависимости от типа обмениваемых ионов. С химической точки зрения ионит представляет высокомолекулярное вещество, состоящее из каркаса (матрицы) с большим количеством функциональных групп, способных к ионообмену. Природные иониты (цеолиты, сульфоугли) применялись на ранних этапах развития ионообменной очистки, в настоящее время широкое распространение получили синтетические ионообменные смолы, превосходящие

природные аналоги по ионообменной способности. Метод очистки ионным обменом широко распространен, как в промышленности, так и в быту. Бытовые ионообменные фильтры, как правило, не используются для работы с сильно загрязненными водами, поэтому ресурса одного фильтра хватает на очистку большого количества воды, после чего фильтр подлежит утилизации. В то же время при водоподготовке ионообменный материал чаще всего подлежит регенерации с помощью растворов с большим содержанием ионов  $\text{H}^+$  или  $\text{OH}^-$ .

Электродиализ представляет комплексный метод, сочетающий мембранный и электрический процессы. Позволяет удалять из воды различные ионы и проводить обессоливание. В отличие от обычных мембранных процессов в электродиализе используются ионоселективные мембранны, пропускающие ионы только определённого знака. Аппарат для проведения электродиализа (электродиализатор) представляет ряд камер, разделённых чередующимися катионаобменными и анионаобменными мембранами, в которые поступает очищаемая вода (рисунок 6.1).

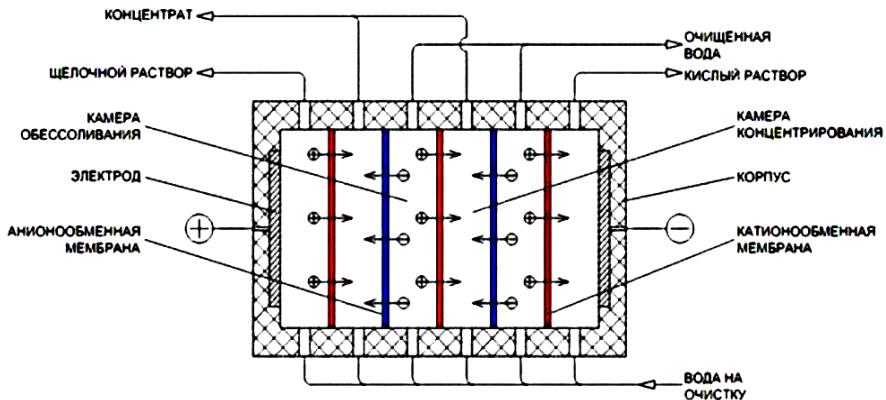


Рисунок 6.1 – Схема аппарата электродиализа

В крайних камерах расположены электроды, к которым подводится постоянный ток. Под действием возникшего электрического поля ионы начинаются двигаться к электродам согласно своему заряду, пока не встречают ионоселективную мембрану с совпадающим зарядом. Это приводит к тому, что в одних камерах происходит постоянный отток ионов (камеры обессоливания), а в других, наоборот, наблюдается их накопление (камера концентрирования). Разводя потоки из разных камер, можно получить концентрированный и обессоленный растворы. Неоспоримые преимущества данного метода заключаются не только в очищении воды от ионов, но и в возможности получения кондиционной воды из солёных источников.

**Обратный осмос** относится к мембранным процессам и проводится под давлением больше осмотического. Осмотическое давление – избыточное гидростатическое давление, приложенное к раствору, отделенному полупроницаемой перегородкой (мембраной) от чистого растворителя, при котором прекращается диффузия чистого растворителя через мембрану в раствор. Соответственно, при рабочем давлении выше осмотического будет наблюдаться обратный переход растворителя из раствора, за счет чего концентрация растворенного вещества будет расти. Таким способом можно отделять растворенные газы, соли (включая соли жесткости), коллоидные частицы, а также бактерии и вирусы. Также установки обратного осмоса используются для получения пресной воды из морской. Недостатком метода является получение на выходе деминерализованной воды, пригодной для технических целей в чистых производствах, но не вполне пригодной для питья.

**Термические методы** основаны на воздействии на очищаемую воду повышенных или пониженных температур. Одним из наиболее энергоемких процессов является выпаривание, однако оно позволяет получить воду высокой степени чистоты и высококонцентрированный раствор с нелетучими загрязнителями. Концентрирование примесей может осуществляться с помощью вымораживания, поскольку в первую очередь начинает кристаллизоваться чистая вода, а затем оставшаяся ее часть с растворенными загрязнителями. Выпариванием и вымораживанием можно проводить кристаллизацию – выделение примесей в виде осадка кристаллов из насыщенного раствора.

#### **Типовые технологические процессы и схемы обработки природной воды**

Выбор состава сооружений, методы и технологическая схема обработки воды и, следовательно, состав водоочистных сооружений, прежде всего, зависят от её исходного качества в источниках водоснабжения, а также объёмов водопотребления населённого пункта и промышленных предприятий [41]. Подбор и определение должны производиться на основании технологических изысканий непосредственно у источника водоснабжения, а также данных по эксплуатации сооружений, работающих в аналогичных (местных) условиях. Окончательный вариант состава сооружений выбирается на основании технико-экономических расчётов различных вариантов. Предварительно состав очистных сооружений можно определить, руководствуясь рекомендациями [41–46]. При этом основные задачи очистных сооружений будут следующие:

1 Осветление и обесцвечивание воды – удаление всех видов взвешенных и коллоидных веществ, а также веществ, придающих какую-либо окраску воде (первая и вторая группа примесей).

2 Специальная обработка воды с целью удаления соединений молекуллярного и растворённого состояния (третья и четвёртая группа примесей). Например, умягчение, обезжелезивание воды и т. д.

3 Обеззараживание воды – удаление болезнетворных и патогенных примесей с обеспечением надлежащего санитарного состояния водной среды. Эта задача характерна для подготовки воды хозяйствственно-питьевого назначения.

Для удаления из воды гетерофазных примесей I группы (по Л. А. Кульскиму) рекомендуется применять механическое разделение их в гравитационном поле или под действием центробежных сил, флотацию, фильтрование через мелкие сетки и пористые загрузки.

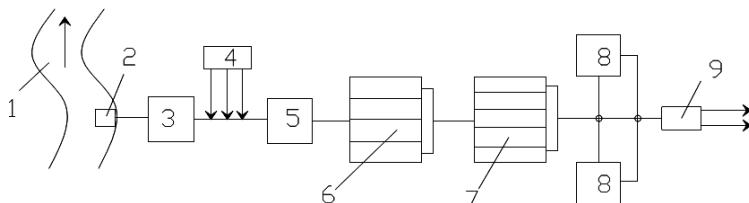
Устранение микрогетерофазных примесей II группы достигается окислением органических коллоидных веществ и высокомолекулярных соединений, адгезией и адсорбцией на гидрооксидах алюминия и железа, агрегацией флокулянтами катионного типа, а для патогенных микроорганизмов и вирусов – окислительным, бактерицидным и вирулицидным воздействием.

Комплекс очистных сооружений, обеспечивающий протекание большинства перечисленных процессов, включает все необходимые типовые элементы, а именно: смесители, камеры хлопьеобразования, отстойники (осветлители со взвешенным осадком) или флотаторы, фильтры – при двухступенчатой схеме очистки, контактные осветлители или контактные фильтры – при одноступенчатой схеме.

Водопроводные очистные сооружения по производительности делятся следующим образом:

- малые (до 5000 м<sup>3</sup>/сут);
- средней производительности (до 50000 м<sup>3</sup>/сут);
- большой производительности (до 100000 м<sup>3</sup>/сут);
- высокой производительности (свыше 100000 м<sup>3</sup>/сут).

Приведённая на рисунке 6.2 схема [41] применяется при высокой мутности и цветности воды из поверхностного источника и является самой полной.

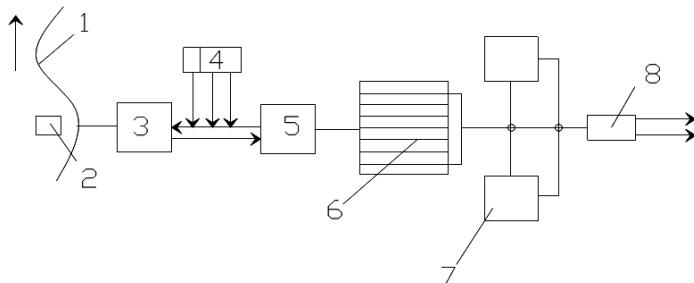


1 – река; 2 – водозаборные сооружения; 3 – насосная станция I подъема;  
4 – сооружения для приготовления растворов реагентов; 5 – смесительное устройство;  
6 – блок сооружений предварительного осветления воды (отстойники или осветлители со взвешенным осадком); 7 – фильтровальный блок; 8 – резервуары чистой воды (до РЧВ производят обязательное обеззараживание воды); 9 – насосная станция II подъема

Рисунок 6.2 – Двухступенчатая схема обработки воды из поверхностного источника

На практике она обычно используется при мутности до 1500 мг/л и цветности до 120°. Если суточная производительность объекта не более 5000 м<sup>3</sup>/сут (в нормативных документах ограничений нет), то применяют вертикальные отстойники. При производительности выше 5000 м<sup>3</sup>/сут и минимальной мутности более 50 мг/л успешно применяются осветлители со взвешенным осадком. При производительности больше 30000 м<sup>3</sup>/сут наиболее целесообразна схема с применением горизонтальных отстойников.

Технологическая схема [41] обработки воды из поверхностных источников, где наблюдается незначительный обмен воды, а именно из водохранилищ, озер или прудов, приведена на рисунке 6.3. Независимо от производительности водоочистной станции в такой технологической схеме, если мутность в исходной воде не превышает 50 мг/л, а цветность – 50°, могут быть использованы скорые фильтры с угольно-песчаной (керамзитовой) двухслойной загрузкой. Если мутность воды составляет до 120 мг/л, цветность – до 120°, то применяются контактные осветлители, а при мутности до 300 мг/л можно использовать двухступенчатое фильтрование (в качестве I ступени – контактный осветлитель, а II ступени – скорый фильтр).



1 – открытый источник (река, озеро, водохранилище); 2 – водозаборные сооружения (могут быть совмещенные или нет с насосной станцией I подъема); 3 – сетчатые фильтры (барабанные сетки или микрофильтры); 4 – сооружения для приготовления растворов реагентов; 5 – входная камера; 6 – фильтровальный блок; 7 – резервуары чистой воды (до РЧВ производят обязательное обеззараживание воды); 8 – насосная станция II подъема

Рисунок 6.3 – Одноступенчатая схема обработки воды из поверхностного источника

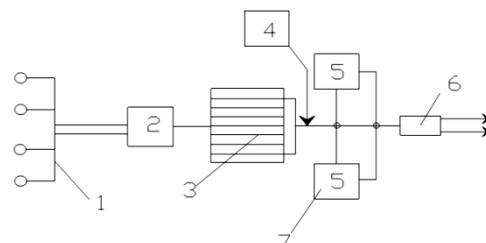
При удалении молекулярных веществ, входящих в III группу примесей, используют десорбцию летучих соединений, окисление органических веществ, адсорбцию примесей на активированном угле и других сорбентах; экстракцию органическими растворителями; отгонку паром (эвапорацию) и др. Такие методы удаления примесей из воды являются специфичными, поэтому используется аппаратура специального назначения.

Для удаления растворённых микроэлементов и соединений (IV группа примесей) лучше использовать различные окислительные и ионные процес-

сы. Например, фиксация на твёрдой фазе ионитов (H-Na-катионирование, OH-анионирование), перевод с помощью окислителей в малодиссоциируемые или малорастворимые соединения (нейтрализация, комплексообразование), сепарация посредством изменения фазового состояния воды с переводом её в газообразное состояние (дистилляция) или в твёрдую фазу (вымораживание, гидратообразование); перераспределение ионов в жидкой фазе (экстракция, обратный осмос); подвижность ионов в электрическом поле и др.

Иногда достаточно применить метод аэрации воды, когда кислород воздуха участвует в окислительных процессах с образованием нерастворимых или малорастворимых соединений (удаление из воды соединений железа и марганца). Установки, предназначенные для осуществления этих процессов, могут дополнять основные очистные сооружения.

Блок водоподготовки для удаления из воды соединений железа представляет аэрационные системы и скорые фильтры, при необходимости добавляются реагенты-окислители. Если производится умягчение или обессоливание воды, то применяются специальные ионообменные фильтры, может быть предварительная реагентная обработка воды с последующим отстаиванием и фильтрованием. Для удаления растворённых газов используют дегазаторы или аэрационные бассейны, аэроокислители и т. д. Часто основной задачей для обработки воды из открытых источников становится её осветление и обесцвечивание, в этом случае водоочистные сооружения называют станциями осветления и обесцвечивания воды. Удаление из воды отдельных соединений или микроэлементов, что характерно в основном для подземных вод (рисунок 6.4) проводится на станциях: обезжелезивания (удаление железа), умягчения (снижение жёсткости), опреснения и обессоливания воды (удаление солей).



1 – скважинный водозабор; 2 – входная или распределительная камера;  
3 – блок водоподготовки (станция); 4 – хлораторная; 5 – резервуар чистой воды;  
6 – насосная станция II подъёма

Рисунок 6.4 – Технологическая схема обработки воды из подземного источника [41]

В случае подготовки воды для хозяйствственно-питьевого водоснабжения перед резервуарами чистой воды необходимо производить ее обеззараживание окислителями или бактерицидным облучением.

Основные методы водоподготовки и сооружения для их реализации приведены в [41, 46, 48–53]. В таблице 6.1 [54] приведены основные методы подготовки питьевой воды.

**Таблица 6.1 – Задачи, методы и средства очистки питьевой воды [54]**

| Задача                        | Метод   | Средство   |
|-------------------------------|---|--|
| Осветление                    | Отстаивание   | Отстойники   |
| Обесцвечивание                | Коагуляция; фильтрование  | Коагулянты, фильтры  |
| Обеззараживание               | Кипячение; хлорирование; озонирование; облучение УФ; ионизирующее излучение | Кипятильники, хлор и хлорные препараты, дозаторы; озон, озонаторы; УФЛ установки |
| Обезвреживание                | Сорбция; кипячение; озонирование  | Угли, фильтры; кипятильники; озон, озонаторы                                     |
| Обессоливание                 | Дистилляция; ионный обмен; коагуляция                                       | Опреснительные установки, иониты; фильтры; мембранны                             |
| Дезактивация                  | Фильтрование; дистилляция; ионный обмен; коагуляция                         | Фильтры; опреснительные установки; иониты; коагулянты                            |
| Обезжелезивание               | Аэрация; окисление перманганатом или хлором                                 | Градирни; отстойники; фильтры-окислители   |
| Дезодорирование               | Аэрация; озонирование; коагуляция   | Градирни-отстойники; озон, озонаторы; уголь; фильтры                             |
| Обесфторивание                | Разведение; ионный обмен  | Вода без фтора; иониты; фильтры  |
| Фторирование                  | Добавка фторсодержащих солей  | Фторсодержащие соли; установки для дозирования                                   |
| Удаление привкусов и запахов  | Сорбция на угле; озонирование; хлорирование с преаммонизацией               | Активированный уголь, раствор аммиака  |
| Удаление фито- и зоопланктона | Фильтрование через микрофильтры конструкции АКХ и через гидроциклоны        | Барабанные микрофильтры и гидроциклоны   |

В таблице 6.1 сделана попытка систематизировать задачи, методы и средства очистки питьевой воды, однако, на наш взгляд, это привело к избыточной детализации. На рисунке 6.5 представлена обобщённая технологическая схема подготовки питьевой воды [54], которая имеет более универсальный характер и охватывает подавляющее число встречающихся на практике сооружений.

Рассмотрим отдельные стадии, методы и оборудование очистки воды из природных источников при ее подготовке для питьевого водоснабжения.

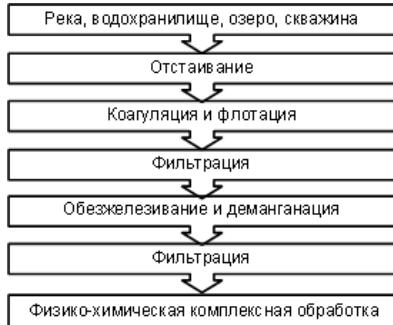


Рисунок 6.5 – Обобщённая технологическая схема подготовки питьевой воды [54]

## 6.1 Физические методы очистки

### 6.1.1 Отстаивание

Отстаивание и отстойники используются при подготовке питьевой воды, как правило, перед её фильтрацией после коагуляции реагентами мелкодисперсных взвешенных частиц, коллоидных, полимерных соединений, детергентов, бактериальных и бактериологических загрязнений [55, 56].

Из поверхностных источников в настоящее время добывается около 85 % всей природной воды для питьевого водоснабжения. Для источников, в которых вода имеет большую мутность, целесообразно еще на входе перед подачей на предварительную фильтрацию освобождать ее от взвеси частиц крупных и средних размеров. На обычных водоочистных сооружениях для этой цели применяют отстойники или гидроциклоны. Эти же сооружения могут использоваться непосредственно в водозаборных узлах. Так, например, на южных реках применяют в водозаборных узлах тонкослойные почечные отстойники, что позволяет существенно повысить эффективность работы станции водоподготовки в целом [57, 58].

Принцип работы отстойников прост: вода должна медленно течь, примерно со скоростью 1 см/с, т. е. в ламинарном режиме. Загрязнения выпадают в осадок, происходит первичная очистка воды [56].

Технический справочник по воде компании «Дегремон» рекомендует современные методы обработки воды, получившие наибольшее распространение [58]. В зависимости от качества исходной воды, местных условий и имеющихся производственных площадей, рекомендуется применять отстойник со слоем взвешенного осадка, с тонкослойными модулями в разных модификациях (таблица 6.2) и разными характеристиками (таблица 6.3).

В зависимости от содержания в исходной воде взвешенных веществ для её осветления рекомендуется предусматривать либо отстаивание + фильтрование, либо прямое фильтрование.

**Таблица 6.2 – Классификация отстойников компании «Дегремон» [58]**

| Тип отстойника            | Конструкция  | Со слоем осадка                            |   |                     |
|---------------------------|--|--|---|---------------------|
|                           |  | пульсирующим                               | без сгущения осадка                                 | со сгущением осадка |
| Без тонко-слойных модулей | Прямоугольная, с отдельным флокулятором, со сдвигом осадка или без. Радиальная, со сдвигом осадка, встроенным флокулятором (осветитель – флокулятор) | Пульсатор                                  | Акселейтор-циркулятор. Турбоциркулятор-клариконтакт | –                   |
| С тонко-слойными модулями | Седипак  | Пульсатор. Суперпульсатор. Ультрапульсатор | R.P.S.  | Денсадег            |

**Таблица 6.3 – Качественные характеристики основных отстойников компании «Дегремон» [58]**

| Тип отстойника              | Флокулятор              | Каждаясь скорость через зону отстаивания, $\text{м}^3/\text{ч} \cdot \text{м}^2$ | Концентрация извлекаемых осадков, г/л |
|-----------------------------|-------------------------|--|---------------------------------------|
| Статический                 | На входе или встроенный | 0,5–2,0  | 0,5–5,0                               |
| Турбоциркулятор             | Встроенный              | 1,5–3,0  | 2–10                                  |
| Акселейтор                  | Встроенный              | 3–5  | 1–10                                  |
| Пульсатор                   | Встроенный              | 3–5  | 2–10                                  |
| Пульсатюб<br>Суперпульсатор | Встроенный              | 6–10   | 2–10                                  |
| Ультрапульсатор             | Встроенный              | 8–15   | 2–10                                  |
| Седипак, R.P.S.             | На входе                | 6–10   | 2–15                                  |
| Денсадег                    | На входе                | 20–25  | 30–150                                |

При этом первый вариант может быть реализован и в 2–3 ступени с использованием традиционных статических отстойников и установок с взвешенным пульсирующим слоем осадка.

После предварительного отстаивания исходной воды компания «Дегремон» предлагает дополнительное осветление воды на песчаных фильтрах.

### 6.1.2 Фильтрация

Фильтрацией называется процесс прохождения очищаемой воды через слой пористого материала. Фильтрацию, так же как и отстаивание, применяют для осветления воды, т. е. для задержания находящихся в воде взвешенных веществ. Фильтрующий материал должен представлять пористую среду с малыми порами. В большинстве случаев фильтрацию применяют в сочетании с другими методами очистки воды. Так, на городских водоочистных станциях фильтры обычно используют после отстойников или осветли-

телей. Фильтры применяют также для осветления воды при реагентном умягчении и обезжелезивании. В некоторых случаях фильтры используют для осветления природной некоагулированной воды (медленные фильтры), а также коагулированной воды без предварительного отстаивания [41].

По характеру ведения процесса различают поверхностную и объёмную фильтрацию. В первом случае примеси задерживаются на поверхности фильтрующего материала, а сам процесс описывается формулой Хазена

$$d = 0,01 \left( d_{\phi} v \right)^{0,5}, \quad (6.1)$$

где  $d$  – наименьший диаметр задерживаемых частиц (тонкость очистки), мм;  $d_{\phi}$  – эффективный диаметр зёрен загрузки, мм;  $v$  – скорость фильтрования (до 10 м/ч).

Поверхностная фильтрация подразделяется на: макро- и микрофильтрацию (барабанные сетчатые и тканевые микрофильтры с тонкостью очистки до 150 мкм), ультрафильтрацию (до 0,4 мкм) и нанофильтрацию (до 0,04 мкм). Поверхностная фильтрация реализуется на медленных и намывных фильтрах. При объёмной фильтрации взвешенные вещества задерживаются в объёме фильтрующего материала. Иногда происходит одновременное образование плёнки примесей и их отложение в порах загрузки. В большинстве случаев на современных фильтрах плёнка не образуется и примеси вместе с водой проникают в толщу фильтрующего слоя, при этом глубина проникания загрязнений в толщу загрузки тем больше, чем больше скорость фильтрования, крупнее зерна фильтрующего слоя и чем меньше размеры частиц взвеси, извлекаемых из воды. Причем этот процесс чисто механического извлечения из воды диспергированных примесей. Объёмная фильтрация осуществляется через зернистые и другие пористые материалы, например, в различных конструкциях скорых фильтров и контактных осветлителях. Фильтр представляет резервуар, в нижней части которого расположено дренажное или распределительное устройство той или иной конструкции, на которое укладывают слой поддерживающего материала (если это необходимо) и затем собственно фильтрующий материал. По направлению фильтрования через зернистые материалы различают прямое и обратное фильтрование. Пропускная способность фильтра определяется его скоростью, которая является основной характеристикой фильтрования. Под скоростью фильтрации следует понимать не скорость движения воды в порах, а скорость вертикального движения воды над фильтрующим слоем. Скорость фильтрации  $v$  (м/ч) определяют по соотношению

$$v = Q / \omega, \quad (6.2)$$

где  $Q$  – количество воды, проходящей через фильтр,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\omega$  – площадь фильтра,  $\text{м}^2$ .

В зависимости от численного значения величины  $v$  различают медленное и скорое фильтрование.

Медленную фильтрацию проводят со скоростью 0,1–0,2 м/ч, при этом на поверхности материала начинает выпадать слой осадка, состоящий из загрязнений, присутствующих в воде, и дальнейшая фильтрация происходит через этот слой примесей. При медленной фильтрации вода может подаваться без использования реагентов, причём достигается ее полное осветление и обесцвечивание с высокой степенью обеззараживания. Но требуется очень большая площадь фильтров, и для значительных расходов воды использование принципа медленного фильтрования становится экономически нецелесообразно [41].

Скорую фильтрацию осуществляют при величине  $v > 2,5$  м/ч (т. е. не менее чем в 10 раз выше медленного фильтрования). В этом случае фильтрующая плёнка на поверхности практически не образуется, а загрязнения задерживаются в толще загрузки, но при определённых условиях. Так как при обычных значениях pH исходной воды поверхность зёрен фильтрующего материала и частицы примесей воды часто несут одинаковый (отрицательный) заряд, то взвесь в порах фильтрующего слоя практически не задерживается. Поэтому для обеспечения эффективности скорой объёмной фильтрации необходимо предварительное коагулирование примесей воды с целью уменьшения и ликвидации их заряда, т. е. на фильтрование направляют воду, обработанную реагентами, в т. ч. обязательно коагулянтами, непосредственно из источника водоснабжения или прошедшую предварительное осветление.

Фильтры, работающие по принципу скорого фильтрования, делятся на скорые ( $v \leq 15$  м/ч), скоростные ( $v \leq 25$  м/ч), сверхскоростные ( $v \leq 100$  м/ч) и высокопроизводительные ( $v > 100$  м/ч) [41]. Работа фильтра в заданном режиме оценивается, кроме скорости фильтрации, продолжительностью его защитного действия ( $T_3$ ) и продолжительностью роста потерь напора в фильтре от минимальных до максимальных значений ( $T_n$ ).

Величина  $T_3$  характеризует продолжительность работы фильтра, в течение которой обеспечивается требуемое качество фильтруемой воды (например, для воды хозяйственно-питьевого назначения: цветность – до 20°, мутность – до 1,5 мг/л, железо – до 0,3 мг/л и т. д.).

Задержание примесей при фильтровании воды сопровождается ростом потерь её напора в фильтрующей плёнке или загрузке. Для открытых фильтров максимальная величина роста потерь напора воды определяется ее высотой над фильтрующим материалом и обычно составляет 2 м вод. ст. Для напорных фильтров эта величина зависит от материала корпусов и принимается до 8–10 м вод. ст. Для эффективного фильтра величины  $T_3$  и  $T_n$  должны быть равны между собой.

При проектировании и расчёте фильтров с песчаной загрузкой прини-

мают соотношение  $T_3 > T_n$  в 1,2–1,3 раза. То есть при достижении в фильтре максимальных потерь напора воды должно обеспечиваться требуемое качество фильтрата (профильтрованной воды), и режим работы фильтра определяется величиной  $T_n$ . При некоторых типах загрузок (например, применение в определённых условиях разных видов углей, керамзита) может наблюдаться обратное соотношение, и тогда режим его работы и регенерации загрузки определяется продолжительностью защитного действия фильтра.

Подробнее типовые конструкции фильтров представлены в главе 10.

Фильтрующая загрузка является основным рабочим элементом фильтров. Типы и виды фильтрующих материалов многообразны: от сеток, которые используются при поверхностной фильтрации, тканей и нетканых материалов, зернистых загрузок до пористых элементов – труб, стаканов, дисков, листов и полос из керамики, спечённых порошковых металлических материалов, полимерных волокнистых материалов, полученных методом *melt-blown*, полимерных и керамических мембран (ультра- и нано-фильтрация).

Фильтрующие материалы для осветления воды должны обеспечивать требуемое качество фильтрата, обладать достаточной механической прочностью и химической стойкостью, не вступать в реакцию с растворёнными веществами в воде, т. е. дестабилизировать её, не содержать в своём составе вредных веществ, в том числе радиоактивных, ядовитых и т. д. Кроме этого, материалы, применяемые для фильтрования воды хозяйствственно-питьевого назначения, должны удовлетворять необходимым санитарным требованиям и в обязательном порядке иметь разрешительные сертификаты и аттестаты Минздрава Республики Беларусь [41].

Зернистые материалы являются основными для загрузки медленных и скорых фильтров; это кварцевый песок, керамзит, антрацит, полимеры и местные материалы (горные породы, доломитовый песок, керамическая крошка, доменные шлаки, дроблённый мрамор и др.).

Фильтрующий слой выполняют из отсортированной по требуемому фракционному составу зернистой загрузки, зерна которой должны иметь форму, близкую к сферической, а также невысокую стоимость.

Технический справочник по воде компании «Дегремон» рекомендует конструировать фильтры на основе следующих принципов [58]:

- предпочтение отдается однородному слою песка (перед двухслойной или многослойной загрузкой) со следующими параметрами: высота слоя песка 0,8–1,5 м; эффективный размер частиц песка около 1,0 мм; скорость фильтрации 7–20 м/ч; высота слоя воды над загрузкой 1,2–1,5 м;

- работа фильтров предусматривается при постоянных уровнях и расходе воды с системой воздушно-гидравлического (сифон) или электронного (дисковый затвор+электропневматическое устройство) регулирования;

- промывка фильтров производится воздухом и водой с последующей конечной промывкой только водой при пониженной скорости (15–20 м/ч), т. е. без перевода загрузки во взвешенное состояние.

Подробнее фильтрующие материалы представлены в разделе 12.

### 6.1.3 УФО-обеззараживание

Для обеззараживания природных вод рекомендуется применять бактерицидное излучение в УФ-диапазоне длины волны при условии, если коли-индекс воды не более 1000 на 1 л, содержание железа – до 0,3 мг/л, мутность – до 2 мг/л [41]. Обеззараживание воды ультрафиолетовым облучением (УФО) имеет преимущества перед хлорированием, так как природные вкусовые качества и химические свойства воды не изменяются.

Бактерицидное действие УФО протекает во много раз быстрее, чем хлора; после облучения воду сразу можно подавать потребителям. УФО уничтожает не только вегетативные виды бактерий, но и спорообразующие. Эксплуатация установок для обеззараживания воды УФО проще, чем хлорного хозяйства. Наибольшим бактерицидным эффектом обладают УФ-лучи с длиной волны 240–290 мкм (бактерицидная область УФ-излучения). Максимум бактерицидного действия располагается около длины волны 260 мкм. Процесс отмирания бактерий описывается уравнением

$$P = P_0 \exp(-Et/k), \quad (6.3)$$

где  $P$  – число бактерий в единице объёма, оставшихся живыми после бактерицидного облучения;  $P_0$  – начальное число бактерий в единице объёма;  $E$  – интенсивность потока бактерицидных лучей;  $t$  – экспозиция облучения;  $k$  – коэффициент сопротивляемости бактерий, мк·Вт·с/м<sup>2</sup>.

Бактерии и вирусы, находящиеся в воде, имеют различную степень сопротивляемости действию бактерицидных лучей, т. е. значение коэффициента  $k$  зависит от вида бактерий. Коэффициент сопротивляемости различных видов вегетативных и патогенных бактерий практически не превышает коэффициента сопротивляемости бактерий Coli, равного примерно 2500, что и принимают при расчётах необходимого количества бактерицидной энергии для обеззараживания [59]. При этом эффект обеззараживания воды, характеризуемый отношением  $P / P_0$ , подсчитывают по отмиранию бактерий Coli. Он зависит от количества затрачиваемой бактерицидной энергии ( $Et$ ), т. е. один и тот же эффект может быть получен при малой интенсивности облучения, но большой экспозиции и наоборот, при большой интенсивности облучения и малой продолжительности контакта. При определении необходимого количества бактерицидной энергии следует учитывать её поглощение при прохождении потока лучей через слой воды: для бесцветных, не требующих обезжелезивания подземных вод, получаемых с артезианских горизонтов,  $-0,1 \text{ см}^{-1}$ ; для родниковой, грунтовой, подрусловой и инфильтрационной воды  $-0,15 \text{ см}^{-1}$ ; для воды поверхностных источников водоснабжения, прошедшей очистку на очистных сооружениях,  $-0,2\text{--}0,3 \text{ см}^{-1}$ . В последнем случае рекомендуемое значение коэффициента поглощения

принято с запасом с учётом возможных случайных отклонений показателей качества воды по мутности и цветности от нормативных требований.

В. Ф. Соколов предложил расчётную формулу, которую применяют при проектировании установок для обеззараживания воды методом УФО:

$$F_p = \frac{q\alpha k \lg(\rho / \rho_0)}{1563,4 \eta_0 \eta_{\pi}}, \quad (6.4)$$

где:  $F_p$  – расчетный поток энергии УФО, Вт;  $q$  – расход обеззараживаемой воды,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $\text{см}^{-1}$ ;  $k$  – коэффициент сопротивляемости бактерий, принимаемый равным 2500  $\text{мк}\cdot\text{Вт}\cdot\text{с}/\text{м}$ ;  $\rho_0$  – коли-индекс воды до облучения;  $\rho$  – коли-индекс воды после облучения, принимаемый не более 3;  $\eta_0$  – коэффициент использования бактерицидного потока, учитывающий поглощение лучей в слое воды, принимаемый 0,9;  $\eta_{\pi}$  – коэффициент использования бактерицидного потока, зависящий от типа аппарата, для предварительных расчётов он может быть принят равным 0,9.

Необходимое количество бактерицидных ламп  $N$  определяют по формуле

$$N = F_p / F_{\pi}, \quad (6.5)$$

где  $F_{\pi}$  – расчётный бактерицидный поток каждой лампы (таблица 6.4).

**Таблица 6.4 – Основные рабочие характеристики бактерицидных ламп**

| Тип лампы | Бактерицидный поток, Вт | Потребляемая мощность, Вт |
|-----------|-------------------------|---------------------------|
| УВ-30     | 2                       | 30                        |
| БУВ-60П   | 6,5                     | 60                        |
| ПРК-7     | 35                      | 1000                      |
| РСК-2,5   | –                       | 6000                      |

Распространёнными источниками бактерицидного УФ-излучения являются ртутно-кварцевые лампы высокого давления ПРК и аргонно-ртутные лампы низкого давления РКС-2,5. Ртутно-кварцевые лампы высокого давления (0,05–0,1 МПа) с температурой оболочки при горении лампы до 250–2000 °C являются мощными источниками видимого света и УФ лучей с максимумом излучения 365,0–3666,3 мкм. Указанные в таблице 6.4 основные расчётные параметры ртутно-кварцевых и аргонно-ртутных ламп относятся к концу расчетного срока их службы, т. е. после 4500–5000 ч горения. Бактерицидный поток новых ламп на 30 % выше.

Небольшая мощность аргонно-ртутных ламп, их экономичность позволяют применять их в установках небольшой производительности. Ртутно-кварцевые лампы высокого давления, хотя и менее экономичные, чем ар-

гонно-ртутные, применяют для обеззараживания большого количества воды с незначительным бактериальным загрязнением, так как это более экономично по сравнению с хлорированием. В отечественной практике применяют несколько типов установок для обеззараживания воды бактерицидными лучами, разработанных в ОАО «Инжиниринговая компания «Научно-исследовательский институт коммунального водоснабжения и очистки воды» (НИИ КВОВ, РФ) (таблица 6.5).

**Таблица 6.5 – Технические характеристики бактерицидных установок**

| Тип установки       | Производительность, м <sup>3</sup> /ч | Предельное давление, МПа | Тип и число ламп | Мощность, потребляемая установкой, кВт | Завод-изготовитель  |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------|--|---|
| ОВ-1П               | 3                                     | 0,5                      | БУВ-60П<br>1 шт. | 0,06                                   | Машиностроительный завод (г. Сергиев Посад, РФ)             |
| ОВ-АКХ двухкамерная | 60                                    | 0,5                      | ПРК-7м<br>2 шт.  | 2                                      | Вяземский машиностроительный завод (РФ)                     |
| ОВ-АКХ трехкамерная | 90                                    | 0,5                      | ПРК-7м<br>3 шт.  | 3                                      | То же   |
| ОВ-1П-РКС           | 50-70                                 | 1,0                      | РКС-2,5<br>1 шт. | 6                                      | Машиностроительный завод (г. Сергиев Посад, РФ)             |
| ОВ-3П-РКС           | 150-200                               | 1,0                      | РКС-2,5<br>3 шт. | 18                                     | Экспериментальный завод коммунального оборудования АКХ (РФ) |

*Примечания*

1 Присоединительные и установочные размеры принимают в соответствии с данными заводов-изготовителей.

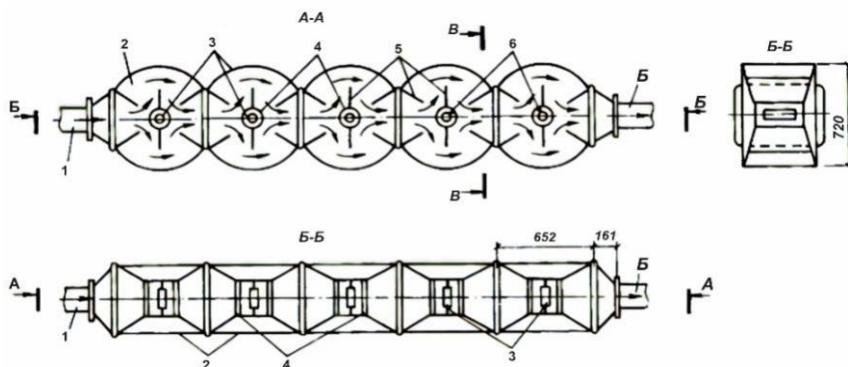
2 Техническая документация на указанные установки находится на заводах-изготовителях.

Установка типа ОВ-1П применяется для обеззараживания воды на небольших объектах. Она состоит из корпуса и одной бактерицидной лампы БУВ-60П, размещенной в кварцевом цилиндрическом чехле. Пусковое устройство к бактерицидной лампе крепят непосредственно к корпусу установки. Вода поступает в аппарат через нижний входной патрубок. Внутри аппарата имеется спираль, которая сообщает воде вращательное движение, способствующее хорошему перемешиванию потока. Многократно омывая кварцевый чехол, вода подвергается равномерному облучению и обеззараживанию. Потери напора в установке при расчётном расходе 3 м<sup>3</sup>/ч составляют 0,2 м вод. ст. Установку монтируют в помещении с температурой воздуха не ниже +5 °C вертикально на трубопроводе за насосом или непосредственно у потребителя. Периодически (1–2 раза в месяц) необходимо очищать кварцевый чехол от образующегося на нем осадка. Очистку производят без

выключения установки путём нескольких возвратно-поступательных движений спирали, передвигаемой с помощью рукоятки.

Установка типа ОВ-ЗН предназначена для обеззараживания воды на водоочистных комплексах небольшой мощности. Она состоит из корпуса в виде прямоугольной камеры с тремя лотками, крышки корпуса, в которой размещены бактерицидные лампы, и шкафа управления. Установка оборудована бактерицидными лампами БУВ-60П и рассчитана на производительность до  $8,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Вода в установке ОВ-ЗН движется самотёком через прямую камеру, дырчатую перегородку и далее проходит по лоткам, дважды меняя направление. Потеря напора в установке при расчётном расходе воды составляет  $0,10\text{--}0,15 \text{ м}$ . Установку монтируют в помещении с температурой воздуха не ниже  $+5^\circ\text{C}$  и только в горизонтальном положении.

Установка типа ОВ-АКХ-1 (рисунок 6.6) применяется для обеззараживания воды на водопроводах средней производительности.



1, 6 – подача и отвод воды; 2 – бактерицидная камера; 3 – ртутно-кварцевые лампы ПРК-7;  
4 – кварцевые чехлы; 5 – струенаправляющие перегородки

Рисунок 6.6 – Бактерицидная установка ОВ-АКХ-1

Установка состоит из двух основных частей: технологической и электрической. В первую входят секции установки, включающие ряд (от двух до пяти) последовательно соединённых бактерицидных камер, вторая состоит из шкафа управления и ящика сигнализации. Каждая камера представляет литую цилиндрическую конструкцию с шестью внутренними радиальными перегородками, обеспечивающими интенсивное перемешивание воды во время облучения. В центральной части каждой камеры в кварцевом цилиндрическом чехле помещена ртутно-кварцевая лампа типа ПРК-7. Производительность установки в зависимости от числа камер составляет от 30 до  $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Обеззараживаемая вода подаётся во входной патрубок и движется через последовательно расположенные камеры и далее в сеть.

Напорная установка ОВ-1П-РКС состоит из камеры, оборудованной спиралью и одной лампой РКС-2,5, помещённой в кварцевом чехле. Комплект установки состоит из ряда цилиндрических последовательно соединённых типовых камер. Подача одной камеры составляет до  $70 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Безнапорная установка ОВ-3П-РКС рассчитана на расход  $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и более. Она устанавливается в канале в виде рам-кассет, на которых закреплены блоки с лампами РКС-2,5. В кассете закрепляют несколько ламп, защищённых кварцевыми цилиндрическими чехлами. Чтобы обеспечить турбулентный режим движения воды в канале и хорошее перемешивание во время облучения, лампы располагают в шахматном порядке. Это обеспечивает высокий коэффициент использования бактерицидного потока. Канал, оборудованный кассетами, сверху перекрыт съёмными крышками. Рядом с каналом располагается пульт управления с пусковой аппаратурой к лампам. Многолетний опыт эксплуатации установок обеззараживания воды бактерицидными лучами показывает, что этот метод обеспечивает надёжную дезинфекцию воды. Эксплуатационные расходы на обеззараживание воды облучением не превышают эксплуатационных затрат на хлорирование, а на водопроводах, использующих в качестве источников водоснабжения подземные, родниковые или подрусловые воды, обеззараживание воды облучением дешевле в два-три раза по сравнению с хлорированием. Расход электрической энергии на обеззараживание воды из подземных источников водоснабжения облучением не превышает  $10\text{--}15 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ . Расход электрической энергии на облучение обработанной воды из открытых источников водоснабжения составляет до  $30 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ . Недостатком рассматриваемого метода обеззараживания, как и озонирования, является отсутствие длительного (пролонгированного) действия в водопроводных сетях. В последнее время широкий выбор бактерицидных установок предлагает НПО «ЛИТ» [60].

## 6.2 Химические методы очистки

Осветление и обесцвечивание воды заключается в удалении взвешенных и коллоидных веществ, имеющих разную степень дисперсности. Укрупнение частиц дисперской системы и ускорение их осаждения и фильтрования проводят коагулированием. При этом также происходит удаление коллоидных веществ, обуславливающих цветность воды, и некоторых видов планктона. Для интенсификации процесса коагуляции применяют первичное хлорирование (возможно с предварительной аммонизацией) или озонирование, подщелачивание и флокуляцию. Улучшение привкуса и запаха добиваются обработкой воды окислителями или активированным углем. Обеззараживание воды проводят хлорированием или озонированием, а также бактерицидным облучением. При обработке воды, помимо указанных реагентов, в необходимых случаях применяют кремнефтористый натрий, соли аммония или аммиак, сернокислый газ и др. Характеристика реагентов приведена в

[41, 55]. Виды реагентов и их дозы определяются на основании анализа качественного состава природной воды из источника водоснабжения.

Химическая водоочистка основана на химических реакциях реагентов с загрязняющими веществами в водном растворе и их обезвреживании путём перевода в неопасные формы или связывании в нерастворимые соединения, для удаления которых применяют отстаивание или фильтрацию. Химические процессы при очистке воды идут с одинаковой скоростью в любом объёме жидкости, потому этот метод считается эффективным и производительным. Химическая очистка воды на предприятиях лежит в основе обеспечения оборотного водоснабжения и обезвреживания промышленных вод.

Несмотря на огромное разнообразие загрязняющих веществ, их соединений и формы присутствия в водном растворе очистка воды от химических загрязнений проводится четырьмя основными методами:

1 Нейтрализация. Основана на стабилизации кислотно-щелочного баланса жидкости. При введении реагентов загрязнения смешиваются с щелочной или кислой средой и нейтрализуются.

2 Окисление. Специальные реагенты, добавляемые в воду, нейтрализуют содержащиеся химические соединения и бактерии. Воздействие снижает токсичность потенциально опасных для здоровья человека элементов.

3 Хлорирование. Метод востребован благодаря доступности реагентов (хлора), пониженной вероятности повторного загрязнения и объемному воздействию на большую часть опасных соединений. Важно правильно дозировать хлорсодержащие вещества, так как они также представляют немалую опасность.

4 Озонирование. Наиболее экологичный метод, который со временем должен заменить хлорирование либо снизить дозу перед подачей воды в старые сети. Озонирование эффективнее, и при этом рабочее вещество со временем превращается в безобидный кислород. Даже при превышении дозировки озона вода не представляет угрозы для здоровья человека.

Для получения питьевой воды из всех видов природных источников наиболее часто используется коагулирование. Завершается этот процесс отделением агрегатов от жидкой фазы посредством отстаивания и фильтрации. Оптимальный подбор реагентов, выбор дозы коагулянта, конструкции сооружений для приготовления растворов реагентов, их смешивания подробно описаны в работах [41, 44–46, 55, 59] и ряде других.

### 6.2.1 Реагентная нейтрализация

Нейтрализация основана на оптимизации кислотно-щелочного баланса за счёт реакции нейтрализации между кислой и щелочной средой с образованием солей. Метод часто применяется при химической очистке возвратной технической воды на производстве, так как вода из подземных или поверхностных источников обычно имеет нейтральную среду и корректировки pH не требует. После очистки воды нейтрализацией она становится при-

годной для повторного технического использования и безопасной для природы.

В качестве химических агентов при нейтрализации кислотности среды применяют гидроксиды щелочных металлов К и Na, гидроксид аммония  $\text{NH}_4\text{OH}$ , соду  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , известковое молоко  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Выбор реагента зависит от концентрации и кислотности воды. Для нейтрализации щелочных вод используют растворы кислот или газы  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ .

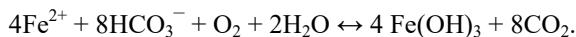
Для реализации технологических схем водоочистки методом нейтрализации применяют специальное оборудование для химической водоподготовки: накопители, осветители, отстойники. Выбор схемы химической очистки воды нейтрализацией зависит от климатических условий, природной pH-среды водоёмов и подземных источников.

### 6.2.2 Окисление

Окисление занимает основную позицию среди технологий химической очистки воды. Самый распространённый метод окисления – аэрация.

Наиболее широко в Республике Беларусь для обезжелезивания используется метод упрощённой аэрации – переливом воды с разбрызгиванием в емкость-отстойник с перепадом, как правило, не менее 0,5 м. Усовершенствованная аэрация обычно реализуется тремя путями – использованием градирен с загрузкой кольцами Рашига, в напорных ёмкостях и подводом воздуха в ёмкости с водой через пористые аэраторы от компрессора.

Состав воды около 80 % всех источников из подземных скважин соответствует условиям применения этого метода, сущность которого заключается в протекании основной реакции обезжелезивания воды:



Под действием сильных окислителей – хлора и его соединений, перманганата и бихромата калия, озона, перекиси водорода – меняется форма веществ на неопасную, токсичные формы переходят в безвредные, погибает патогенная микрофлора. При химической очистке воды окислением связываются соединения, которые проблематично извлечь другими способами.

### 6.2.3 Обеззараживание хлорированием

Технические, экономические и гигиенические достоинства хлорирования привели к тому, что этот метод стал основным методом обеззараживания питьевой воды и применяется сейчас повсеместно [2, 61, 62].

Впервые хлорную известь для очищения воды предложил русский врач *П. Каракаров* в 1853 г. В 1881 г. немецкий врач и бактериолог *P. Кох* обнаружил антисептические свойства хлорной извести. Практически использовал хлорную известь для дезинфекции питьевой воды австрийский учёный *M. Тraубе* в 1896 г. во время эпидемии. Первое хлорирование питьевой во-

ды в России проведено врачом С. К. Дзержиговским в 1908 г. в связи с эпидемией холеры. В 1910 г. он применил хлорирование водопроводной воды в Кронштадте. С 1911 г. водопроводную воду стали хлорировать в Ростове-на-Дону, а с 1912 г. – в Санкт-Петербурге. После этого обеззараживание воды препаратами хлора стали применять на всех водопроводах, забирающих воду из поверхностных водоёмов или из недостаточно надёжных подземных источников.

Достаточная эффективность хлорирования обеспечивается рядом условий. Вода должна быть предварительно освобождена от взвешенных коллоидных веществ, которые защищают бактерии от воздействия хлора. Эффективность обеззараживания зависит от вида микроорганизмов. Наиболее устойчивы спорообразующие микроорганизмы и вирусы. Легче поддаются действию хлора бактерии группы кишечной палочки.

Для дезинфекции воды используют газообразный хлор или хлорную известь, а также хлорсодержащие реагенты: гипохлорит кальция, дихлоризоциануровую кислоту, диоксид хлора и др.

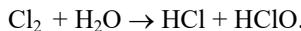
**Хлор** – ядовитый газ зеленовато-желтого цвета с резким удущивым запахом, в 2,45 раза тяжелее воздуха. При атмосферном давлении и температуре 20 °С растворимость Cl<sub>2</sub> в воде составляет 7,29 г/л и увеличивается с понижением температуры и повышением давления. При низкой температуре и высоком давлении (–34,6 °С при атмосферном давлении или 0,575 МПа при 15 °С) хлор сжижается. Для предотвращения испарения жидккий хлор хранят под давлением 0,6–0,8 МПа в баллонах.

Эффект действия хлора на микробы зависит от начальной дозы хлора, продолжительности сохранения его в воде и pH воды. Хлор расходуется на окисление примесей органического и неорганического происхождения. Переход хлора наблюдается при хлорировании неотстоявшейся воды. Взвешенные вещества адсорбируют хлор, а микробы, находящиеся внутри хлопьев или комочеков взвеси, не подвергаются действию хлора.

Обеззараживание воды газообразным хлором обусловливает следующие эффекты: приводит к разрушению органических примесей, например, гуминовые вещества минерализуются до CO<sub>2</sub>, железо (II) окисляется до железа (III), Mn (II) до Mn (IV); устойчивые суспензии примесей превращаются в неустойчивые из-за разрушения коллоидных частиц. Иногда хлорирование приводит к образованию сильно пахнущих продуктов распада растительных и животных организмов. Особенно устойчивыми и неприятными являются запахи, возникающие при хлорировании воды, загрязненной ароматическими соединениями и фенолами (1 : 10 000 000). Со временем они усиливаются и не исчезают при нагревании. Хлорирование способствует очистке вод от мелкодисперской взвеси, создаёт благоприятные условия для осветления и фильтрования.

Молекулярный хлор в воде гидролизуется с образованием соляной и

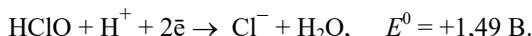
хлорноватистой кислот:



Нестойкая хлорноватистая кислота диссоциирует, в результате чего образуется гипохлоритный ион ( $\text{OCl}^-$ ):



Хлорноватистая кислота – очень слабая и ее диссоциация зависит от активной реакции среды. Чем ниже значение pH системы, тем выше содержание в ней хлорноватистой кислоты, которая имеет высокий окислительно-восстановительный потенциал:



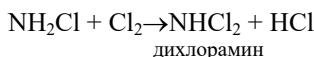
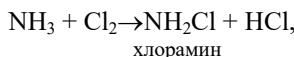
Обеззараживание воды хлором желательно проводить до введения в воду щелочных реагентов. Бактерицидность хлора больше при малых значениях pH.

Активный хлор легко проникает в бактериальные клетки и инактивирует ферменты, содержащие SH-группы. В первую очередь, это ферменты, обеспечивающие окислительно-восстановительные процессы клеточного обмена. Нарушение обмена веществ приводит к гибели бактерий.

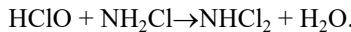
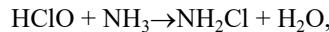
Общее количество хлора, которое расходуется на взаимодействие с окисляющими примесями, – это *хлоропоглощаемость*, или *хлороемкость*, воды. Она зависит от свойств примесей, содержащихся в обрабатываемой воде, времени контакта хлора с водой, температуры воды и количества введенного хлора. При концентрации примесей до 1 мг/л хлоропоглощаемость изменяется пропорционально времени контакта, при более высоких концентрациях обнаруживается логарифмическая зависимость от времени [63].

Необходимую дозу хлора определяют на основе экспериментально построенной кривой хлоропоглощаемости воды. *Оптимальной* считается доза, которая при заданном времени контакта обеспечит в воде требуемую концентрацию остаточного хлора. Для хозяйствственно-питьевых вод оптимальные дозы – 0,3–0,5 мг/л свободного хлора при времени контакта 30 минут и 0,8–1,2 мг/л связанного хлора при времени контакта 60 минут. При отсутствии технологических проб дозу хлора принимают: для обеззараживания поверхностных вод 2–3 мг/л; для подземных вод 0,7–1,0 мг/л. Необходимая доза хлора (*показатель хлорируемости*) служит для оценки качества воды.

Если в воде присутствуют аммонийные соли или аммиак, хлор в виде «связанного активного хлора» фиксируется посредством следующих процессов:



или



Основные обеззараживающие вещества  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HClO}$  и  $\text{OCl}^-$  образуют свободный хлор, а  $\text{NH}_2\text{Cl}$  и  $\text{NHCl}_2$  – связанный хлор [64].

При выборе дезинфицирующего вещества следует учитывать содержание в нем «активного» хлора. Понятие «активный» хлор определяет не истинное содержание хлора в соединении, а его окислительную способность в кислой среде по йодиду калия.

**Хлорирование жидким хлором** широко применяют для обеззараживания воды на средних и крупных водоочистных станциях. Ввиду малой растворимости жидкого хлора реагент предварительно испаряют. Затем хлоргаз растворяют в малом количестве воды и полученную хлорную воду перемешивают с обрабатываемой водой. Дозировка хлора происходит в фазе газообразного вещества в газодозаторах (*хлораторах*), которые могут быть напорными и вакуумными. СН 4.01.01-2019 требует использования последних из-за меньшей опасности попадания хлор-газа в воздух помещений. Разработаны автоматические хлораторы, поддерживающие в воде заданную концентрацию остаточного хлора.

Трубопроводы хлорной воды выполняют из коррозионностойких материалов. В помещении трубопровод устанавливают в каналах или на кронштейнах, вне здания – в подземных каналах или футлярах из коррозионностойких труб.

После связывания активного хлора в воде должно остаться некоторое количество свободного остаточного хлора. Необходимая доза хлора представляет сумму хлоропоглощаемости воды и остаточного активного хлора (таблица 6.6).

**Таблица 6.6 – Необходимые дозы хлора для обеззараживания воды различного происхождения**

| Качество воды                    | Доза активного хлора, мг/л |
|----------------------------------|----------------------------|
| Артезианская вода                | 1,0–1,5                    |
| Прозрачная колодезная воды       | 1,5–2                      |
| Вода крупных рек и озер          | 2–3                        |
| Мутная вода из колодцев и прудов | 3–5                        |

При повышенном органическом и бактериальном загрязнении воды водоёмов паводковыми и ливневыми стоками применяют двойное хлорирование и суперхлорирование (перехлорирование, гиперхлорирование).

При *двойном хлорировании* первый раз хлор вводят в смеситель перед отстойниками, что облегчает коагуляцию и подавляет рост бактерий на

фильтре. Второе хлорирование воды после фильтрации значительно эффективнее.

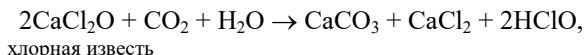
*Суперхлорирование* отличается от обычного хлорирования тем, что хлор подают в повышенных дозах – 5–10 мг/л и более. Это существенно повышает скорость и надёжность обеззараживания. Однако появляются неблагоприятные последствия: уровень остаточного хлора достигает 1–5 мг/л. Поскольку пороговая концентрация хлора в питьевой воде по органолептическому признаку составляет 0,5 мг/л, такая воды нуждается в дополнительной обработке. Дехлорирование проводят химической реакцией с гипосульфитом и сернистым газом или сорбцией хлора активированным углем.

*Перехлорирование* применяют в условиях, когда микробиологические свойства воды быстро и в больших пределах меняются, при высокой цветности природной воды, большом содержании в воде органических веществ и планктона. Перехлорирование используют в системах технического водоснабжения как средство против образования биологической плёнки. При применении перехлорирования в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения необходимо следить за образованием хлорогранических соединений (тригалогенметанов) – канцерогенных веществ, содержание которых во многих странах нормируется стандартом. В частности, Всемирная ассоциация здравоохранения рекомендует норму 30 мг/л.

Нередки случаи загрязнения водоёмов промышленными и городскими ливневыми стоками, содержащими соединения фенола. Образовавшиеся при хлорировании такой воды хлорфенолы придают питьевой воде неприятный «аптечный» запах. Это явление можно предупредить внесением в воду аммиака или его солей за несколько секунд до подачи хлора. Хлор связывается с аммиаком, образуя хлорамины, оказывающие мощное и длительное обеззаражающее действие.

**Хлорирование порошкообразными хлорсодержащими реагентами и диоксидом хлора** осуществляют на малых станциях и водоочистных установках. Реагентами служат твёрдые дисперсные вещества – хлорная известь и гипохлорит кальция. Эти вещества менее опасны в обращении, чем жидкий хлор, процесс их подготовки и подачи значительно проще – практически аналогичен применению коагулянта.

*Хлорную известь* получают обработкой сухой, негашёной извести хлором. При контакте с воздухом и влагой хлорная известь постепенно разлагается:

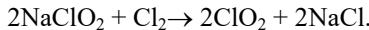


поэтому реагент необходимо хранить в сухом, вентилируемом помещении в закрытой таре.

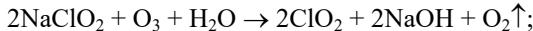
*Гипохлорит кальция* образуется при насыщении известкового молока хлором:



Диоксид хлора получают непосредственно на водоочистной станции хлорированием хлорита натрия  $\text{NaClO}_2$ :

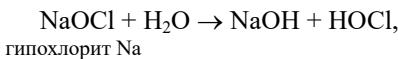


Вместо хлора для получения  $\text{ClO}_2$  можно использовать озон или соляную кислоту:



$\text{ClO}_2$  является ядовитым, взрывоопасным газом с интенсивным запахом, водный раствор его практически безопасен. По сравнению с  $\text{Cl}_2$  диоксид хлора имеет ряд преимуществ – более высокая бактерицидность в щелочной среде, более активно окисляет органические вещества, может разлагать фенолы, не придавая воде хлорфенольного запаха, наличие в воде аммиака не снижает эффективности  $\text{ClO}_2$ .

При введении в воду хлорсодержащих веществ происходит, как и в случае с  $\text{Cl}_2$ , их гидролиз с образованием хлорноватистой кислоты, например:



Гидролиз солей протекает медленнее, чем гидролиз свободного хлора, поэтому и образование  $\text{HOCl}$  идет медленнее.

При **хлорировании воды прямым электролизом** предполагают электролитическое изготовление бактерицидного хлора из собственных хлоридных ионов, имеющихся в природной воде. Метод прямого электролиза реализуют с помощью установки «Поток» при содержании в воде хлоридов не менее 20 мг/л и общей жесткости не более 7 мг-экв/л.

Избыток активного хлора может быть удален из воды сорбентами, угольными фильтрами или аэрированием. При химическом дехлорировании избыточный активный хлор связывается сульфитом натрия или диоксидом серы.

Обработка воды хлорсодержащими соединениями чаще всего встречается в технологических схемах химической водоподготовки на производстве и в потребительском водоснабжении. Бактерицидные свойства хлора гарантируют, что качество воды не повлияет сложный транспортный путь доставки воды по трубопроводам от насосной станции до конечного потребителя. Хлорреагенты недороги и доступны. Вместе с хлорирующими веществами часто вводят аммиак и аммонийные соли для предотвращения образования хлорфенольных соединений с неприятным запахом и привкусом.

Добавление перманганата калия способствует разрушению органических веществ, образующих хлорпроизводные с резким неприятным запахом. Од-

нако химическая очистка питьевой воды хлором должна осуществляться при строгом контроле дозирования реагента, так как хлор может образовывать токсичные соединения при взаимодействии с растворёнными в воде веществами. Перед подачей такой воды потребителю её дехлорируют  $\text{SO}_2$ , гипосульфитом, сульфитом натрия или адсорбцией на активированном угле.

#### **6.2.4 Очистка и обеззараживание озонированием**

В последнее время на передовые позиции выходит озонирование, в несколько раз превышающее по эффективности химическую обработку воды хлорсодержащими веществами. Благодаря высокому окислительному потенциальному озон окисляет вещества, которые обычно не окисляются другими реагентами. Длительность контакта озона с водой не превышает 10–15 минут, а побочные соединения при этом не образуются. Так как озон поступает в воду с большим количеством воздуха, одновременно происходит аэрирование воды. В результате очистки озонированием вода приобретает свежий привкус и запах, характерный для поверхностных или ключевых вод хорошего качества. Взрывоопасность и сложность получения в необходимом количестве тормозят процесс повсеместного внедрения озона как химического реагента очистки воды. При озонировании необходимо строго соблюдать технику безопасности на очистных сооружениях во избежание негативных последствий.

**Озон ( $\text{O}_3$ )** – более сильный окислитель, чем диоксид хлора или свободный хлор [65]. В природе озон образуется из кислорода в верхних слоях атмосферы под действием солнечной радиации. Озон получают в технических условиях при коронном разряде, который образуется в узком зазоре между электродами высокого напряжения (5–29 кВ) при атмосферном давлении в озонаторах.

Сильные окислительные свойства озона обусловливают его выраженное бактерицидное действие. Озон действует на микроорганизмы быстрее хлора и не только надёжно обеззараживает воду, но достаточно эффективно обесцвечивает её, устраняет запахи и привкусы. Озон и его соединения не обладают ни запахом, ни вкусом. Даже в большом количестве озон в воде нетоксичен, так как в течение нескольких секунд превращается в кислород. Его действие, в отличие от хлора, мало зависит от физических и химических свойств воды. Кроме того, озон не требует сложного оборудования для доставки и хранения, поскольку производится непосредственно на месте газоразрядным методом в озонаторах.

Озонирование воды заключается в перемешивании с озоновоздушной смесью в контактных камерах при времени контакта 5–20 мин.  $\text{O}_3$  относится к малорастворимым газам, поэтому технология введения озоновоздушной смеси в воду и конструкция контактной камеры имеют большое значение для эффективного использования и снижения потерь озона. Озон универсальный реагент, обеспечивает обеззараживание, обесцвечивание, дезодорацию воды, удаление

Fe и Mn. Он разрушает соединения, не поддающиеся воздействию хлора (фенолы), но обладает сильными коррозионными свойствами, токсичен. ПДК  $O_3$  в воздухе помещений 0,0001 мг/л. Может разрушать некоторые органические вещества, не окисляя их до конца. Главный недостаток озона – кратковременность действия, поэтому  $O_3$  подают в воду в конце технологической схемы очистки для обеззараживания воды.

Эффективность озонирования зависит от концентрации и свойств загрязняющих воду веществ, дозы  $O_3$ , температуры и pH воды, метода подачи озона-воздушной смеси в воду. Дозу озона и оптимальную схему озонирования определяют на основе предварительных технологических исследований. При отсутствии соответствующих данных СНиП рекомендует для озонирования подземных вод принимать дозу  $O_3$  0,75–1,0 мг/л, для профильтрованных вод 1–2 мг/л.

Озонирование используют и для очистки сточных вод: расчётная доза  $O_3$  2–4 мг на 1 мг загрязнителя (нефтепродуктов, фенолов, ПАВ).

При доочистке дозой озона 20 мг/л биологически очищенных городских сточных вод химическое потребление кислорода (ХПК) снижается на 40 %, биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>) – на 60–70 %, ПАВ – на 90 %, окраска воды – на 60 %. Одновременно происходит обеззараживание воды.

Несмотря на явные преимущества (особенно гигиенические) озонирования воды, метод хлорирования на водопроводных станциях находит в настоящее время гораздо более широкое применение по экономическим причинам.

Озон – аллотропная модификация кислорода, нестабильный газ, образующийся в результате ионизирующего действия на кислород электрического поля с высоким потенциалом. Газ голубоватого цвета с молекулярной массой 48 г/моль; плотностью (при 0 °C и давлении 0,1 МПа) – 2,143 г/л; теплотой образования –143,64 кДж/моль; коэффициентом растворимости в воде при 0 °C – 0,49 (или 1,09 г/л), а при 20 °C – 0,29 (или 0,57 г/л); окислительно-восстановительным потенциалом – 2,07 В [59, 66, 67]. При температуре 111,9 °C озон превращается в нестойкую жидкость темно-синего цвета [66].

На рисунке 6.7 представлена схема трубчатого элементарного генератора озона [67]. Генерация озона осуществляется следующим образом. Поток сухого воздуха (или кислорода) поступает в кольцевой зазор между электродами. При наложении переменного тока высокой частоты происходит разряд в межэлектродном пространстве и образуется озон. Диэлектрик (стеклянная труба) исключает появление дуговых разрядов и обеспечивает равномерную структуру лучистого разряда. Работа генератора сопровождается слабым фиолетовым свечением в межэлектродном пространстве. Промышленные генераторы озона состоят, как правило, из нескольких десятков и сотен параллельно установленных трубчатых единичных генераторов.

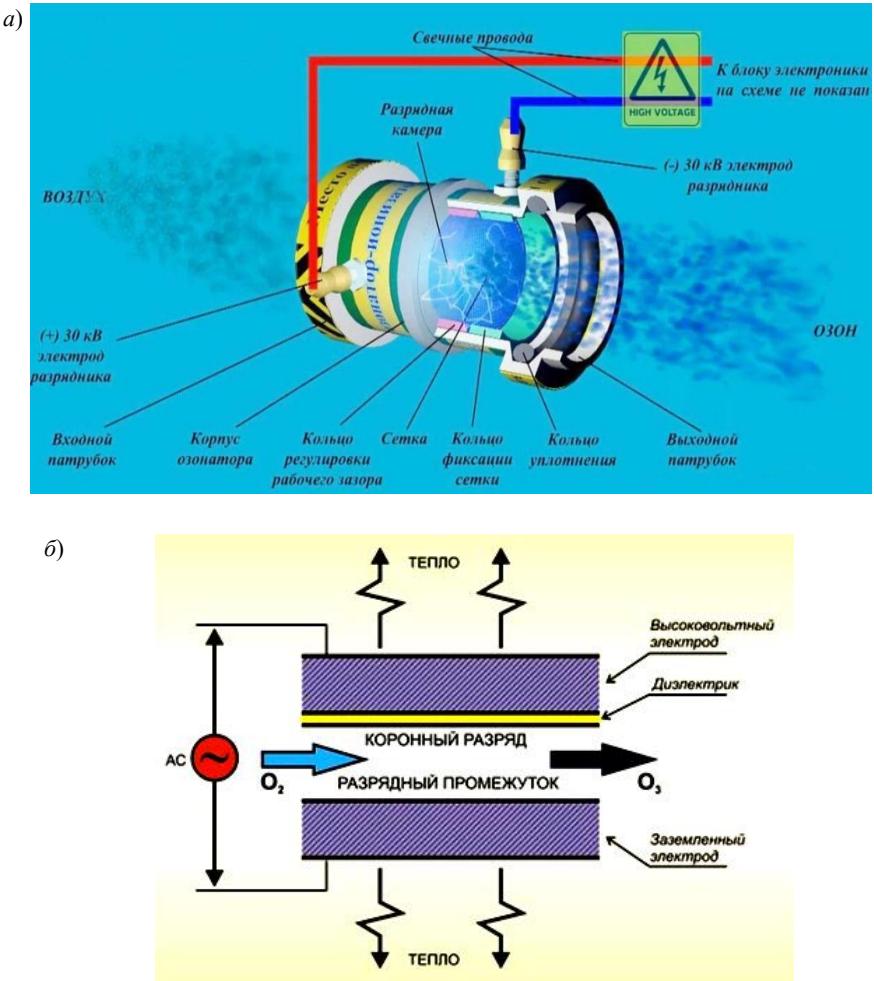


Рисунок 6.7 – Схема трубчатого элементарного генератора озона (а) и получения озона в коронном разряде (б)

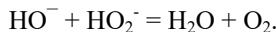
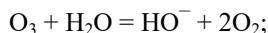
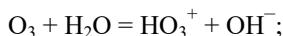
Обычно концентрация озона в образующейся озоновоздушной смеси составляет 10–20 г/м<sup>3</sup>. При такой концентрации и при условии интенсивной сушки воздуха (точка росы 40–60 °С) производительность современных аэраторов находится в пределах 50–100 г/ч О<sub>3</sub> на 1 м<sup>2</sup> поверхности электродов. Потребление энергии озонаторной установки от 20 до 30 Вт·ч на 1 г О<sub>3</sub> [66, 67]. На генерацию озона расходуется лишь 14–18 Вт·ч на 1 г О<sub>3</sub>. Вслед-

ствие потерь при разряде значительная часть энергии превращается в тепло, что повышает температуру. Поскольку при этом выход озона снижается, система охлаждается циркуляцией воды в рубашке электродного блока.

Обеззаражающее действие озона основано на высокой окислительной способности легко отдаваемого активного атома кислорода



В чистой воде разложение озона идет по реакциям [40, 66, 67]:



Образующиеся при разложении озона свободные радикалы  $\text{HO}_2^-$  и  $\text{OH}^-$  обладают большой окислительной способностью и реагируют практически с любыми загрязнениями в растворе: всеми органическими веществами, микроорганизмами и бактериями; всеми металлами (кроме золота) и их соединениями; водородом, азотом, фосфором, серой, углеродом и всеми их соединениями; ПАВ; карбамидом; цианидами (превращая их в менее токсичные цианиты, а затем, путем гидролиза или окисления – в углекислоту и газообразный азот); фенолом и т. п. [40, 66, 67].

При обработке воды озоном решаются одновременно две важные задачи: разложение органических и неорганических загрязнений; обеззараживание воды. В этом случае бактерии, вирусы и патогенная микрофлора погибают в несколько тысяч раз быстрее, чем при обработке воды хлором [66]. Кроме того, озон не токсичен для обитателей водной среды водоемов, куда осуществляется выпуск очищенных сточных вод, и поддерживает на высоком уровне остаточную концентрацию кислорода в них.

Растворимость озона в воде зависит от температуры, активной реакции среды, ее солевого состава. При понижении температуры и повышении pH растворимость озона возрастает, основные соли снижают его растворимость, а нейтральные – повышают. Окислительное действие озона проявляются в следующих формах: прямое окисление, окисление радикалами, озонолиз, катализ. По сравнению с другими окислителями озон вступает в реакции намного быстрее и в меньшей дозе [40, 66, 67]. Использование его для доочистки воды обусловлено высокой агрессивностью к минеральным и органическим загрязнениям воды. Окислительный потенциал озона, отнесенный к единице положительного иона водорода, равен 2,07 В, в то время как потенциал хлора составляет лишь 1,36 В. Озон не только не теряет

окислительной способности в водном растворе, но и по ряду данных его окислительный потенциал в растворе выше, чем в газовой смеси [66, 67].

Озон проявляет почти одинаковую активность в широком интервале pH и температуры. При совместном действии озонолиза (процесса фиксации озона на двойной или тройной углеродной связи с последующим ее разрывом и образованием быстроразлагаемых озонидов) и окисления радикалами дополнительно удается удалить коллоидные вещества, токсичные микрозагрязнители, растворенные органические вещества естественного и искусственного происхождения.

Учитывая универсальность воздействия озона на загрязнители, его преимущества как мощного и быстродействующего окислителя, поставщика кислорода, эффективного дезинфектанта, метод озонирования можно рекомендовать как для обеззараживания питьевой воды, так и для доочистки и обеззараживания сточных вод, прошедших стадии биохимической или физико-химической очистки.

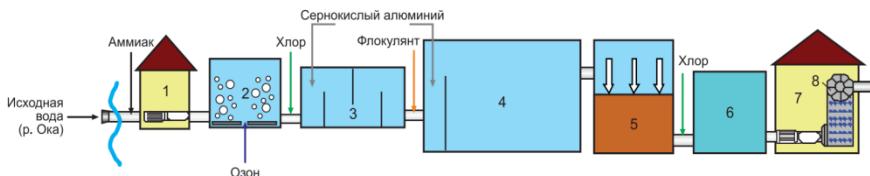
В России впервые озон был применён для обеззараживания воды на фильтро-озонной станции в Санкт-Петербурге в 1911 г. В настоящее время действует более 1000 крупных водопроводных станций, использующих озонирование в технологическом процессе подготовки питьевой воды [68, 69], во Франции, Швейцарии, США, а также в России (Москва, Ярославль, Челябинск, Красноярск и др.), в Беларуси (Минск, Могилев) и в Украине (Киев).

Исторически первое основное назначение озона состояло в удалении запахов, привкусов и обеззараживании воды. Основателем технологии озонирования питьевой воды является Франция, которая в 1997 г. отметила столетие эффективного использования озона при подготовке питьевой воды и начала промышленного производства озонаторного оборудования.

На территории бывшего СССР озонирование начало применяться лишь с 1976–1978 гг. на крупных водопроводных станциях Москвы, Киева, Нижнего Новгорода и Минска с использованием оборудования французской фирмы Traeligaz. На всех этих станциях озон используется для улучшения органолептических показателей, устранения привкусов и запаха, снижения расхода коагулянтов и хлора. В зимнее время использование озона позволяет иногда полностью отказаться от коагулирования воды для ее очистки. Однако основное назначение озонирования – не только указанные выше задачи, но и снижение цветности, окисление неорганических соединений (в первую очередь, железа и марганца), специфических органических соединений (фенолов, нефтепродуктов, ПАВ, пестицидов, аминов) [68–70]. Использование озона позволяет, кроме того, существенно улучшить параметры процессов коагуляции и фильтрования [68].

Как показывает опыт [68, 70], в большинстве больших городов СНГ, в связи с возрастанием загрязнения поверхностных источников, невозможно традиционными технологиями без применения озона получить питьевую

воду, соответствующую требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества». В последнее время в Российской Федерации расширяются масштабы применения озона при подготовке питьевой воды [69]. В Нижнем Новгороде работает станция «Малиновая Грязь» с озонаторным оборудованием фирмы Ozonia (Швейцария), введена в эксплуатацию Слудинская водопроводная станция (рисунок 6.8).



1 – насосная станция первого подъема; 2 – контактная камера озонирования;  
3 – смеситель; 4 – горизонтальный отстойник или осветлитель; 5 – скорый песчаный фильтр;  
6 – резервуар чистой воды; 7 – насосная станция второго подъема;  
8 – установка ультрафиолетового обеззараживания

Рисунок 6.8 – Технологическая схема очистки воды  
на Слудинской водопроводной станции [71]

Схема водоподготовки на Слудинской станции включает в себя предварительную аммонизацию перед насосом первого подъема, первичное озонирование в контактной камере, первичное хлорирование, подачу коагулянта (сернокислого алюминия) в смеситель, а также, при необходимости, перед осветителями, использование флокулянта, осветление в горизонтальных отстойниках или осветителях с взвешенным осадком, фильтрацию на скорых фильтрах, вторичное хлорирование, УФ-обеззараживание.

В Кургане введена в эксплуатацию первая в России водопроводная станция, на которой используется озонаторное оборудование ОАО «Курганхиммаш» производительностью 120 кг озона в час. Оборудование такой же производительности изготовлено для водоочистной станции Тюмени. В Москве планируется, помимо Восточной водопроводной станции, использование озона на четвертом блоке Рублевской и Западной водопроводной станции. В Ярославле строится водоочистная станция производительностью 100000 м<sup>3</sup> в сутки с использованием озонирования. Планируется использование озона в водоподготовке в Самаре, Перми, Кемерове и Ижевске.

Многие специалисты ошибочно предлагают при использовании озонирования исключить необходимую реагентную обработку воды. Однако при использовании поверхностных источников питьевой воды, характеризующихся повышенными значениями мутности, цветности, значения которых существенно меняются в течение года, коагулирование и фильтрация оста-

ются основными процессами водоподготовки для питьевых целей [69, 70]. Предварительное озонирование воды способствует более глубокому удалению загрязнений, что позволяет уменьшить расход коагулянтов на 20–30 %. При использовании озонирования можно снизить дозу хлора при первичном хлорировании или даже полностью отказаться от него. Однако для обеспечения санитарно-гигиенической безопасности и сохранения качества воды в сети необходимо на заключительных стадиях обработки проводить ее обеззараживание хлорагентами [69].

Для эффективного обеззараживания питьевой воды необходимо ввести дозу озона, достаточную для достижения остаточной концентрации озона 0,4 мг/л, которая должна поддерживаться в течение 4 минут [72].

Озон в качестве окислителя используют на разных стадиях подготовки воды. Оптимальные условия применения озона для обработки природных вод зависят от качества исходной воды: pH, концентрации общего органического углерода (ООУ), соотношения легко- и трудноокисляемых органических соединений, щелочности, мутности, цветности. Доза озона при подготовке питьевой воды меньше, чем при очистке и обеззараживании сточных вод, она изменяется в пределах от 2 до 10 мг/л [73].

После обнаружения флокулирующего эффекта, возникающего после озонирования, практическое использование получило применение озона в начале технологической цепочки. Предозонирование повышает эффективность последующей коагуляции и фильтрования в большей степени, чем предхлорирование. В настоящее время предварительное озонирование, как метод обработки питьевой воды, имеет не меньшее значение, чем дезинфекция [73–75].

Предварительное озонирование вызывает следующие изменения [75]: смещение распределения размеров частиц загрязнителя в сторону более крупных; перевод растворенных органических высокомолекулярных соединений в коллоидную форму; более полное удаление ООУ в течение последующего осаждения, флотации или фильтрования; снижение доз коагулянтов, необходимых для достижения требуемой степени осветления воды; увеличение скорости осаждения хлопьев и длительности фильтроцикла. Обнаружено, что малые дозы озона (0,5–1,5 мг/л), а в общем случае <3 мг/л [68], являются наиболее эффективными. Дальнейшее повышение дозы при обработке воды коагулянтом приводит к проскоку в фильтрат мелкой фракции песчаной загрузки и повышению концентрации остаточного алюминия. Жесткость воды также оказывает влияние на флокулирующую способность предозонирования. Оптимальная коагуляция под воздействием озона наблюдается в природной воде с отношением жесткости к содержанию ООУ, превышающем 25 мг CaCO<sub>3</sub> на 1 мг С, и при дозах озона в пределах 0,4–0,8 мг O<sub>3</sub> на 1 мг С [72].

Вместе с тем озонирование также не лишено недостатков. Быстрое разложение озона в обработанной воде ограничивает его применение в качестве конечного дезинфицирующего средства. При pH 7,6 и 20 °C остаточный озон в концентрации 0,4 мг/л разлагается менее чем за 1 ч. Поэтому возникает вопрос о необходимости поддержания бактериальной стабильности воды в распределительных сетях. В большинстве случаев для обеспечения качества воды в распределительных сетях по-прежнему используется хлор и его препараты в незначительных концентрациях.

Многие подземные водные источники характеризуются повышенными концентрациями железа, марганца и органических загрязнений антропогенного происхождения. Для очистки таких вод в последнее время также стало успешно использоваться озонирование. Авторами [76] разработаны варианты применения технологии комплексной очистки подземных вод от соединений железа, марганца и органических загрязнений (рисунок 6.9).

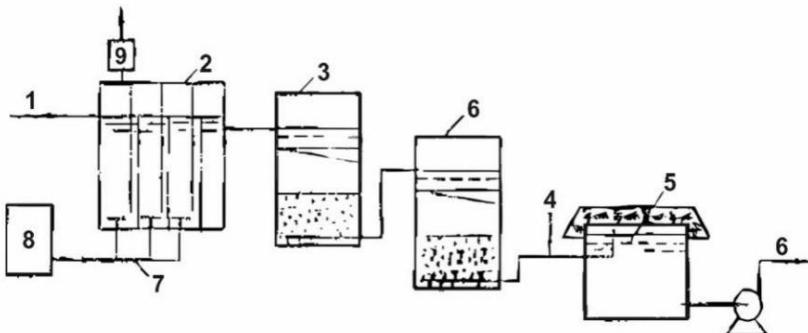
На рисунке 6.9, а представлен вариант схемы комплексной очистки подземной воды с предварительным озонированием и последующим фильтрованием на песчаных фильтрах. Этот метод может быть применен при небольших концентрациях в подземной воде трудноокисляемых соединений железа (до 15 мг/л) и марганца (до 0,6 мг/л). При повышенных концентрациях в подземной воде марганца (до 4 мг/л) и железа (более 15 мг/л) целесообразно применять двухэтапную очистку воды, представленную на рисунке 6.9, б. На первом этапе удаляется железо с помощью упрощенной аэрации и фильтрации на песчаном фильтре. На втором этапе проводится окисление марганца озоном до нерастворимых соединений, что достигается при оптимальной дозе озона, и последующее их удаление фильтрацией на второй ступени песчаных или угольных фильтров.

Для обоих рассмотренных случаев сорбционная степень очистки на фильтрах с активным углем необходима при содержании в воде повышенных концентраций органических соединений природного или антропогенного характера, когда схемы озонирования не обеспечивают требуемого качества питьевой воды. При этом активный уголь используется в сорбционных фильтрах, расположенных после осветительных песчаных.

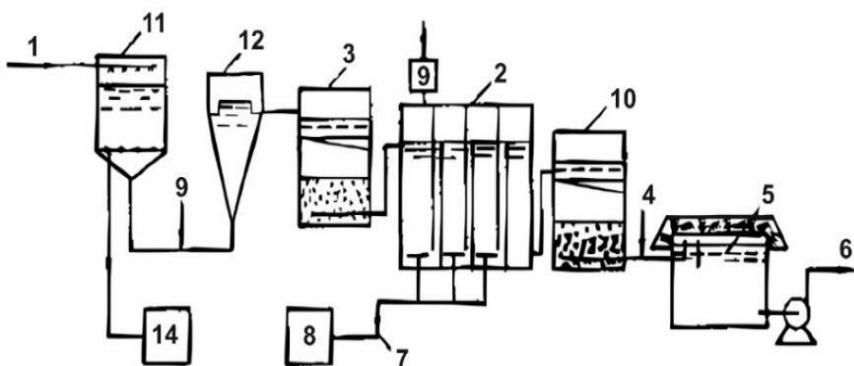
Выбор технологических схем с использованием существующих методов обезжелезивания, удаления марганца, озонирования, сорбционных фильтров зависит от качества воды подземных источников. Поэтому выбор метода и оборудования для очистки воды следует осуществлять только после тщательного лабораторного анализа ее состава и проведения экспериментальных исследований.

При использовании озона для обеззараживания питьевой воды, в которой выявлены устойчивые вирусы, требуется контакт в течение 12 минут.

a)



б)



а – при концентрации Mn до 0,6 мг/л, б – при концентрации Mn до 4 мг/л

1 – подача подземной воды; 2 – контактная камера; 3 – песчаный фильтр;  
4 – подача хлорагента; 5 – резервуар чистой воды; 6 – подача очищенной воды потребителю;  
7 – подача озона-воздушной смеси; 8 – блок подготовки воздуха и синтеза озона; 9 – аппарат  
катализитического разложения озона; 10 – угольный фильтр; 11 – дегазатор озона;  
12 – смеситель; 13 – подача коагулянта (в случае необходимости); 14 – турбовоздуходувка

Рисунок 6.9 – Схема очистки подземных вод от соединений железа, марганца  
и органических загрязнений [76]

Необходимая концентрация остаточного озона зависит от уровня исходной зараженности воды вирусом гепатита А (или энтеровирусами, обладающими аналогичной устойчивостью), цистами лямблей и составляет 0,3–0,8 мг/л [77]. Обеззараживание эффективно при pH воды 6–9 и температуре 5–20 °C.

Для водопроводных станций, на которые длительный период может поступать вода, содержащая аммиак в высокой концентрации, обеззараживание в присутствии остаточного свободного хлора ограничено. Применение озонирования в этом случае более целесообразно [77].

В работе [77] отмечена и недостаточная эффективность УФ-облучения для инактивации ряда микроорганизмов. Так, например, при 10-кратном увеличении мощности облучения, снижающей на 4 порядка содержание кишечной палочки, концентрация жизнеспособных цист лямбдий в воде уменьшается лишь на 21 %, что явно недостаточно.

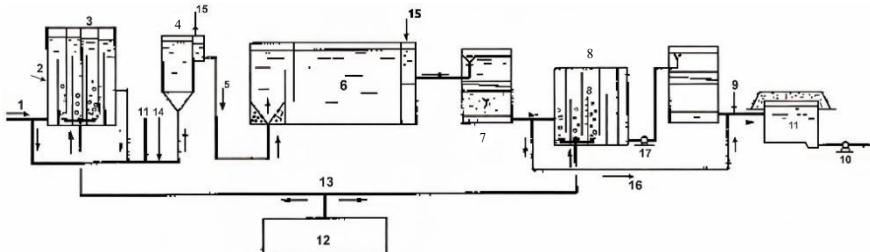
Совершенствование процессов очистки сточных вод с применением озона в настоящее время развивается по двум основным направлениям: создание эффективных, высокопроизводительных генераторов озона, работающих на повышенных частотах [77], и интенсификация процессов массообмена фаз – озона и водной среды. Это достигается двумя путями: за счет изменения скорости реакции при введении катализаторов, фото- и радиохимического воздействия, сочетания озонирования и УФ-облучения, а также за счет увеличения поверхности раздела и времени контакта фаз при уменьшении размеров диспергируемых пузырьков газа.

Среди зарубежных изготовителей озонаторного оборудования различной производительности, используемого в технологии очистки питьевой и сточной воды, наиболее известны на рынке СНГ и Европы три фирмы: «Traeligaz» (Франция), «Webeco GmbH» (ФРГ) и «Ozonia» (Швейцария).

АО «ЦНИИЭП инженерного оборудования» (РФ) разработан типовой проект станции водоподготовки с применением озонирования [78]. Достоинством данного проекта является возможность его успешного использования как для строительства новых, так и для реконструкции старых сооружений очистки поверхностных вод. Проект рассчитан на производительность 20, 50 или 100 тыс. м<sup>3</sup> воды в сутки.

В соответствии с технологической схемой (рисунок 6.10) [78] исходная вода поступает в контактную камеру первичного озонирования, первое отделение которой выполняет функции воздухоотделителя.

В камере в результате контакта воды с озоном происходит процесс окисления органических загрязнений и частичная очистка воды. Далее вода поступает на основные очистные сооружения, предусмотренные типовыми проектами: вихревой смеситель (куда вводятся реагенты); камеру хлопьеобразования; отстойник или осветлитель, скорый песчаный фильтр. Осветленная вода подается затем в контактную камеру вторичного озонирования, совмещенную с промежуточной емкостью, где осуществляется более глубокое окисление оставшихся органических веществ. Вторичное озонирование повышает, кроме того, эффективность последующей сорбционной очистки, увеличивает продолжительность использования активного угля до регенерации, а также улучшает органолептические показатели воды и позволяет в 2–3 раза снизить дозу хлора.



- 1 – подача исходной воды; 2 – воздухоотделитель; 3 – контактная камера первичного озонирования; 4 – смеситель; 5 – камера хлопьеобразования; 6 – отстойник; 7 – быстрый песчаный фильтр; 8 – контактная камера вторичного озонирования; 9 – сорбционный угольный фильтр; 10 – резервуар чистой воды; 11 – подача хлора; 12 – озонаторная установка; 13 – подача озона-воздушной смеси; 14 – ввод коагулянта; 15 – ввод флокулянта; 16 – обводные трубопроводы; 17 – насосная станция подачки

Рисунок 6.10 – Принципиальная схема очистки воды с применением озонирования и сорбционной фильтрации [68]

Затем вода направляется на сорбционные угольные фильтры, обеззараживается хлором, поступает в резервуары чистой воды и насосами второго подъема подается потребителям.

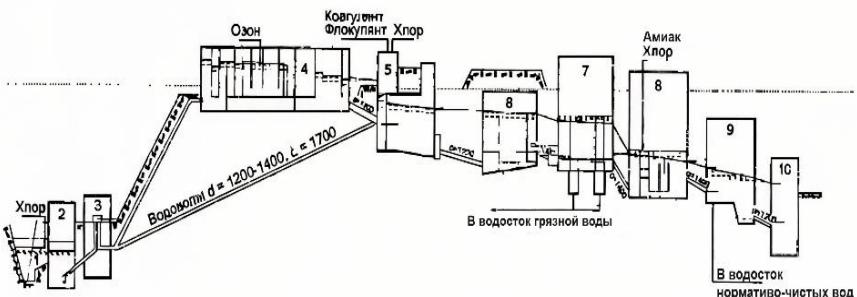
Система обводных коммуникаций позволяет отключать отдельные сооружения при отсутствии необходимости дополнительной обработки воды.

По данным разработчиков [78] суммарная доза озона – 5 мг/л, в том числе для первичного озонирования – 3 мг/л, для вторичного – 2 мг/л. Концентрация озона в озона-воздушной смеси – 15–22 г/м<sup>3</sup> в зависимости от степени загрязненности воды, требуемой эффективности и глубины очистки. Степень полезного использования озона – 80 %, время контакта воды с озона-воздушной смесью в контактных камерах первичного и вторичного озонирования – 10 мин. Время пребывания воды в промежуточном резервуаре – 30 мин. Высота воды в контактных камерах с пористыми диспергаторами не менее 4,5 м. Скорость фильтрования на угольных фильтрах – до 10 м/ч, высота слоя активного угля – 1,7 м. Время контакта воды с углем – 10 мин. Потери напора в угольной загрузке – 0,3–0,4 м, в фильтре в целом – 1,5–2,0 м.

Представленная на рисунке 6.10 схема соответствует рекомендациям работы [79], основанным на огромном научном и практическом опыте известной компании «DeGremon», построившей по подобной схеме несколько десятков станций по всему миру. Следует обратить внимание специалистов на оригинальную схему U-образного контактного реактора, разработанного фирмой и используемого для полнопоточного обеззараживания очищенной воды. При этом для обеспечения одновременной очистки и обеззараживания воды рекомендуется использовать трехступенчатую контактную камеру с подачей озона через пористые дисковые аэраторы, размещенные на дне [79].

Технико-экономические расчеты [78] показали, что стоимость озонаторного оборудования составляет до 27 %, а сорбционной угольной загрузки до 35 % общей стоимости строительства очистных сооружений по разработанному типовому проекту.

На рисунке 6.11 представлена схема старейшей в СНГ системы озонирования на Восточной водопроводной станции (г. Москва) [80], которая введена в эксплуатацию в январе 1976 г. В работе [80] приведены важные для практики эксплуатации подобных систем результаты, обобщающие долголетний опыт эксплуатации.



1 – водопроводный канал (ковш); 2 – водоприемник; 3 – насосная станция первого подъема;

4 – блок первичного озонирования; 5 – смесители; 6 – отстойник; 7 – фильтры; 8 – блоки вторичного озонирования; 9 – резервуар чистой воды; 10 – насосная станция второго подъема

Рисунок 6.11 – Схема Восточной водопроводной станции МП «Мосводоканал» [80]

На блок первичного озонирования поступает вода от водоводов первого подъема после хлорирования в ковше водозабора. После озонирования вода направляется в смеситель, где вторично обрабатывается хлором, смешивается с коагулянтом (сульфатом или окисихлоридом алюминия) и флокулянтом. Затем следует традиционное двухступенчатое осветление в отстойниках и фильтрах, загруженных кварцевым песком. Перед подачей в сеть вода поступает в блоки вторичного озонирования, куда дополнительно вводят аммиак и хлор. Для получения озона используется оборудование фирмы Traeligaz (Франция). Концентрация озона в озоновоздушной смеси составляет 18–20 г/м<sup>3</sup>. После проведенной модернизации – замены преобразователей частоты, стало возможным увеличить (при необходимости) концентрацию озона до 25–30 г/м<sup>3</sup>. Первоначально в контактных камерах для диспергирования озоновоздушной смеси были установлены пористые керамические трубы, которые к настоящему времени заменены на пористые дисковые аэраторы из порошка титана, разработанные и выпускаемые в Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа. Такая замена позволила увеличить эффективность смешения озона с водой с 65 до 90 % [80].

Время контакта воды с озоном составляет 10–12 минут. Пройдя слой воды 4,5 м, озоновоздушная смесь используется повторно.

Многолетний опыт эксплуатации позволил выявить технологические особенности применения озонирования при очистке волжской воды, характеризуемой достаточно стабильным физико-химическим составом благодаря каскаду водохранилищ. Волжская вода отличается повышенным содержанием природных гуминовых и фульвокислот, обуславливающих высокое содержание органического углерода, высокую цветность (до 80 град) и перманганатную окисляемость (до 15 мг/л). Низкое качество в сочетании с низкой мутностью воды (до 2,5 мг/л) наблюдается в холодное время года и вызывает значительные затруднения в очистке воды. Отмечаются сезонные колебания численности фитопланктона (от нескольких десятков до 20–30 тыс. клеток в 1 мл).

Для улучшения органолептических свойств воды в этих условиях оказалась наиболее эффективной доза озона 0,5–1,0 мг/л. При более высоких дозах вода иногда приобретала ароматический запах. Применение озона в зимний период обеспечивало значительный обесцвечивающий эффект. Предварительное хлорирование дозами до 4–5 мг/л снижало цветность на 13–15 град (3 град на 1 мг хлора), последующее озонирование снижало величину этого параметра еще на 8–10 град (4–5 град на 1 мг озона). Обесцвечивающее действие озона увеличивалось при снижении дозы хлора, однако исключить хлорирование полностью не удалось из-за ненадежности в этом случае очистки воды от гидробионитов. Значительная обесцвечивающая способность окислителей позволяет использовать периодический режим коагулирования (перерывы до нескольких часов в подаче коагулянтов), что дает существенный экономический эффект. Однако в этом случае озонирование незначительно снижало образование токсичных летучих хлорорганических соединений.

Озонирование воды имеет и побочный эффект. Так, в волжской воде в результате озонолиза образовывается формальдегид в ощущимых количествах. Его концентрация прямо пропорциональна дозе озона и при ее значении 4 мг/л уже превышала ПДК (0,05 мг/л). В летнее время при одинаковой дозе озона концентрация формальдегида снижалась по сравнению с зимним периодом на 15–20 %.

Подробнее проблемы озонирования питьевой и сточной воды рассмотрены в работе [40].

## 7 СОСТАВ И СВОЙСТВА СТОЧНЫХ ВОД

---

### 7.1 Формирование состава сточных вод

**С**точные воды – это различные по происхождению, составу и физико-химическим свойствам воды, которые использованы человеком для бытовых и технологических нужд, в результате чего вода загрязнилась и изменила физико-химические свойства. Сточные воды разнообразны по составу и, следовательно, по свойствам [81].

Классификация загрязнений сточных вод по природе:

1 *Органические*:

а) разлагаемые:

– растительного происхождения (остатки растений, плодов и овощей, злаков; бумага);

– животного происхождения (остатки тканей животных и др.)

б) небиоразлагаемые или с малой степенью биоразлагаемости:

– бытовые моющие средства и моющие средства для транспорта, отходы химических производств, торговли химическими продуктами;

– природные вещества (воск, хитин и т. д.);

– синтетические органические химические вещества (нейлон, ДДТ и др.).

2 *Минеральные* – кварцевый песок, глина, щелочи, минеральные кислоты и соли, минеральные масла, нефтепродукты и т. д.

3 *Биологические и бактериальные* – различные микроорганизмы: дрожевые и плесневые грибы, мелкие водоросли и бактерии, в том числе болезнестворные – возбудители брюшного тифа, паратифа, дизентерии и др.

Все примеси сточных вод, независимо от их происхождения, разделяют на четыре группы в соответствии с размером частиц:

1 *Нерастворимые в воде грубодисперсные примеси* в виде:

– крупных взвешенных частиц (размер частиц  $>10^{-2}$  см);

– суспензии и эмульсии (размер частиц  $10^{-2}$ – $10^{-6}$  см).

Нерастворимыми могут быть примеси органической или неорганической природы. К этой группе относят микроорганизмы (простейшие, водоросли, грибы), бактерии и яйца гельминтов. Эти примеси образуют с водой неустойчивые системы. При определенных условиях они могут выпадать в осадок или всплывать на поверхность воды. Значительная часть загрязнений этой группы может быть выделена из воды в результате гравитационного осаждения.

## *2 Коллоидные вещества с размером частиц $10^{-6}$ – $10^{-7}$ см.*

Гидрофильные коллоидные примеси этой группы образуют с водой системы с особыми молекулярно-кинетическими свойствами. К этой группе относятся и высокомолекулярные соединения, так как их свойства сходны с коллоидными системами. В зависимости от физических условий примеси этой группы способны изменять свое агрегатное состояние. Малый размер их частиц затрудняет осаждение под действием сил тяжести. При нарушении агрегативной устойчивости примеси выпадают в осадок.

*3 Растворимые примеси молекулярной степени дисперсности с размером частиц  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  см.* При их взаимодействии с водой образуются растворы. Для очистки сточных вод от примесей этой группы применяют биологические и физико-химические методы.

*4 Растворимые примеси ионной степени дисперсности с размером частиц менее  $10^{-8}$  см.* Это растворы кислот, солей и оснований. Некоторые из них, в частности, аммонийные соли и фосфаты частично удаляются из воды в процессе биологической очистки. Однако технология очистки бытовых сточных вод (полная биологическая очистка) не позволяет изменить солесодержание воды. Для снижения концентрации солей используют следующие физико-химические методы очистки: ионный обмен, электродиализ и т. д.

Различают три основные категории сточных вод в зависимости от их происхождения:

- хозяйственно-бытовые;
- производственные;
- атмосферные.

*Хозяйственно-бытовые сточные воды* поступают в водоотводящую сеть от жилых домов, бытовых помещений промышленных предприятий, комбинатов общественного питания и лечебных учреждений. В составе таких вод различают фекальные сточные воды и хозяйственные, загрязненные различными хозяйственными отбросами, моющими средствами. Хозяйственно-бытовые сточные воды всегда содержат большое количество микроорганизмов, которые являются продуктами жизнедеятельности человека. Среди них могут быть и патогенные. Особенностью хозяйственно-бытовых сточных вод является относительное постоянство их состава. Основная часть органических загрязнений таких вод представлена белками, жирами, углеводами и продуктами их разложения. Неорганические примеси составляют частицы песка, глины, соли, образующиеся в процессе жизнедеятельности человека. К последним относят фосфаты, гидрокарбонаты, аммонийные соли (продукт гидролиза мочевины). Доля органических веществ составляет 45–58 % от общей массы загрязнений бытовых сточных вод.

*Производственные сточные воды* образуются в результате технологических процессов. Качество сточных вод и концентрация загрязняющих веществ определяются следующими факторами: видом промышленного про-

изводства и исходного сырья, режимами технологических процессов. На предприятиях, например, металлообрабатывающих, производственные сточные воды загрязнены минеральными веществами. Пищевая промышленность дает загрязнения органическими примесями. Большинство же предприятий загрязняет сточные воды как минеральными, так и органическими веществами. Концентрация загрязнений сточных вод разных предприятий неодинакова. Она колеблется в широких пределах в зависимости от расхода воды на единицу продукции и применяемого оборудования. Концентрация загрязнений в производственных сточных водах может сильно колебаться во времени и зависит от технологического процесса в отдельных цехах или на предприятии в целом. Неравномерность притока сточных вод и их концентрации во всех случаях ухудшает работу очистных сооружений и усложняет эксплуатацию.

*Атмосферные сточные воды* образуются в результате выпадения осадков. К этой категории сточных вод относят талые воды, а также воды от поливки улиц. В атмосферных водах наблюдается высокая концентрация кварцевого песка, глинистых частиц, мусора и нефтепродуктов, смываемых с улиц города. Загрязнение территории промышленных предприятий приводит к появлению в ливневых водах примесей, характерных для данного производства. Отличительной особенностью ливневого стока является его эпизодичность и резко выраженная неравномерность по расходу и концентрациям загрязнений.

Нерастворенные вещества в сточных водах могут быть в грубодисперсном (в виде крупной взвеси) и тонкодисперсном (сuspензии, эмульсии и пена) состоянии.

*Взвешенные вещества* – показатель, характеризующий количество нерастворенных примесей, которое задерживается на бумажном фильтре при фильтровании пробы. Массу их определяют после высушивания при температуре 105 °C (т. е. по сухому веществу).

*Взвешенные вещества* – это один из важнейших технологических показателей качества воды, позволяющий оценить количество осадков, образующихся в процессе очистки сточных вод. Кроме того, этот показатель используется в качестве расчетного параметра при проектировании первичных отстойников. Количество взвешенных веществ – один из основных нормативов при расчете необходимой степени очистки сточных вод.

В зависимости от размеров отдельных частиц (степени дисперсности) и их плотности взвешенные вещества могут выпадать в виде осадка, всплыть на поверхность воды или оставаться во взвешенном состоянии.

*Оседающими* называют нерастворенные вещества, выпадающие на дно сосуда в виде осадка при 2-часовом отстаивании в лабораторных условиях: содержание оседающих веществ выражается по объему в мл/л или по массе

(после сушки выпавшей взвеси при 105 °С и последующего взвешивания) в мг/л.

К *неоседающим* относят вещества, не выпадающие в осадок в этих сосудах за 2 ч отстоя. В городских сточных водах оседающие вещества в среднем составляют 50–75 % общей концентрации взвешенных веществ. Общая масса взвешенных веществ в бытовых сточных водах составляет около 65 г на одного человека в сутки, из них оседающих веществ – от 35 до 50 г (в среднем 40 г на одного человека в сутки по сухому веществу), что составляет 60–75 % общей массы.

Концентрация взвешенных веществ в сточных водах зависит в основном от нормы водоотведения в сутки на 1 человека.

Одной из важных характеристик осадка является его влажность. *Влажность* – отношение массы воды в осадке к общей массе осадка и выражается в процентах. Выпавший осадок бытовых вод при отстаивании в течение 2 ч имеет первоначальную влажность около 97,5 %. В дальнейшем осадок уплотняется, влажность его уменьшается до 93–95 %, а содержание сухого вещества в единице объема повышается с 2,5 до 5–7 %. Объем (а, следовательно, и масса) сырого осадка при уплотнении уменьшается обратно пропорционально проценту содержания в нем сухого вещества. Осадок сточных вод состоит из органических и неорганических компонентов. Для определения их массы осадок высушивают при температуре 105 °С, а затем его прокаливают при температуре 600 °С. При прокаливании органическая часть сгорает, а неорганическая остается в виде золы. Разность весов вещества до и после прокаливания составляет летучую, или органическую, часть, а оставшаяся зола – нелетучую, или минеральную, часть определяемого вещества. Отношение массы оставшейся золы к общей массе абсолютно сухого вещества осадка, выраженное в процентах, определяет *зольность осадка*; потеря при прокаливании (100 % минус зольность) определяет количество *беззольного (органического) вещества*. В осадке бытовых сточных вод масса золы составляет от 20 до 30 %, а масса беззольного вещества – от 70 до 80 %.

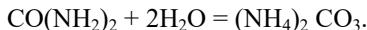
Коллоидную систему сточных вод образуют как гидрофильные, так и гидрофобные коллоиды.

Гидрофильные коллоиды характеризуются способностью дисперсных частиц связывать молекулы воды, служащей дисперсионной средой. Они представлены органическими соединениями, обладающими большим молекулярным весом, – углеводами (клетчатка, целлюлоза, крахмал), белками (альбумин, гемоглобин, казеин молока, животный и рыбий клей), мылами, большинством органических красителей, микроорганизмами и др.

Гидрофобные коллоиды отличаются неспособностью дисперсных частиц связывать молекулы воды дисперсионной среды. К ним относятся глина, гидраты окиси железа и алюминия, силиций, обеззоленный уголь и др.

На химический состав коллоидных и растворенных веществ бытовых сточных вод большое влияние оказывают белки, жиры, углеводы пищевых продуктов, а также состав водопроводной воды, содержащей обычно гидрокарбонаты, сульфаты, хлориды и иногда железо. Содержание коллоидных частиц в бытовых сточных водах составляет 30–40 % от содержания взвешенных веществ.

Белковые вещества в живом организме в процессе обмена веществ образуют мочевину  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , которая под влиянием гнилостных бактерий в сточной воде подвергается гидролизу с образованием аммонийных солей:



В этом виде, т. е. в виде карбоната аммония, азот находится в сточных водах. В дальнейшем карбонат аммония, разлагаясь, может образовывать аммиак по уравнению

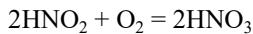
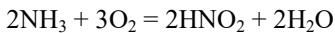


Необходимо различать азот, который присутствует в виде растворенного аммиачного газа, и азот, который присутствует в ионе аммония в растворе. При  $\text{pH} = 7$  присутствуют только ионы аммония в растворе; при  $\text{pH} = 12$  присутствует только растворенный газ – аммиак; при  $7 < \text{pH} < 12$  могут присутствовать обе формы. Масса азота аммонийных солей на одного человека в сутки изменяется в небольших пределах – 7–8 г.

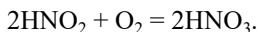
Кроме азота, органические вещества, входящие в состав сточных вод, содержат углерод, серу, фосфор, калий, натрий и хлор в виде солей, а также железо. Масса этих веществ в бытовых водах в расчете на одного человека в сутки более или менее одинакова.

## 7.2 Процессы нитрификации и денитрификации, их значение при очистке сточных вод

При соответствующих условиях (наличие кислорода, температура выше 4 °С и др.) под действием аэробных микроорганизмов (нитрифицирующих бактерий) происходит окисление азота аммонийных солей, в результате чего образуются сначала соли азотистой кислоты, а при дальнейшем окислении – соли азотной кислоты, т. е. происходит процесс *нитрификации* [81]



или



Первая фаза нитрификации происходит в три раза быстрее второй.

На окисление 1 мг аммонийного азота расходуется: в нитриты – 3,43 мг О<sub>2</sub>, в нитраты – 4,57 мг О<sub>2</sub>.

Процесс нитрификации является конечной стадией минерализации азотсодержащих органических загрязнений. Наличие нитратов в очищенных сточных водах служит одним из показателей степени их полной очистки, такой показатель характеризует совершенную работу сооружений для биологической очистки сточных вод. Нитрификация имеет большое значение в очистке сточных вод, так как этим путем накапливается запас кислорода, который может быть использован для окисления органических безазотистых веществ, когда уже полностью израсходован для этого процесса весь свободный (растворенный) кислород.

Под действием денитрифицирующих бактерий связанный кислород отщепляется от нитритов и нитратов и вторично расходуется для окисления органического вещества. Процесс этот называется *денитрификацией*. Он сопровождается выделением в атмосферу свободного азота в форме газа.

Денитрифицирующие бактерии относятся к факультативным анаэробным бактериям. При денитрификации нитритов в расчете на 1 мг азота освобождается 1,71 мг кислорода, а при денитрификации нитратов на 1 мг азота освобождается 2,85 мг кислорода. Освобожденный кислород вторично используется для окисления органических веществ.

### **Растворение и потребление кислорода.**

В канализационных очистных сооружениях, которые служат для минерализации органических загрязнений, входящих в состав сточных вод, одновременно протекают два процесса: потребление кислорода и его растворение [81]. Установлено, что минерализация органического вещества, происходящая в результате окисления при воздействии микроорганизмов-минерализаторов или так называемого биохимического окисления, совершается в две стадии: на первой стадии окисляются углеродсодержащие вещества, образующие в результате углекислоту и воду, на второй – азотсодержащие вещества – сначала до нитритов, а затем до нитратов.

При достаточном содержании кислорода скорость окисления на первой (углеродистой) стадии подчиняется, как это установлено, закону [81]: *скорость окисления, или скорость потребления, кислорода* при неизменной температуре пропорциональна массе органического вещества, находящегося в воде. Следовательно, по мере окисления органического вещества, если нет поступления новых загрязнений, скорость окисления уменьшается. Этот закон дает возможность вывести уравнение потребления кислорода:

$$L_t = L_a - x_t, \quad (7.1)$$

где L<sub>t</sub> – содержание кислорода, требуемое для окисления оставшихся по истечении времени t органических загрязнений (БПК<sub>t</sub>); L<sub>a</sub> – содержание

кислорода, необходимого для окисления всего органического вещества, имеющегося в начале процесса, ( $\text{БПК}_{\text{полн}}$ );  $x_t$  – содержание кислорода, потребленного за время  $t$ , мг/л.

В результате математических преобразований (дифференцирования, интегрирования) получаем уравнения процесса потребления кислорода при биохимическом окислении органического вещества:

$$L_t = L_a \cdot 10^{-K_1 t}, \quad (7.2)$$

где  $K_1$  – константа скорости потребления кислорода.

Время, требуемое для снижения потребления кислорода от  $L_a$  до  $L_t$ , можно выразить следующим уравнением:

$$t = \frac{1}{k_1} \lg \frac{L_a}{L_t}. \quad (7.3)$$

Из этой формулы видно, что достигнуть полного окисления всего органического вещества, при котором  $L_t$  было бы равным нулю, теоретически невозможно, так как требуемое для этого время должно быть равно бесконечности.

*Скорость растворения кислорода*, согласно указанному выше закону, обратно пропорциональна степени насыщенности воды кислородом или прямо пропорциональна его недонасыщенности (дефициту). Это относится, конечно, лишь к поверхности соприкосновения воды с кислородом (диффузионному слою). Для того чтобы эта скорость растворения относилась ко всей массе воды, необходимо интенсивное ее перемешивание.

Если обозначить через  $D_a$  начальный дефицит кислорода, выраженный волях от полного дефицита, а через  $D_t$  – дефицит кислорода в воде по прошествии времени  $t$ , то процесс растворения можно выразить уравнением

$$D_t = D_a \cdot 10^{-K_2 t}, \quad (7.4)$$

где  $K_2$  – константа скорости растворения кислорода, зависящая от природы газа, температуры, состояния поверхности и условий перемешивания воздуха с водой.

### 7.3 Биохимическая потребность в кислороде (БПК), химическая потребность в кислороде (ХПК) и окисляемость сточных вод

Под *окисляемостью* понимают общее содержание в воде восстановителей органической и неорганической природы. В городских сточных водах

подавляющую часть восстановителей составляют органические вещества, поэтому считается, что величина окисляемости полностью относится к органическим примесям.

В зависимости от природы используемого окислителя различают:

- химическую окисляемость, если при определении используют химический окислитель;
- биохимическую, окислительный агент – аэробные бактерии, показатель – биохимическая потребность в кислороде – БПК.

Химическая окисляемость может быть:

- перманганатной (окислитель  $\text{KMnO}_4$  – кислородный эквивалент легкоокисляемых примесей);
- бихроматной (окислитель  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ );
- иодатной (окислитель  $\text{KJ O}_3$ ).

Бихроматную и иодатную окисляемость называют химической потребностью в кислороде, или ХПК.

*Биохимической потребностью в кислороде (БПК, мг/л)* называется количество кислорода, которое расходуется для биохимического окисления органических веществ в определенный интервал времени. По величине БПК можно установить степень загрязненности воды органическими веществами. Чем больше БПК, тем более загрязнены сточные воды, и наоборот.

БПК – метод определения количества израсходованного кислорода на дыхательную деятельность микроорганизмов, использующих органическое вещество для роста и метаболизма. БПК является мерой содержания только тех органических веществ, которые могут служить потребляемым субстратом для микроорганизмов.

За полное БПК условно принимают биохимическую потребность в кислороде воды, доведенную до начала нитрификации, т. е. до появления в воде небольших количеств ( $0,1 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ) нитритов. Для бытовых сточных вод к 20-му дню инкубации окисление углеродсодержащей органики завершается полностью. То есть практически  $\text{БПК}_{\text{полн}} = \text{БПК}_{20}$ . Значение  $\text{БПК}_{20}$  принимается для расчета очистных сооружений.

Из-за длительности определения  $\text{БПК}_{20}$  наибольшее распространение получило определение БПК за 5 суток (пятисуточная проба БПК<sub>5</sub>), что указывается в анализах. Определение БПК<sub>5</sub> рекомендуется как стандартное при эксплуатации очистных сооружений.

В бытовой воде БПК<sub>5</sub> составляет 60–70 % от  $\text{БПК}_{\text{полн}}$ , т. е. соотношение  $\text{БПК}_5/\text{БПК}_{\text{полн}} = 0,6...0,7$ . Для промышленных сточных вод БПК<sub>5</sub> может составлять 15–50 % от  $\text{БПК}_{\text{полн}}$ . Для отстоянных сточных вод при отсутствии экспериментальных данных с достаточной точностью можно принимать коэффициент пересчета с БПК<sub>5</sub> на  $\text{БПК}_{\text{полн}}$  равным 1,5. Величина БПК<sub>5</sub> для неочищенных городских сточных вод колеблется в диапазоне

100–500 мг/дм<sup>3</sup>. После вторичных отстойников в зависимости от качества очистки БПК<sub>5</sub> составляет 10–40 мг/дм<sup>3</sup>.

Для более полной оценки содержания органических веществ в сточной воде, особенно если она представляет смесь бытовых и производственных вод, в последнее время определяют (кроме БПК) химическое потребление кислорода (ХПК).

*Химическое потребление кислорода* – количество кислорода, необходимое для окисления органических веществ химическими методами (бихроматом и иодатом). Характеризует общее содержание в воде восстановителей (органических и неорганических), реагирующих с сильными окислителями. Бихроматом окисляются почти все органические вещества на 95–98 %, а также некоторые неорганические вещества ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{S}_2^-$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ).

Величина ХПК для неочищенных городских сточных вод колеблется от 200–900 мг/дм<sup>3</sup>, после биологической очистки – 50–300 мг/дм<sup>3</sup>, а после доочистки на фильтрах 20–40 мг/дм<sup>3</sup>. Для бытовых сточных вод БПК<sub>20</sub> составляет 86 % ХПК; однако многие производственные воды имеют ХПК, превышающую БПК<sub>20</sub> на 50 % и более. Условно БПК<sub>20</sub>, принимаемая в городских сточных водах, составляет 50 % от ХПК. При соотношении БПК/ХПК в поступающих на очистку водах более 0,5–0,7 сточные воды целесообразно очищать биологическим способом. При снижении этого коэффициента наиболее эффективно применение физико-химической очистки.

### **Аэробные и анаэробные процессы.**

Сложные органические соединения сточных вод благодаря биохимическим процессам *минерализации (стабилизации)* органических соединений подвергаются распаду до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

Минерализация органических веществ происходит под воздействием микроорганизмов, которые их используют в процессе питания как пластический материал – для построения тела микроорганизмов (плазмы, оболочки) и энергетический – для жизненных функций. Аэробные микроорганизмы нуждаются в кислороде воздуха, анаэробные, наоборот, не выносят его присутствия. При аэробных биохимических процессах происходит окисление органических веществ, содержащих углерод, азот, серу, фосфор, до минеральных солей (углекислых, азотнокислых, сернокислых и фосфорнокислых) и углекислоты. В результате анаэробных (восстановительных) процессов образуются метан ( $\text{CH}_4$ ), углекислота ( $\text{CO}_2$ ), сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ), аммиак ( $\text{NH}_3$ ) и водород ( $\text{H}_2$ ), а также промежуточные продукты распада органических веществ.

Аэробные процессы используются главным образом для очистки сточных вод, содержащих органические загрязнения преимущественно в коллоидном и растворенном состоянии (биохимическая очистка сточных вод). Анаэробные процессы применяют для обработки и обезвреживания осад-

ков, выделяемых из сточных вод, а также для очистки концентрированных по органическим загрязнениям промышленных сточных вод.

## **7.4 Бактериальное и биологическое загрязнение сточных вод**

*Микробное число* оценивает общую обсемененность сточных вод микроорганизмами и косвенно характеризует степень загрязненности воды органическими веществами – источниками питания аэробных сапрофитов. Этот показатель для городских сточных вод изменяется в пределах  $10^6$ – $10^8$ .

Сточные воды содержат большое число микроорганизмов, в том числе болезнетворных (патогенных) бактерий, что делает эту воду опасной в санитарном отношении. В бытовых сточных водах встречаются бактерии брюшного тифа, дизентерии и другие возбудители желудочно-кишечных заболеваний, а также яйца гельминтов (глистов), поступающие в сточные воды с выделениями людей и животных.

Для определения зараженности воды болезнетворными бактериями проводят анализ на наличие бактерий группы кишечной палочки (бактерии *Coli*), являющейся типичным представителем кишечной микрофлоры. Кишечная палочка, не являясь болезнетворной бактерией, служит показателем загрязнения воды болезнетворными бактериями.

Чтобы оценить степень бактериального загрязнения воды, определяют коли-титр (титр кишечной палочки) или тот наименьший объем воды в миллилитрах, в котором содержится одна кишечная палочка [81]. Для бытовых сточных вод коли-титр обычно составляет 0,000001 и ниже, т. е. одна бактерия *Coli* содержится в объеме сточной воды 0,000001 мл и меньше. Иногда определяют коли-индекс, т. е. число кишечных палочек в 1 л воды.

В сточных водах могут развиваться плесневые и дрожжевые грибы, водоросли, составляющие биологическое их загрязнение.

### **Активная реакция, относительная стабильность сточных вод.**

*Активная реакция.* Реакция сточных вод имеет большое значение для процесса очистки сточных вод. Обычно активную реакцию сточных вод выражают через pH, т. е. концентрацию водородных ионов, которая выражается величиной отрицательного логарифма этой концентрации.

Бытовые сточные воды имеют слабощелочную реакцию ( $\text{pH} = 7,2\ldots7,6$ ). Производственные сточные воды в зависимости от типа производства и характера технологического процесса могут иметь разную реакцию – от сильноокислой до сильнощелочной.

Оптимальной средой для развития бактерий является pH от 7 до 8. Но возможны колебания. Так, например, нитритные бактерии развиваются при  $\text{pH} = 6\ldots9$ , а нитратные –  $6,5\ldots8,6$ . Некоторые серные бактерии могут существовать в среде с  $\text{pH} = 1\ldots4$ , т. е. сильно кислой среде.

Оптимальные условия для работы очистных сооружений создаются при pH сточной жидкости в пределах 7–7,6.

Способность сточных вод загнивать через определенный промежуток времени характеризует степень очистки этих вод и их относительную стабильность, или стойкость. Относительную стабильность (стойкость) сточных вод определяют как отношение запаса в воде кислорода в форме растворенного, нитритного и нитратного, к полной биохимической потребности в кислороде этих сточных вод при температуре 20 °C по следующей формуле:

$$S = 100 \left( 1 - 0,794^t \right), \quad (7.5)$$

где S – относительная стабильность, %; t – количество суток, в течение которых потреблен весь растворенный в воде кислород, и срок начала ее загнивания.

Очевидно, что чем больше кислорода находится в жидкости, тем больше суток потребуется для начала ее загнивания. При  $t = 0,5$  сут  $S = 11\%$  – для сточной воды, поступающей на очистные сооружения. При  $t = 20$  сут  $S = 99\%$  – для биологически очищенных сточных вод.

## **8 МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

---

### **8.1 Методы предварительной очистки сточных вод**

**М**етоды, применяемые для очистки сточных вод, можно разделить на три группы: механические; физико-химические и биологические.

Для ликвидации бактериального загрязнения сточных вод применяют обеззараживание (дезинфекцию).

Механическая очистка производится для выделения из сточной воды находящихся в ней нерастворенных грубодисперсных примесей путем процеxивания, отстаивания и фильтрования. Для задержания крупных загрязнений и частично взвешенных веществ применяют процеxивание воды через различного рода решетки и сита.

Взвешенные частицы минерального происхождения, главным образом песка, выделяют из сточных вод осаждением в песколовках. Для выделения взвешенных веществ применяют отстойники, где тяжелые частицы осаждаются на дно под действием силы тяжести, а легкие всплывают на поверхность. Вещества, более легкие, чем вода, – жиры, масла, нефть, смолы и другие всплывающие на поверхность вещества – выделяются в жироловушках, маслоуловителях, нефтоловушках и смелоуловителях; применяемых для очистки производственных сточных вод. Для освобождения сточных вод от частиц очень мелкой суспензии, находящейся во взвешенном состоянии, применяют фильтрование сточных вод через ткань (сетку) или слой зернистого материала. Механическая очистка может применяться как самостоятельный метод или как предварительная стадия перед биологической и физико-химической очисткой. При механической очистке городских сточных вод задерживается до 60 % нерастворенных загрязнений. На сооружениях механической очистки эффект снижения взвешенных веществ составляет 45–64 %, что приводит также к снижению величины БПК<sub>5</sub> на 20–33 %.

Химические методы заключаются в введении в очищаемую воду реагентов (коагулянт и флокулянт). В результате химической реакции: 1) происходит более полное выделение нерастворенных примесей; 2) растворимые соединения переходят в нерастворимые или в безвредные растворимые; 3) изменяется реакция сточных вод pH; 4) происходит обесцвечивание окрашенной воды.

К методам физико-химической очистки производственных сточных вод относятся: реагентная очистка, сорбция, экстракция, эвапорация, дегазация,

ионный обмен, озонирование, электрофлотация, хлорирование, электродиализ, ультразвуковая и магнитная обработка и др. Данными методами можно обеспечить глубокую очистку сточных вод, интенсифицировать механическую очистку или заменить биологическую очистку. Физико-химические методы очистки городских сточных вод с учетом технико-экономических показателей используют редко, чаще используют при очистке производственных сточных вод. При этом в зависимости от местных условий тот или иной метод может явиться окончательной либо предварительной стадией.

Химический метод очистки позволяет уменьшить количество загрязнений сточных вод: нерастворенных – до 95 % и растворенных – до 25 %, при этом БПК сточных вод можно снизить до 80 %. В некоторых случаях химический метод позволяет удалить до 100 % растворенных веществ, например, соли тяжелых металлов.

Метод биологической очистки основан на жизнедеятельности микроорганизмов, которые минерализуют растворенные органические соединения, являющиеся для микроорганизмов источниками питания [81]. Сооружения биологической очистки условно делят на два вида. К первому виду относятся сооружения, в которых процесс биологической очистки протекает в условиях, близких к естественным (поля фильтрации, поля орошения и биологические пруды). В сооружениях второго вида аналогичная очистка осуществляется в искусственно созданных условиях (аэротенки, биофильтры).

Биологическая очистка может быть неполной – при БПК очищенной воды более 20 мг/л и полной – при БПК 15–20 мг/л. Глубокая очистка сточных вод может потребоваться, если в сточной воде после полной биологической очистки перед сбросом в водный объект необходимо снизить концентрацию взвешенных веществ, БПК, ХПК и др. [81]. При глубокой очистке сточных вод, главным образом от взвешенных веществ, используются фильтры различных конструкций. Для глубокой очистки от растворенных органических веществ применяют сорбционные, биосорбционные, озонаторные и другие установки. Также в качестве сооружений доочистки могут использоваться биологические пруды. Глубокая очистка сточных вод от биогенных элементов (азота аммонийного и фосфора) может проводиться физико-химическими и биологическими методами. Дезинфекция сточных вод является заключительным этапом их обработки перед сбросом в водоем. Цель дезинфекции – уничтожение патогенных микроорганизмов в сточной воде. Наибольшее распространение получил способ дезинфекции путем введения газообразного хлора. Допускается обеззараживание биологически очищенных вод гипохлоритом натрия, а также озоном, УФО.

## **8.2 Методы обработки осадков**

Обработка осадков сточных вод, образующихся в процессах очистки, заключается в снижении их влажности и уменьшении объема, в процессе обработки осадки стабилизируются и обеззараживаются.

Загрязнения, задерживаемые решетками, отмываются от органических загрязнений, уплотняют и вывозят, либо сразу вывозят с территорий станций очистки.

Песок из песколовок обезвоживается на песковых площадках и также вывозится или отмывается от органических загрязнений, подсушивается и используется в планировочных работах.

Осадок из первичных отстойников и уплотненный осадок из вторичных отстойников (активный ил) направляются в метантенки – герметичные резервуары, в которых под действием анаэробных микроорганизмов минерализуются органические вещества. Вместо метантенков применяется метод анаэробной стабилизации. Также для сбраживания осадка могут применяться септики и двухъярусные отстойники.

Дальнейшее снижение влажности осадков может достигаться в аппаратах механического действия – на вакуум-фильтрах, фильтр-прессах, центрифугах, а также термической сушкой осадков. Иловые площадки устраиваются для обезвоживания в естественных условиях сброшенного в метантенках осадка. Важное значение приобретает утилизация осадков в качестве органоминерального удобрения и белково-витаминных добавок к рационам питания сельскохозяйственных животных

## **8.3 Типовые схемы очистных сооружений**

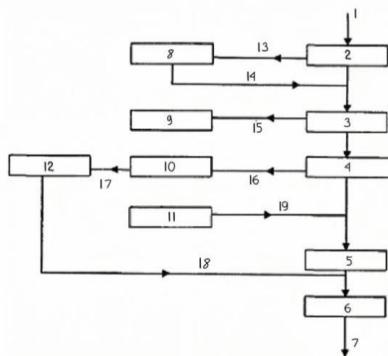
Выбор методов очистки сточных вод и определение состава сооружений представляет сложную технико-экономическую задачу и зависит от многих факторов: расхода сточных вод и мощности водного объекта, расчета необходимой степени очистки, с учётом состава поступающей на очистную станцию сточной воды, рельефа местности, характера грунтов, энергетических затрат и др. [81]. Расчет необходимой степени очистки показывает, какой эффект задержания загрязняющих веществ необходимо достичь на очистных сооружениях.

Возможен вариант, что необходимый эффект очистки обеспечивается только сооружениями механической очистки (концентрация взвешенных веществ должна быть снижена на 45–64 %, а величина БПК<sub>5</sub> – на 20–33 %). Такие сооружения могут разрабатываться для поселков городского типа, имеющих водоотводящую систему и расположенных на многоводных реках, при расходе сточных вод не более 10 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

В технологических схемах биологической очистки применяются [81]:

- биофильтры при расходах сточных вод до 50 тыс. м<sup>3</sup>/сут, при остаточной концентрации по взвешенным веществам 15–25 мг/л, по БПК<sub>5</sub> – 15–25 мг/л;
- аэротенки – при расходах до 2–3 млн м<sup>3</sup>/сут, при остаточной концентрации по взвешенным веществам 15–25 мг/л, по БПК<sub>5</sub> – 15 мг/л;
- доочистка применяется при требуемом эффекте очистки по взвешенным веществам и по БПК<sub>полн</sub> до 99,9 %, при остаточной концентрации по взвешенным веществам 1,5–2 мг/л, по БПК<sub>5</sub> – до 4,5 мг/л.

Технология обработки осадков, образующихся в процессах очистки, определяется в зависимости от их свойств, объемов, наличия площадей. Состав сооружений выбирают с учетом производительности станции, характера грунтов, положения уровня грунтовых вод, климатических условий района, рельефа территории площадки, наличия земельных площадей, метода использования осадка и других местных условий (рисунки 8.1–8.3) [81].

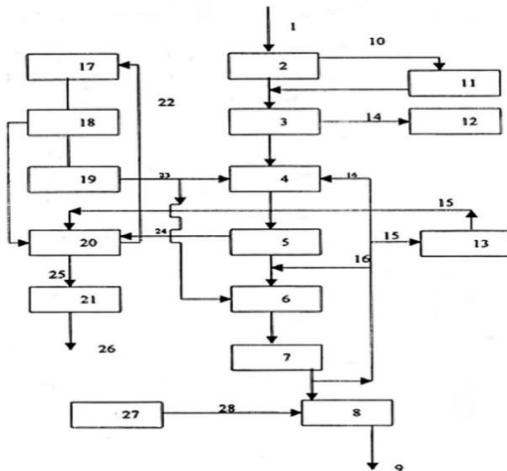


1 – сточная вода; 2 – решетки; 3 – песколовки; 4 – отстойники; 5 – смесители; 6 – контактный резервуар; 7 – выпуск; 8 – дробилки; 9 – песковые площадки; 10 – метантенки; 11 – хлораторная; 12 – иловые площадки; 13 – отбросы; 14 – пульпа; 15 – песчаная пульпа; 16 – сырой осадок; 17 – сброшенный осадок;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

Рисунок 8.1 – Технологическая схема очистной станции с механической очисткой сточных вод [81]

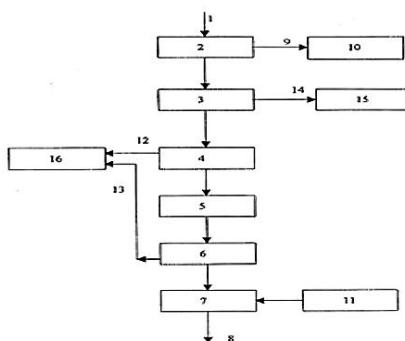
### *Стержневые решетки, их конструкции и расчет*

Крупные плавающие отбросы (бумага, пластик, стекло, остатки пищи, полиэтилен, перо, резина и др.) необходимо извлекать из сточных вод на начальной стадии очистки, так как они засоряют трубы, каналы, насосы, затрудняют обработку осадка и замусоривают природные водоемы, принимающие сточные воды. Для освобождения сточных вод от крупных плавающих отбросов применяются разнообразные типы механизмов, основными из которых являются стержневые решетки с ручной и механизированной очисткой прутьев, ступенчатые решетки, ротационные диски, ротационные барабаны, центрифуги [81].



1 – сточная вода; 2 – решетки; 3 – песколовки; 4 – преаэраторы; 5 – первичные отстойники; 6 – аэротенки; 7 – вторичные отстойники; 8 – контактный резервуар; 9 – выпуск; 10 – отбросы; 11 – дробилки; 12 – песковые площадки; 13 – илоуплотнители; 14 – пескопульпы; 15 – избыточный активный ил; 16 – циркуляционный активный ил; 17 – газгольдеры; 18 – котельная; 19 – машинное здание; 20 – метантенк; 21 – цех механического обезвоживания сброшенного осадка; 22 – газ; 23 – сжатый воздух; 24 – сырой осадок; 25 – сброшенный осадок; 26 – осадок на удобрение; 27 – хлораторная установка; 28 – хлорная вода

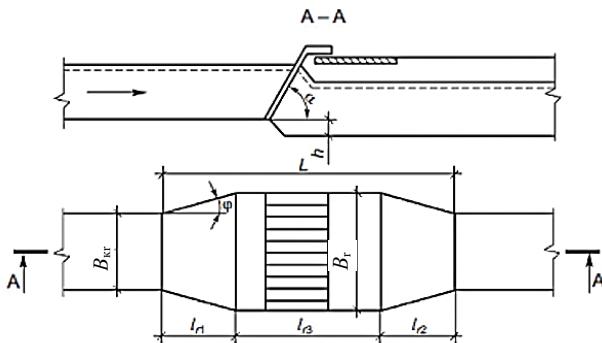
Рисунок 8.2 – Технологическая схема очистной станции с биологической очисткой сточных вод в аэротенках [81]



1 – сточная вода; 2 – решетки; 3 – песколовки; 4 – первичные отстойники; 5 – биофильтры; 6 – вторичные отстойники; 7 – контактный резервуар; 8 – выпуск; 9 – отбросы; 10 – дробилки; 11 – хлораторная установка; 12 – осадок из первичных отстойников; 13 – биопленка из вторичных отстойников; 14 – песок; 15 – бункер песка; 16 – иловые площадки

Рисунок 8.3 – Технологическая схема очистной станции с биологической очисткой сточных вод на биофильтрах [81]

Стержневые решетки выполняются из ряда металлических пластин, расположенных параллельно друг другу и создающих плоскость с прозорами, через которую прощеживается сточная жидкость. Стержни закрепляются в специальных рамках, обеспечивающих жесткость всей решетки и фиксацию расстояния между стержнями. Устанавливаются решетки в уширенных каналах – камерах, по которым вода движется самотеком (рисунок 8.4).



$\alpha$  – угол наклона решетки ( $60^\circ$ );  $\varphi = 20^\circ$ ;  $h$  – потери напора в решетке;  $L$  – общая длина лотков и камеры;  $B_{kr}$  – ширина подводящего канала;  $B_r$  – ширина лотка в месте установки решетки;  $l_{r1}$  – длина лотка, сопрягающего подводящий канал и камеру;  $l_{r2}$  – длина лотка, сопрягающего камеру и отводящий лоток;  $l_{r3}$  – длина камеры

Рисунок 8.4 – Схема установки решетки [81]

Классификация решеток приведена далее.

По способу очистки от отбросов решетки могут быть [81]:

– с ручной очисткой – применяются при количестве отбросов менее  $0,1 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;

– с механизированной очисткой.

По конструктивным особенностям решетки делятся на подвижные и неподвижные, вертикальные и наклонные (упрощается очистка). Серийно выпускаются вертикальные – типа РММВ и наклонные решетки типа МГ.

Стержни решеток бывают:

- прямоугольной формы;
- прямоугольной формы с закругленной лобовой частью;
- круглой формы.

Ширина ( $S_s$ ) стержней решетки принимается 6–10 мм.

Ширина прозоров между стержнями ( $b_r$ ) – не более 16 мм (1, 2, 3, 6, 15 мм).

Эффективность снятия загрязнений по взвешенным веществам и БПК<sub>5</sub> на решетках с прозорами не более 6 мм следует принимать от 10 до 15 % от

исходных загрязнений сточных вод перед решетками или по паспортным данным на оборудование.

Минимальная скорость движения сточных вод в канале перед решетками должна быть не менее 0,4 м/с и после решеток – не менее 0,7 м/с.

Скорость движения сточных вод в прозорах решетки рекомендуется 0,8–1,0 м/с. Для ступенчатых решеток эскалаторного типа скорость движения воды в прозорах в пределах 1,0–1,4 м/с.

В настоящее время наиболее экономичными и эффективными являются ступенчатые решетки тонкой очистки с шириной прозоров 3–6 мм.

Принцип работы ступенчатых решеток состоит в процеживании сточных вод через пакеты ступенчатых пластин: неподвижных, закрепленных на раме решетки, и подвижных, совершающих плоскопараллельное вращение относительно неподвижных пластин. Прозоры между пакетами неподвижных и подвижных пластин фиксируются при помощи специальных накладок. Движение, совершаемое подвижными пластинами, приводит к тому, что задержанные отбросы поднимаются вверх с одной ступени на другую. В результате последовательных действий уловленные отбросы поднимаются до точки выгрузки и попадают на транспортер. Производительность такой решетки от 650 до 5000 м<sup>3</sup>/ч.

Работа многоступенчатой решетки осуществляется, как правило, в циклическом режиме, но она может работать и непрерывно. На рисунке 8.5 показаны последовательные стадии движения решетки и вращения подвижных пластин [81].

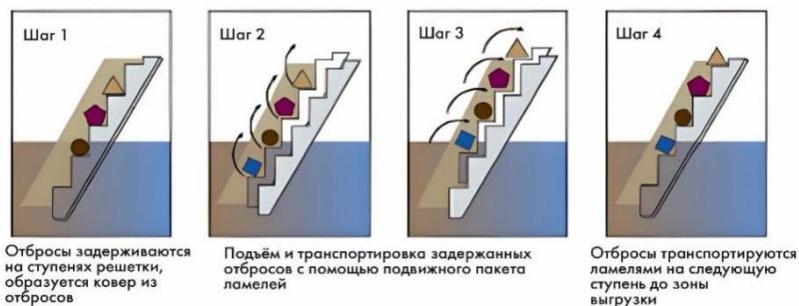


Рисунок 8.5 – Принцип действия ступенчатых решеток [81]

Начало цикла очистки совпадает с достижением в канале перед решеткой верхнего рабочего уровня воды, при котором происходит срабатывание датчика уровня, подающего сигнал на включение привода решетки. Круговыми движениями подвижных пластин производится перемещение вверх задержанных отбросов (см. рисунок 8.5) и очищение фильтрующей поверхности.

ности решетки, в результате чего уровень воды в канале перед решеткой снижается и по сигналу датчика уровня происходит отключение привода.

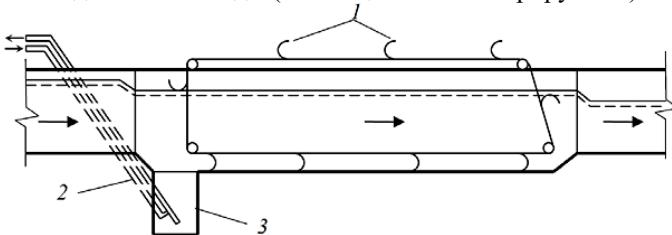
Частота и продолжительность циклов очистки существенно зависят от расхода сточных вод и состава содержащихся в них отбросов.

Применение решеток с прозором менее 10 мм предпочтительно не только из-за более эффективного изъятия крупных плавающих отбросов, но также потому, что мелкие прозоры способствуют образованию на решетке дополнительного фильтрующего слоя из самих отбросов, что с одной стороны, повышает эффект их задержания, а с другой – позволяет плавающим жирам и нефтепродуктам осесть на эту подстилку, тем самым механически изъять их из сточных вод.

Сточные воды, освобожденные от крупных плавающих отбросов на решетках, поступают в песколовки, на которых происходит удаление из сточной воды тяжелых примесей минерального происхождения с размером частиц 0,09–0,5 мм и более. Песколовки удаляют частицы гравия, песка, костей, угля, шлака, бетона и т. п. Задача песколовок состоит не только в удалении минеральных примесей, включая мелкие фракции (0,15 мм и менее), но также в том, чтобы удалить практически чистый песок без органических примесей, накапливающихся на нем.

По требованию СН 4.01.02-2019 песколовки устанавливаются обязательно, если объем очищаемых сточных вод более  $100 \text{ м}^3/\text{сут.}$

По направлению движения воды песколовки подразделяются на горизонтальные (с горизонтальным прямоточным и круговым движением воды) (рисунок 8.6), вертикальные (вода подается снизу и направляется вверх) и с водоворотным движением воды (тангенциальные и аэрируемые).



1 – цепной скребковый механизм; 2 – гидроэлеватор; 3 – бункер

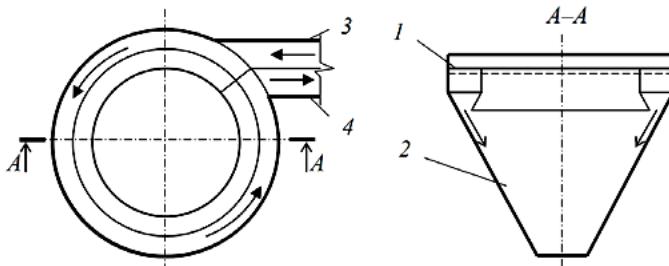
Рисунок 8.6 – Горизонтальная песколовка [81]

Принцип действия песколовки гравитационный, т. е. минеральные частицы, удельная масса которых больше удельной массы воды ( $1,6 \text{ г}/\text{cm}^3$ ), главным образом песок, выпадают на дно.

В песколовках скорость движения воды должна находиться в пределах от 0,15 до 0,3 м/с для горизонтальных и от 0,08 до 0,12 м/с для аэрируемых песколовок. Для обеспечения указанных скоростей движения сточных вод

при минимальном и максимальном притоке необходимо устанавливать не менее двух песковок или одна песковка должна быть разделена на несколько отделений, но не менее двух. Для поддержания постоянства необходимой скорости потока сточных вод в песковке в условиях резко меняющегося объема поступающих в течение суток сточных вод предусматривается на выпуске водоослив с широким порогом, благодаря которому сохраняется постоянная скорость потока.

Горизонтальные песковки с круговым движением воды (рисунок 8.7) применяются на станциях с расходом сточных вод до  $70\ 000\ м^3/сут$ , представляют собой круглые резервуары.



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

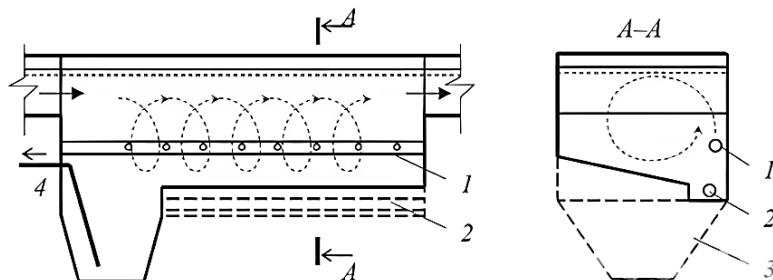
Рисунок 8.7 – Горизонтальная песковка с круговым движением воды [81]

Проточная часть песковки в поперечном сечении имеет в верхней части прямоугольную форму, а в основании – треугольную со щелью внизу. Их особенностью является создание кругового движения потока воды для поддержания органических примесей в потоке без осаждения. Песок «сползает» через отверстия желоба в центрально расположенный бункер, имеющий коническую форму. Для выгрузки осадка достаточно установки гидроэлеватора или погружного насоса. Расчет ведется так же как и для песковки с прямолинейным движением воды, но длина принимается по средней линии кругового лотка.

В песковках с циркулирующими потоками воды (тангенциальные, аэрируемые и т. п.) более эффективно отделяются от воды и осаждаются мелкие фракции песка (а также освобождаются от связанных с ними органических частиц). Органические примеси поддерживаются во взвешенном состоянии и в осадок не выпадают. Благодаря создаваемым эффектам водооворотов выделяется практически чистый песок мелких фракций (до 0,15 мм) с влажностью осадка из песковок не более 20 % и высокой зольностью (не менее 95 %). Содержание песка в осадке из таких песковок – до 92 %.

Аэрируемые песковки (рисунок 8.8) применяются на станциях с расходом сточных вод более  $20\ 000\ м^3/сут$ , представляют горизонтальные пес-

ковки с установленными у одной из продольных стен аэраторами обычно на глубине 0,4–0,6 м от дна песколовки [81].



1 – пористый аэратор; 2 – трубопровод гидросмыва осадка; 3 – осадочная часть; 4 – гидроэлеватор

Рисунок 8.8 – Схема аэрируемой песколовки [81]

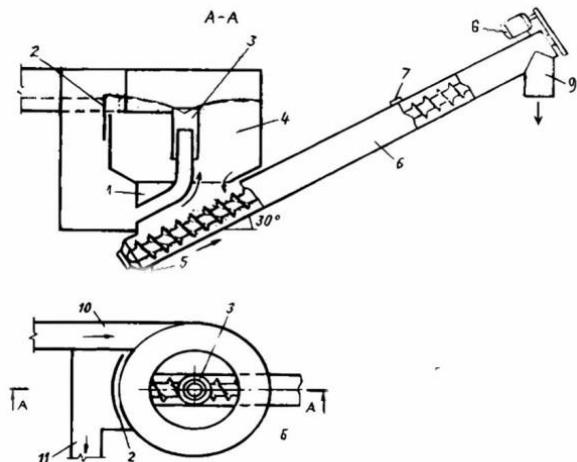
Оптимальная высота расположения аэраторов от дна должна составлять примерно 1/3 от рабочей глубины песколовки, так как при этом создаются максимальные скорости вращения песчинок, способствующие эффективной отмывке песка от органических частиц. В то же время осевший на дно песок не взмучивается.

Оптимальное отношение ширины к глубине аэрируемой песколовки должно составлять 1:1. Аэрационные элементы – трубы диаметром 50 мм с отверстиями диаметром от 3 до 6 мм – расположены на верхней поверхности трубы так, чтобы обеспечить направление движения поступающего воздуха вертикально вверх. Расстояние между отверстиями 100–200 мм, но не более 250 мм. Интенсивность аэрации должна находиться в диапазоне от 3 до 5  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

#### *Тангенциальные песколовки*

Имеют круглую форму в плане, рекомендуется применять при производительностях до 50 000  $\text{м}^3/\text{сут}$  [81]. В тангенциальных песколовках (рисунок 8.9) вода подается по касательной, что обеспечивает вращательное движение. Оно способствует поддержанию в потоке органических примесей, при этом скорость вращательного движения невелика и не препятствует выпадению песка в осадок. Особенностью является малая глубина их проточной части – 0,5 м. Диаметр песколовки принимается не более 6 м. При скорости течения в тангенциальной песколовке 0,6–0,8 м/с задерживается около 90 % песка. Время нахождения в ней сточных вод 30–50 с. При удовлетворительной работе песколовок удаляется песок разных фракций: 0,4–0,3 мм – на 95 %, 0,24 мм – на 85 % и 0,15 мм – на 65 %.

Основной недостаток тангенциальных песколовок заключается в том, что они очень чувствительны к неравномерности притока сточных вод.



1 – осадочная часть; 2 – подвижный боковой водослив; 3 – телескопическая труба;  
 4 – рабочая часть; 5 – заглушка; 6 – шнек; 7 – отверстие для сброса отмытых органических  
 веществ; 8 – электродвигатель с редуктором; 9 – штуцер для отвода песка;  
 10 – подающий лоток; 11 – отводящий лоток

Рисунок 8.9 – Схема тангенциальной песколовки с вихревой водяной воронкой [81]

Независимо от конструкции песколовка состоит из 2 частей: рабочей, где движется поток сточных вод, и осадочной, в которой собирается песок, предназначенный для удаления. Осевший на дно песколовки песок сдвигается самопроизвольно за счет уклона дна, или при помощи гидросмыыва, или скребками к бункеру, объем которого принимается равным 2-суточному объему осаждающегося песка. Выгрузка осадка из песколовки производится от одного раза в 2–3 суток до одного раза в сутки в зависимости от поступления и накопления песка. Количество песка, задерживаемого песколовками, составляет обычно  $0,02 \text{ дм}^3/(\text{чел}\cdot\text{сут})$  или  $7,3 \text{ дм}^3$  на одного человека в год при влажности 60 % и объемной массе  $1,5 \text{ т}/\text{м}^3$ . При количестве улавливаемого в песколовках песка более  $0,1 \text{ м}^3/\text{сут}$  удаление осадка механизируется при помощи гидроэлеваторов, грейферов, ковшовых элеваторов, песковых насосов и т. п. Для сгребания осадка к приемнику песколовок используются скребковые механизмы цепного и тележечного типа, а также гидросмыыв.

#### *Отстойники*

Отстаивание является наиболее простым и часто применяемым в практике способом выделения из сточных вод грубодисперсных примесей, которые под действием силы тяжести оседают на дно отстойника или всплывают на поверхность [81]. Отстойники применяют как основное сооружение механической очистки сточных вод. Они предназначены для выделения из

сточных вод нерастворимых взвешенных грубодисперсных примесей преимущественно органического происхождения. В зависимости от требований к очистке сточных вод отстаивание может производиться как предварительное перед биологической или физико-химической очисткой сточных вод, так и как окончательный способ очистки.

Классификация отстойников:

1 По назначению в технологической схеме: первичные, вторичные и третичные.

2 По режиму действия: отстойники периодического действия (контактные) – отстаивание происходит в покое; отстойники непрерывного действия (проточные) – отстаивание происходит при медленном движении жидкости. Преимущественно используются отстойники непрерывного действия.

3 По направлению движения потока воды: вертикальные, горизонтальные. Разновидность горизонтальных отстойников – радиальные. Содержание взвешенных веществ, выделяемых первичными отстойниками, зависит от начального содержания и от характера примесей (формы и размера частиц, плотности, скорости осаждения), а также от продолжительности их отстаивания. Основная масса взвешенных веществ выпадает в осадок в течение 1,5–2 часов. Концентрация взвешенных веществ в осветленных сточных водах после отстойников, подаваемых на сооружения биологической очистки с целью полной или частичной очистки от веществ, подверженных биохимической деструкции, не должна превышать 150 мг/дм<sup>3</sup> в осветленных сточных водах. Концентрацию взвешенных веществ в сточной воде, подаваемой на сооружения биологической очистки с удалением азота и фосфора, со стабилизацией ила, следует определять в соответствии с технологическими требованиями процесса биологической очистки. Тип отстойника (вертикальный, радиальный, горизонтальный, двухъярусный и др.) следует выбирать с учетом принятой технологической схемы очистки сточных вод и обработки их осадка, производительности станции, очередности строительства, количества эксплуатируемых единиц, конфигурации и рельефа площадки, геологических условий, уровня грунтовых вод и т. п.

Рекомендуется применять:

- горизонтальные отстойники на станциях очистки сточных вод производительностью более 15000 м<sup>3</sup>/сут;
- вертикальные отстойники на станциях очистки сточных вод производительностью до 20000 м<sup>3</sup>/сут при низком уровне грунтовых вод;
- радиальные отстойники на станциях очистки сточных вод производительностью более 20000 м<sup>3</sup>/сут;
- двухъярусные отстойники на станциях очистки сточных вод производительностью до 20000 м<sup>3</sup>/сут.

Основным уравнением скорости осаждения взвешенных частиц в воде при числе Рейнольдса  $Re < 2$  является формула Стокса

$$U_0 = \frac{d^2 (\rho_q - \rho_b) g}{18 \eta}, \quad (8.1)$$

где  $U_0$  – гидравлическая крупность частицы, м/с;  $d$  – диаметр сферической частицы, м;  $\rho_q$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_b$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\eta$  – динамическая вязкость воды, Па·с.

Это эмпирическая формула (8.1) имеет определенный диапазон применения. Формула Стокса верна при следующих допущениях:

- частицы должны иметь сферическую форму;
- процесс осаждения должен происходить в монодисперсной агрегативно-устойчивой системе, когда частицы имеют одинаковые размеры и при осаждении не меняют свои формы и размеры.

При отстаивании сточных вод процесс происходит в полидисперсной агрегативно-неустойчивой системе с широким диапазоном размеров частиц, которые в процессе осаждения конгломерируются. Вследствие этого скорость осаждения изменяется.

Исходя из этого кинетику процесса осаждения или всплыивания грубодисперсных примесей сточных вод устанавливают опытным путем в лабораториях в цилиндрах при высоте слоя жидкости  $h = 500$  мм (принимается за эталон). Для агрегативно-устойчивых частиц принимается простое соотношение, позволяющее пересчитать время ( $T$ ), необходимое для получения заданного эффекта очистки в отстойниках, по результатам лабораторных исследований в цилиндрах эталонной высоты ( $\Theta$ ) при продолжительности  $t$ :

$$T / H = t / h \text{ при } \Theta = \text{const.} \quad (8.2)$$

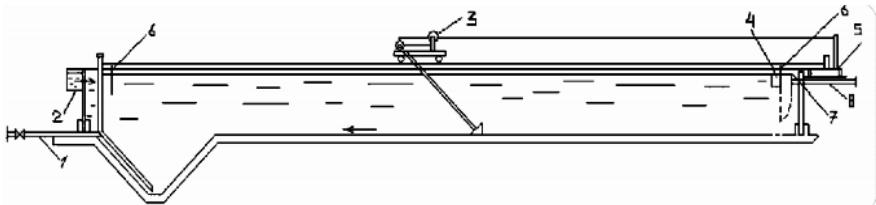
Для агломерирующих взвешенных веществ, преобладающих в сточных водах, зависимость (8.2) будет не прямолинейна, а примет следующий вид:

$$T = t \left( \frac{H}{h} \right)^n, \quad (8.3)$$

где  $n$  – показатель степени, отражающий влияние агломерации.

#### *Горизонтальные отстойники*

Горизонтальные отстойники рекомендуется применять на станциях очистки сточных вод производительностью более 15000 м<sup>3</sup>/сут. Представляет прямоугольный в плане резервуар, разделенный на несколько отделений, число отделений не менее двух (рисунок 8.10). Поток осветляемой воды, распределяемый по ширине сооружения с помощью лотка с впускными отверстиями, движется горизонтально в направлении водослива сборного канала, расположенного с противоположного торца отстойника [81].



1 – трубопровод для удаления сырого осадка и опорожнения; 2 – подводящий лоток;  
3 – скребковая тележка; 4 – лоток для сбора плавающих веществ; 5 – фронтальная тележка;  
6 – полупогруженные доски; 7 – сборный лоток; 8 – трубопровод для удаления плавающих веществ

Рисунок 8.10 – Схема первичного горизонтального отстойника [81]

Выпадающий по длине отстойника осадок перемещается скребком в расположенные на входе в сооружение иловые приямки, откуда под гидростатическим напором выгружается в самотечный трубопровод с последующим его отводом на перекачивающую насосную станцию. Всплывающие жировые вещества собираются в конце сооружения в жirosборный лоток, из которого также самотеком отводятся на перекачку.

Основные конструктивные параметры:

- глубина проточной части – от 1,5 до 4 м;
- ширина отделения отстойника – 6, 9 м;
- уклон днища к приямку – 0,005;
- высота нейтрального слоя над слоем осадка – 0,3 м;
- угол наклона стенок илового приямка – от 50 до 55°.

Достоинства:

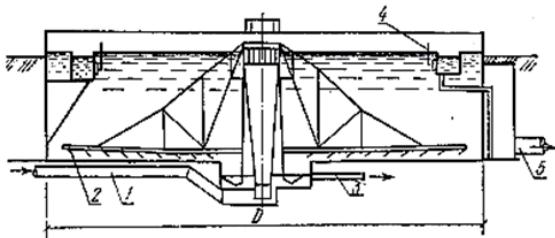
- малая глубина;
- относительно высокий коэффициент использования объема;
- эффект очистки по взвешенным веществам – 50–60 %;
- возможность использования одного скребающего устройства для нескольких отделений;
- возможность блокирования с аэротенками.

Недостатки:

- сложность эксплуатации в отстойниках скребковых механизмов;
- большая их материалоемкость по сравнению с круглыми в плане;
- необходимость применения большего числа отстойников вследствие ограниченной ширины.

#### *Радиальные отстойники*

Применяются при производительности станции более 20000 м<sup>3</sup>/сут. Представляют круглые в плане резервуары (рисунок 8.11), в которых вода подается в центр отстойника и движется радиально от центра к периферии. Скорость движения воды изменяется от максимальных значений в центре до минимальных у периферии радиального отстойника [81].



1 – подводящий трубопровод; 2 – скребковое устройство; 3 – трубопровод сырого осадка;  
4 – полупогруженные доски; 5 – отводящий трубопровод

Рисунок 8.11 – Схема первичного радиального отстойника [81]

Плавающие вещества удаляются с поверхности воды в отстойнике подвесным устройством, размещенным на вращающейся ферме, и поступают в приемный бункер или в сборный лоток.

Выпадающий осадок с помощью скребков, укрепленных на подвижной ферме, сдвигается в приемник отстойника. Частота вращения подвижной фермы 2–3 ч<sup>-1</sup>; вращение осуществляется с помощью периферийного привода с тележкой на пневмошине. Осадок удаляется по трубопроводу с помощью плунжерных и центробежных насосов, установленных в расположенной рядом насосной станции. Всплывающие вещества отводятся в жirosборник. Осветленная вода поступает в круговой сборный лоток через один или через оба его борта, являющихся водосливами. В целях обеспечения более надежного выравнивания скорости движения воды на выходе из отстойника водосливы сборных лотков выполняют зубчатыми. Основные конструктивные параметры радиальных отстойников:

- глубина проточной части – от 1,5 до 5 м;
- диаметр принимается не менее 18 м;
- высота бортов отстойника над поверхностью воды – 0,3 м;
- высота нейтрального слоя над слоем осадка – 0,3 м;

Достоинства:

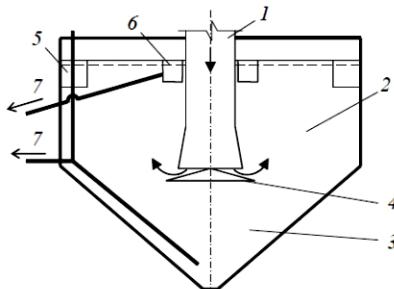
- малая глубина – удешевляет стоимость;
- малая материалоемкость вследствие малой толщины стеновых панелей из-за применения высокопрочной предварительно напряженной арматуры.

Недостатки:

- низкий коэффициент использования объема;
- низкий эффект осветления по сравнению с горизонтальными отстойниками (до 50–55 %).

#### *Вертикальные отстойники*

Применяются при производительности до 20000 м<sup>3</sup>/сут. Они представляют собой, как правило, вертикальные цилиндрические резервуары с коническим днищем (рисунок 8.12) [81].



1 – центральная труба; 2 – зона отстаивания; 3 – осадочная часть; 4 – отражательный щит;  
5 – периферийный сборный лоток; 6 – кольцевой лоток; 7 – удаление осадка

Рисунок 8.12 – Схема вертикального отстойника с центральной трубой [81]

Разработаны типовые проекты на вертикальные отстойники диаметром 4, 6, 9 м. Разработаны несколько разновидностей вертикальных отстойников, которые отличаются конструкцией впускных и выпускных устройств.

Сточная вода подводится к центральной трубе и спускается по ней вниз. При выходе из нижней части центральной трубы она меняет направление движения и медленно поднимается вверх к сливному желобу. При этом из сточной воды выпадают грубодисперсные примеси, плотность которых больше плотности сточной воды. Для лучшего распределения воды по всему сечению отстойника и предотвращения взмучивания осадка опускающейся водой центральную трубу делают с раструбом, ниже которого устанавливают отражательный щит. Уровень воды в отстойнике определяется гребнем переливного (сборного) желоба, в который поступает отстоеная вода. Отсюда она направляется на последующую очистку. Взвешенные вещества, выделившиеся из сточной воды, образуют осадок, скапливающийся в иловой части отстойника, вместимость которой рассчитывают на двухсуточный объем осадка. Осадок из вертикальных отстойников удаляют под действием гидростатического давления через иловую трубу диаметром 200 мм, выпуск которой расположен на 1,5–2 м ниже уровня воды в отстойнике. Влажность осадка составляет 95 %.

Основные конструктивные параметры вертикальных отстойников:

- 1) глубина проточной части – от 2,7 до 3,8 м;
- 2) длина центральной трубы – равная глубине зоны отстаивания;
- 3) диаметр раструба – 1,35 диаметра трубы;
- 4) диаметр отражательного щита – 1,3 диаметра раструба;
- 5) угол конусности отражательного щита – 146°;
- 6) высота нейтрального слоя между низом отражательного щита и уровнем осадка – 0,3 м;
- 7) угол наклона конического днища – от 50 до 60°.

Достоинства:

- удобство удаления осадка;
- простота конструкции из-за отсутствия движущихся частей;
- занимают меньшую площадь;
- возможность блокирования с аэротенками прямоугольных в плане отстойников.

Недостатки:

- низкий коэффициент использования объема – 0,35;
- низкий эффект очистки – не более 40 %;
- плохое сползание осадка к центру днища отстойника;
- большая глубина, повышающая стоимость строительства;
- ограниченная пропускная способность (диаметр не более 9 м).

#### *Тонкослойные отстойники*

Данные отстойники можно устраивать самостоятельно, а можно существующие отстойники переоборудовать в тонкослойные (рисунок 8.13). Отстойная зона оборудуется параллельно расположенными пластинами, образующими полочные секции, или трубчатыми элементами, которые делят отстойную зону на ряд неглубоких слоев (до 15 см) [81].

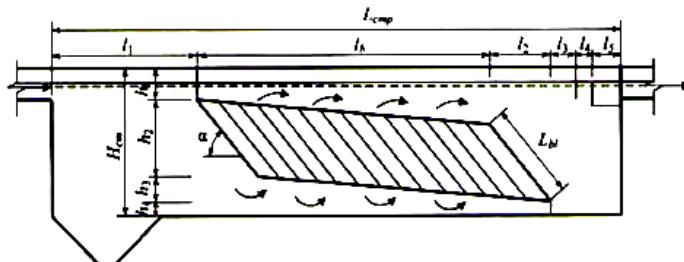


Рисунок 8.13 – Тонкослойный отстойник с противоточной схемой работы [81]

При обычном традиционном отстаивании критерий Рейнольдса для открытых потоков  $Re > 500$ , т. е. в открытом потоке жидкости происходят турбулентные пульсации, которые затрудняют осаждение взвешенных частиц. Уменьшение высоты отстаивания обеспечивает снижение турбулентности, т. е.  $Re \leq 500$ , вследствие чего повышается коэффициент использования объема и уменьшается продолжительность отстаивания (до нескольких минут) [81].

Реконструкция обычных отстойников в тонкослойные позволяет повысить их производительность в 2–4 раза.

Основные схемы взаимного движения воды и выделенного осадка [81]:

- перекрестная схема – когда выделенный осадок движется перпендикулярно движению рабочего потока жидкости;

- противоточная схема – выделенный осадок удаляется в направлении, противоположном движению рабочего потока;
- прямоточная схема – направление движения осадка совпадает с направлением водного потока.

Наиболее рациональной конструкцией тонкослойного отстойника следует считать отстойник с противоточной схемой движения фаз.

Тонкополочные отстойники следует применять для очистки сточных вод, содержащих в основном оседающие примеси. Благодаря движению воды в наклонных секциях снизу вверх создаются благоприятные условия для осаждения взвешенных веществ по более короткой траектории.

Недостатки:

- не подобраны неразрушающиеся гидравлическими потоками материалы;
- не решена проблема с биообразстванием устанавливаемых модулей, что ограничивает сроки удовлетворительной эксплуатации конструкций (в результате обрастания процесс гравитационного отстаивания резко ухудшается);
- засорение модулей, а очистка затруднена.

## **8.4 Биологическая очистка сточных вод с использованием аэрации**

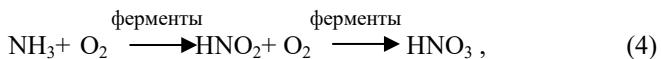
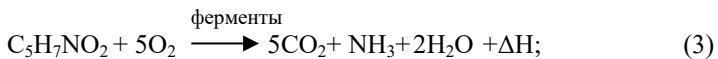
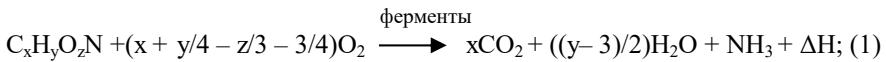
**Биохимические основы технологических процессов очистки сточных вод методами аэрации**

Биологические методы очистки сточных вод основываются на способности микроорганизмов использовать разнообразные вещества, содержащиеся в сточных водах, в качестве источника питания в процессе жизнедеятельности. Таким образом, искусственно культивируемые микроорганизмы освобождают воду от загрязнений, а метаболизм этих загрязнений в клетках микроорганизмов обеспечивает их энергетические потребности, прирост биомассы и восстановление распавшихся веществ клетки. Микроорганизмы, как известно, обладают целым рядом особых свойств, из которых следует выделить три основных, широко используемых для целей очистки [81]:

- способность потреблять в качестве источников питания самые разнообразные органические (и некоторые неорганические) соединения для получения энергии и обеспечения своего функционирования;
- способность быстро размножаться;
- способность образовывать колонии и скопления, которые сравнительно легко можно отделить от очищенной воды после завершения процессов изъятия содержавшихся в ней загрязнений.

В живой микробной клетке непрерывно и одновременно протекают два процесса – распад молекул (катализм) и их синтез (анаболизм), составляющие процесс обмена веществ – метаболизм. Источником питания для гетеротрофных микроорганизмов являются углеводы, жиры, белки, спирты и т. д., которые расщепляются ими в аэробных или анаэробных условиях.

Весь цикл взаимоотношений клетки с окружающей средой в процессе изъятия из нее и трансформации питательных веществ определяется и регулируется соответствующими ферментами, каталитическая функция которых лежит в основе жизнедеятельности любого организма. Если микроорганизмы культивируют в аэробных условиях, то сумму реакций биологического окисления можно представить в виде следующих схем:



где  $C_xH_yO_zN$  – органические вещества сточных вод;  $C_5H_7NO_2$  – среднестатистическое соотношение основных элементов продуцируемого клеточного вещества.

Реакции (1) и (2) символизируют биологический процесс очистки от исходных загрязнений состава  $C_xH_yO_zN$ . Первая реакция – окисление вещества на энергетические потребности клетки, вторая – на синтез биомассы состава  $C_5H_7NO_2$ . Затраты кислорода на эти две реакции соответствуют БПК<sub>полн</sub> сточной воды. Если окисление проводится достаточно долго, то после использования исходного органического вещества начинается процесс окисления клеточного вещества бактерий (3).

Реакции (1) и (2) осуществляют гетеротрофы. Когда вода очищена и экзогенный (внешний) источник органического углерода исчерпан, наступают благоприятные условия для развития автотрофных культур. При наличии в воде достаточной концентрации растворенного кислорода в среде развиваются автотрофы – нитрификаторы, которые проводят биологическое окисление аммонийного азота сначала до нитритного, а затем до нитратного (4).

Для нормального процесса синтеза клеточного вещества, а, следовательно, и для эффективного процесса очистки воды в среде должна быть достаточная концентрация всех основных элементов питания – органического углерода (БПК), азота, фосфора. Достаточность элементов питания для бактерий в сточных водах определяется соотношением БПК : N : P. В каждом конкретном случае это соотношение индивидуально, так как оно определяется составом продуцируемых клеток, который зависит от состава очищаемой воды. При обработке городских сточных вод используется соотношение БПК : N : P = 100 : 5 : 1.

Биологическую очистку называют полной, если БПК очищенной воды составляет менее 20 мг/л, и неполной – при БПК более 20 мг/л.

#### *Анализ процессов биохимической очистки сточных вод в аэротенках*

Изъятие и окисление органических загрязнений при помощи водных микроорганизмов, находящихся в жидкости во взвешенном состоянии в виде отдельных хлопьев, происходит в аэротенках (рисунок 8.14). В аэробных условиях на органических загрязнениях, содержащихся в сточной воде, развиваются скопления микроорганизмов и простейших, образующих активный ил.

Для нормального протекания процесса очистки в аэротенки необходимо:

- перемешивание жидкости с активным илом;
- обеспечение растворенным кислородом;
- установление режима подачи загрязнений на единицу массы микроорганизмов;
- температурный режим.

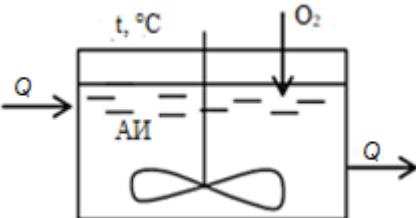


Рисунок 8.14 – Схема аэротенка [81]

Определяющий показатель процесса биологической очистки в аэротенках – скорость изъятия загрязнений из очищаемой воды, т. е. процесс очистки воды и скорость биохимического разложения изымаемых загрязнений.

В связи с этим представляют интерес основные закономерности развития колонии микроорганизмов, вводимой в контакт с жидкостью, содержащей питательные вещества, при достаточном обеспечении ее растворенным кислородом. В данном развитии можно выделить следующие фазы (рисунок 8.15):

I – лаг-фаза, характеризует стадию адаптации активного ила к внесенным загрязнениям, практически не происходит прироста биомассы;

II – фаза ускоренного роста микроорганизмов, вследствие избытка питательных веществ скорость размножения клеток – максимальная, интенсивное изъятие загрязнений;

III – фаза замедленного роста, в которой скорость роста биомассы начинает все более сдерживаться по мере истощения питательных веществ и накопления продуктов метаболизма;

IV – фаза нулевого роста (или прекращения роста), в которой значение концентрации ила стабилизируется, т. к. недостаточное питание тормозит рост микроорганизмов, свидетельствующее о равновесии между наличием питательных веществ и накопленной биологической массой;

V – фаза эндогенного дыхания (или фаза самоокисления), характеризуется низкой концентрацией загрязнений в сточных водах, вследствие чего происходит отмирание активного ила и снижение его концентрации.

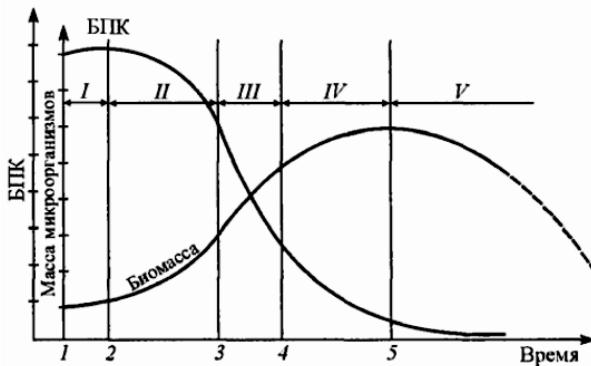


Рисунок 8.15 – Зависимость прироста биомассы  
в аэробных условиях от концентрации питательных веществ [81]

### **Физико-химическая, химическая и микробиологическая характеристики активного ила**

1 Соотношение между количеством питания и массой микроорганизмов в аэротенке является важнейшей характеристикой, определяющей условия протекания в нем биохимических процессов. Эта характеристика получила название «нагрузки загрязнений на ил» – количество поступающих со сточной водой загрязнений, приходящееся на единицу массы ила в единицу времени. Выражается в мг или г загрязнения (ХПК, БПК или любого другого загрязнения) на 1 г беззольного вещества сухого ила в 1 ч или в 1 сут.

Исходя из нагрузки на активный ил аэротенки бывают:

- высоконагружаемые при нагрузках  $q_i > 0,5$  г БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества сухого ила в сутки;
- средненагружаемые при  $q_i \sim 0,15-0,5$  г БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества сухого ила в сутки;
- низконагруженные при  $q_i \sim 0,065-0,15$  г БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества сухого ила в сутки;
- аэротенки с «продленной аэрацией» при  $q_i$  менее  $\sim 0,065$  г БПК на 1 г беззольного вещества сухого ила в сутки, происходит самоокисление определенного количества активного ила.

2 «Доза активного ила» ( $a_i$ ), или концентрация ила, представляет массу ила в иловой смеси в граммах сухого вещества ила в 1 л или в 1 м<sup>3</sup> иловой смеси. Таким образом, среднюю нагрузку на активный ил, например, по загрязнениям, выраженным через БПК, можно представить как

$$q_i = 24L_{en} / a_i(1 - s)t_{at}, \quad (8.4)$$

где  $L_{en}$  – БПК поступающей в аэрационное сооружение сточной жидкости, мг/л или г/м<sup>3</sup>;  $S$  – зольность ила, доли единицы;  $a_i$  – доза ила, выражаемая в г/л, если БПК выражена в мг/л, и в г/м<sup>3</sup>, если БПК выражена в г/м;  $t_{at}$  – длительность пребывания жидкости в аэрационном сооружении.

Тогда нагрузка на ил выразится в граммах поступающей БПК на 1 г беззольного вещества сухого ила в 1 ч.

Среднее значение дозы ила в аэрационных сооружениях может колебаться в пределах 3–5 г/л – при продленной аэрации; 3–4 г/л – при низких нагрузках на ил; 2,5–3,5 г/л – при средних и 2–3 г/л – при высоких нагрузках.

3 Разница между поступающей в аэрационное сооружение и выходящей из него БПК<sub>полн</sub> называется *снятой БПК<sub>полн</sub>*. Ее отношение к массе ила и длительности аэрации – *удельной скоростью изъятия загрязнений из очищаемой воды*, т. е. скоростью очистки. Последнюю выражают в мг или г БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества ила в 1 ч:

$$\rho_i = (L_{en} - L_{ex}) / a_i (1 - s) t_{at}. \quad (8.5)$$

*Удельная скорость изъятия загрязнений* – это то количество загрязнений, которое может быть снято 1 г беззольного вещества сухого ила в 1 ч в заданных условиях реализации процесса биохимической очистки.

4 *Иловый индекс I* – объем (мл), приходящийся на 1 г сухого вещества активного ила после 30-минутного отстаивания иловой смеси. Иловый индекс характеризует седиментационную способность активного ила, т. е. предрасположенность ила к оседанию. Хорошо оседающий ил имеет иловый индекс от 60–90 до 120–150 мл/г в зависимости от технологического режима работы аэрационных сооружений и состава сточных вод.

5 *Окислительная мощность* аэрационного сооружения – количество загрязнений, снимаемых в единицу времени массой активного ила, находящейся в единице объема сооружения. Выражается в килограммах снятых загрязнений, приходящихся на 1 м<sup>3</sup> сооружения в сутки. Иногда эту величину называют объемной нагрузкой на сооружение. Окислительная мощность аэротенков может составлять от 0,3 кг БПК<sub>полн</sub> до 2–3 кг БПК<sub>полн</sub> на 1 м<sup>3</sup> сооружения в зависимости от технологического режима его работы.

6 *Возраст ила* – средняя продолжительность его пребывания в сооружениях биологической очистки. Поскольку часть потребляемых илом органических загрязнений идет на построение новых бактериальных клеток, активный ил развивается и его масса увеличивается. Это увеличение называется *приростом ила*, выражаемое, как и доза ила, в единицах концентрации (в мг/л или г/л). Прирост ила называют избыточным активным илом в отличие от массы ила, возвращаемой из сооружения илоотделения в аэрационный резервуар и получившей название *циркуляционного активного ила*. Чем

выше прирост ила, тем больше количество избыточного активного ила, и, следовательно, тем быстрее обновляется ил и тем меньше его возраст.

7 Работа аэрационных сооружений оценивается также такими энергетическими показателями, как расход электроэнергии на снятие единицы массы загрязнений, например, кВт·ч на 1 кг БПК<sub>полн</sub> (или ХПК); расход энергии или воздуха на очистку 1 м<sup>3</sup> сточной воды. Расход воздуха при пневматической системе аэрации подсчитывают по отношению к 1 м<sup>3</sup> очищенной воды и 1 кг снятой БПК<sub>5</sub>. Для городских сточных вод при мелкопузырчатой системе аэрации на 1 м<sup>3</sup> воды расходуется 5–10 м<sup>3</sup> воздуха, или 40–60 м<sup>3</sup> на 1 кг снятой БПК<sub>5</sub>.

8 Бионасение активного ила разнообразно и включает бактерии, которым в процессе очистки отводится главенствующая роль, простейшие, грибы, некоторые высшие организмы (типа коловраток, червей, клещей), водоросли, вирусы. Качественный и количественный состав микронаселения ила зависит от многих факторов: состава обрабатываемой воды, массы загрязнений, приходящихся на единицу массы ила в единицу времени, доступа кислорода, гидродинамического режима в сооружении и ряда других.

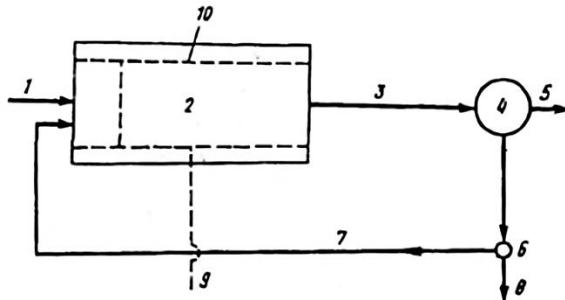
Число бактерий в илах колеблется от 10<sup>8</sup> до 10<sup>13</sup> на 1 мг сухого вещества. В активном иле всегда присутствуют хорошо сформированные зооглейные скопления бактерий с развитой поверхностью, состоящие как из чистой культуры Zooglegaramigera, так и развитых форм других видов бактерий.

Установлено, что чем больше различных органических соединений в стоках, тем разнообразнее биоценоз ила. Биоценоз ила меняется на протяжении процесса очистки воды. По мере изменения содержания питательных веществ в иле в нем происходит изменение числа бактерий разных родов.

### **Классификация аэротенков по гидродинамическому режиму**

*Аэротенки-вытеснители* – сооружения, в которые сточная вода и возвратный ил впускаются сосредоточенно с одной из торцевых сторон аэротенка и выходят также сосредоточенно с другой торцовой стороны сооружения, т. е. более ранняя порция иловой смеси вытесняется вновь поступившей (рисунок 8.16). Целесообразно их применять при БПК<sub>5</sub> поступающей сточной воды до 200 мг/л, отсутствии трудноокисляемых загрязнений.

По этой схеме активный ил подается сосредоточено на вход в аэротенк, туда же подается и подлежащая биологической очистке сточная вода после первичного отстаивания. В результате смешения воды и активного ила образуется иловая смесь. В процессе ее движения к выходу из аэротенка обеспечивается необходимая для протекания биохимических реакций длительность контакта активного ила с загрязнениями, при постоянном перемешивании и обеспечении кислородом воздуха. Пребывание иловой смеси в отстойных сооружениях приводит к ее разделению под действием гравитационных сил на биологически очищенную воду и активный ил, оседающий и уплотняющийся в нижней иловой части отстойного сооружения.



1 – сточная вода после первичных отстойников; 2 – аэротенк; 3 – иловая смесь из аэротенков;  
 4 – вторичный отстойник; 5 – очищенная вода; 6 – иловая камера;  
 7, 8 – циркуляционный и избыточный активный ил соответственно;  
 9 – воздух из воздуходувок; 10 – аэрационная система для подачи и распределения воздуха

Рисунок 8.16 – Аэротенки-вытеснители [81]

Достоинства – высокое качество очистки. Недостатки – невысокая доза ила, неравномерность органической нагрузки на активный ил в рабочем объеме, т. е. в зоне впуска ила больше, и очистка идет интенсивнее, чем на выходе, а в целом такая неравномерность снижает производительность аэротенков. В соответствии с нагрузкой на ил снижается и потребность активного ила в кислороде, значение которой у входа в аэротенк существенно выше, чем на выходе из него, поэтому необходима соответствующая дифференцированная подача воздуха. В некоторых случаях до половины необходимого количества воздуха подается в первой 1/4 длины аэротенка.

*Аэротенки-смесители* – сооружения, в которые сточные воды и активный ил подаются равномерно вдоль длинных сторон коридора аэротенка. Сбор очищенной жидкости происходит на стороне, противоположной впуску. Иловая смесь, таким образом, протекает не вдоль, а поперек аэротенка (рисунок 8.17). Целесообразно применять при  $\text{БПК}_5$  поступающей сточной воды более 200 мг/л, при наличии медленно окисляемых веществ, а также при непостоянном составе сточных вод.

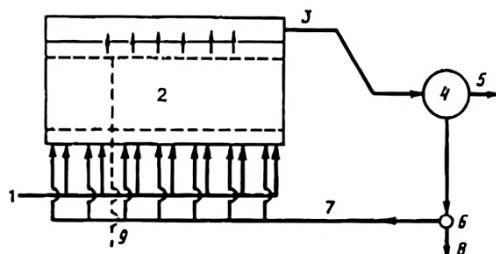


Рисунок 8.17 – Аэротенк-смеситель (обозначения позиций те же, как на рисунке 8.16)

Достоинства – высокая скорость окисления загрязнений, равномерная органическая нагрузка на ил по всему объему сооружения.

Недостатки – вероятность «проскока» с очищенной водой неокисленных или не полностью окисленных загрязнений, что несколько снижает надежность и стабильность качества очистки воды в этих сооружениях.

*Аэротенки с рассредоточенной подачей воды* – сооружения, в которых активный ил подается сосредоточенно в торец головной части аэротенка, а сточная вода вводится в нескольких точках аэротенка вдоль продольной стены. Выпуск иловой смеси осуществляется в конце аэротенка (рисунок 8.18).

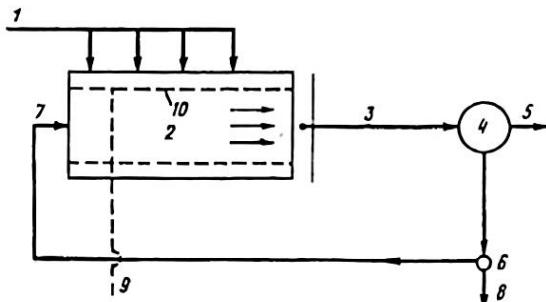


Рисунок 8.18 – Аэротенк с рассредоточенной подачей воды  
(обозначения позиций те же, что и на рисунке 8.16)

В этих сооружениях в определенной степени сочетаются преимущества аэротенка-вытеснителя, обеспечивающего высокое качество очистки, с достоинствами аэротенка-смесителя, позволяющего усреднить нагрузку на активный ил вдоль сооружения.

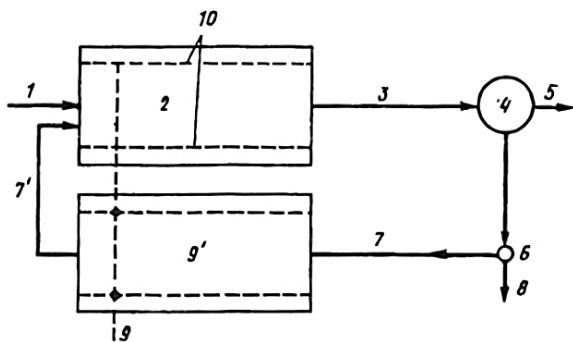
#### Технологические схемы очистки сточных вод в аэротенках

В основные технологические схемы очистки сточных вод входят аэротенки одноступенчатые, аэротенки с регенераторами и аэротенки двухступенчатые.

*Аэротенки одноступенчатые.* Классическая схема биологической очистки сточных вод. Преимущества в относительной простоте устройства и эксплуатации.

*Аэротенки одноступенчатые с регенераторами.* В основу схемы аэротенков с регенераторами положена разница в скоростях двух процессов – очистки илом сточной воды от исходных загрязнений и биохимического окисления этих загрязнений. Для городских сточных вод эта схема достаточно рациональна, поскольку скорость очистки сточной воды в 2–5 раз превышает скорость окисления. Введение регенераторов для обработки городских сточных вод рекомендуется применять при  $\text{БПК}_5$  поступающей воды 100 мг/л и более.

После извлечения загрязнений из сточной воды в аэротенках активный ил с накопленными в нем загрязнениями отделяется от очищенной воды и подается не в аэротенк, а в специальное аэрационное сооружение (регенератор), в котором активный ил аэрируется в течение определенного времени без сточной жидкости. В регенераторе ил освобождается от накопленных в аэротенке загрязнений и восстанавливает свою метаболическую активность. Регенерированный ил направляется затем из регенератора в аэротенк для нового контакта с очищаемой жидкостью и инициирования цикла изъятия из нее загрязнений (рисунок 8.19).

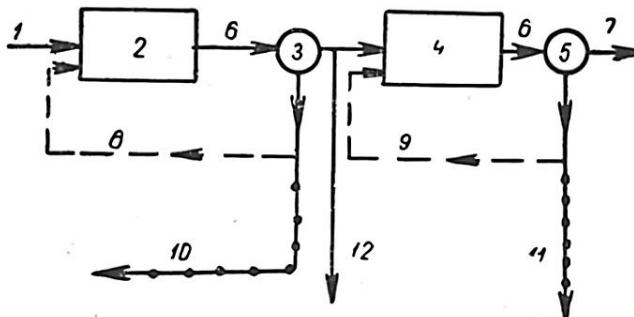


$7'$  – регенерированный активный ил;  $9'$  – регенератор ила  
(обозначения остальных позиций те же, что и на рисунке 8.16)

Рисунок 8.19 – Аэротенк с регенерацией активного ила

*Аэротенки двухступенчатые без регенераторов.* Применяется при высокой исходной концентрации органических загрязнений в воде, а также при наличии в воде веществ, скорость окисления которых резко различна. На первой ступени аэротенков происходит частичная очистка сточных вод (БПК снижается на 50–70 %), затем после осветления во вторичных отстойниках они поступают на вторую ступень. В этих условиях в активном иле первой и второй ступени развиваются специфические аэробные микроорганизмы, приспособленные к данным конкретным условиям. В результате получается высокий эффект полной очистки сточных вод с некоторым снижением объема аэротенков, а также воздуха для их аэрации (рисунок 8.20).

Практически всегда в качестве аэротенков второй ступени применяются аэротенки-вытеснители (хотя могут применяться и аэротенки с рассредоточенным впуском воды в них) для обеспечения постоянства качества очистки. Аэротенки-смесители более эффективны на первой ступени для снятия основной массы загрязнений при более низкой степени очистки (т. е. для частичной очистки сточной воды).



1 – осветленная сточная вода; 2 и 4 – аэротенки I и II ступени; 3 и 5 – отстойники I и II ступени;  
6 – иловая смесь; 7 – очищенная сточная вода; 8 и 9 – возвратный активный ил I и II ступени;  
10 и 11 – избыточный активный ил I и II ступени; 12 – аварийный выпуск

Рисунок 8.20 – Схема очистки сточных вод в двухступенчатых аэротенках  
без регенераторов

*Аэротенки двухступенчатые с регенераторами* (рисунок 8.21). В этой схеме очистки на каждой ступени аэротенков предусмотрены регенераторы. Применяются при очистке сточных вод, концентрированных по органическим загрязнениям, при возможном залповом их поступлении вместе с токсическими веществами. Также регенераторы можно применять только для I ступени аэротенков в объеме 50 %. Менее нагруженным по количеству загрязнений является активный ил аэротенков II ступени, поэтому некоторые специалисты рекомендуют направлять его избыток в аэротенки I ступени.

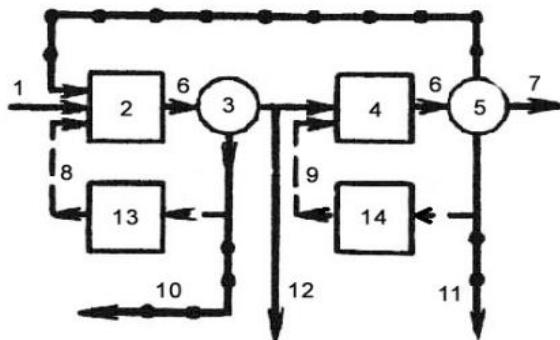


Рисунок 8.21 – Схема очистки сточных вод в двухступенчатых аэротенках с  
регенераторами: 13 и 14 – регенератор I и II ступени  
(остальные позиции соответствуют рисунку 8.20)

### *Конструкции коридорных аэротенков*

Одной из основных характеристик аэротенков является их связь с сооружениями последующего разделения иловой смеси. С этой точки зрения различают *аэротенки с отдельными отстойными сооружениями*, т. е. с независимым друг от друга гидравлическим режимом работы аэротенков и вторичных отстойников, и *аэротенки-отстойники*, в которых эти два сооружения определенным образом гидравлически связаны и взаимозависимы.

*Аэротенки с отдельными сооружениями илоотделения* характеризуются тем, что иловая смесь из них выводится и направляется в отстойные сооружения, из которых возврат циркуляционного активного ила осуществляется принудительно либо насосными установками, либо эрлифтами. Такие аэротенки могут применяться на очистных сооружениях практически любой пропускной способности, но наиболее часто на крупных и средних.

Аэротенки представляют железобетонные резервуары прямоугольной в плане формы. Глубина их обычно принимается от 3 до 5 м. Аэротенки состоят из секций, причем каждая из них делится продольными перегородками, не доходящими до одной торцовой стены, на 2, 3 и 4 коридора. Длина каждого коридора должна быть не менее 10 ширин.

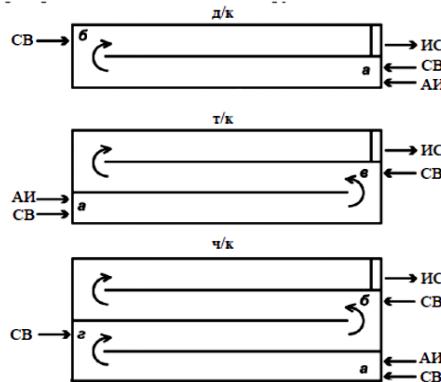
При проектировании аэротенков на полную биологическую очистку предусматривают возможность работы сооружений без раздельной регенерации активного ила, а также с регенераторами. Типовые аэротенки разработаны в виде двух-, трех- и четырехкоридорных, и в них можно обеспечить 25, 33, 50, 66, 75 % регенерации, выделяя от 1 до 3 коридоров аэротенка под регенерацию. Требующийся объем регенераторов, выраженный в процентах от суммарного объема собственно аэротенков и регенераторов, получил название «процент регенерации».

В аэротенках-вытеснителях (рисунок 8.22) циркулирующий активный ил поступает в первый по ходу коридор. Сточные воды подаются в одном месте:

- в точке *a*, и в этом случае аэротенки работают без регенерации активного ила;
- в точке *b* – с 50%-й регенерацией ила (50 % объема всего сооружения занимает регенератор);
- в точке *c* – при этом регенератор занимает 33 % объема аэротенка;
- в точке *г* – регенератор занимает 25 % объема сооружения.

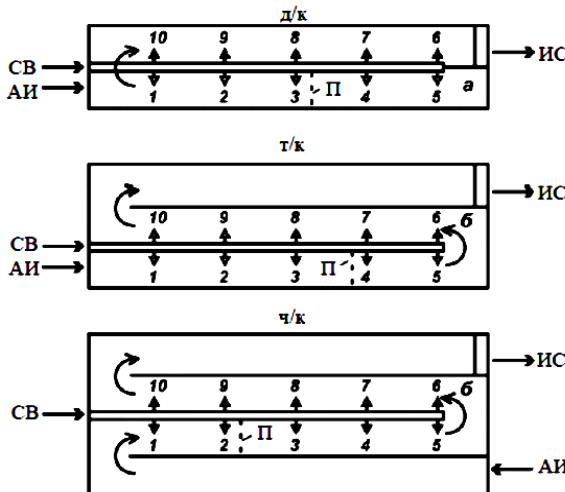
На рисунке 8.23 показаны возможные способы выпуска сточных вод в двух-, трех- и четырехкоридорные *аэротенки-смесители*. Стоки по лотку, располагаемому над стенкой одного из коридоров, могут подаваться через все либо через часть выпускных устройств (шиберы с калиброванными отверстиями). Если первые по ходу выпускные устройства закрыты, то часть аэротенка от места ввода активного ила до ближайшего открытого устройства становится регенератором. Очевидно, что объем регенератора может меняться в широких пределах. Иногда в конце регенератора устраивается

перегородка с отверстием, которая предотвращает перемешивание содержимого аэротенка и регенератора обратными токами воды.



СВ – подача сточных вод; АИ – подача активного ила; ИС – иловая смесь во вторичные отстойники; *a* – впуск сточных вод при отсутствии регенераторов; *б* – впуск сточных вод при объеме регенератора 50 % от объема сооружения; *в* и *г* – то же при объеме регенератора 33 и 25 %

Рисунок 8.22 – Схемы работы двухкоридорных (д/к), трехкоридорных (т/к), четырехкоридорных (ч/к) аэротенков-вытеснителей

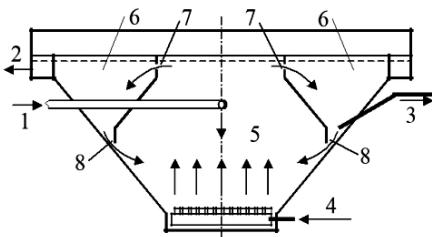


1 – 10 – возможные места впуска сточных вод в аэротенк;  
П – условное место конца регенератора (иногда ограниченного перегородкой)

Рисунок 8.23 – Схемы работы двухкоридорных, трехкоридорных и четырехкоридорных аэротенков-смесителей:

## Конструкции совмещенных сооружений

Характерной чертой аэротенков-отстойников является конструктивное совмещение аэрационного резервуара и вторичного отстойника в одном сооружении. Часть сооружения, в которой осуществляется аэрация иловой смеси, получила название аэрационной зоны, а другая – отстойной зоны. Обе эти зоны связаны между собой отверстиями, окнами, щелями, обеспечивающими переток иловой смеси из аэрационной зоны в отстойную и возврат активного ила из отстойной зоны в аэрационную без применения оборудования для принудительного возврата ила в зону аэрации. Примером такого сооружения может служить широко применяющаяся во Франции конструкция «Оксиконтакт», разработанная французской фирмой «ДеГремон» (рисунок 8.24).



1 – выпуск сточной воды; 2 – отвод очищенной воды; 3 – отвод избыточного активного ила;  
4 – подвод воздуха; 5 – зона аэрации; 6 – зона отстаивания; 7 – переливные окна;  
8 – продольные щели

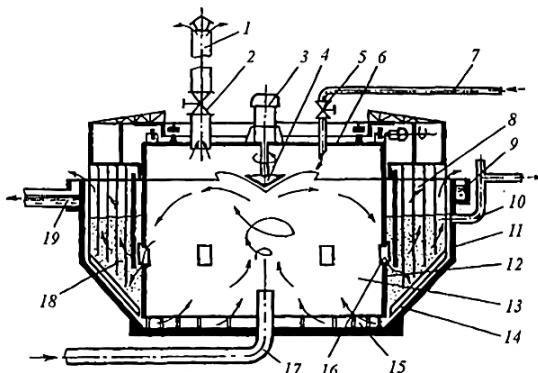
Рисунок 8.24 – Оксиконтакт

Сточная вода после первичных отстойников подается в распределительный трубопровод, расположенный вдоль аэрационной зоны, находящейся в центре прямоугольного в плане резервуара. С обеих сторон аэрационной зоны расположены отстойные зоны, отделенные от нее внутренними наклонными перегородками. Перегородки имеют в верхней части регулируемые переливные окна, через которые иловая смесь поступает в отстойную зону. Внизу перегородки примыкают к наклонной внешней стенке аэротенка таким образом, что образуется продольная щель с каждой продольной стороны аэрационной зоны. Через эти щели осаждающийся в отстойной зоне активный ил под воздействием гравитационных сил возвращается в зону аэрации. Осветленная вода после отделения ила собирается лотками 2, расположенными вдоль внешней стороны каждой отстойной зоны. Избыточный активный ил отделяется из осадочной части отстойной зоны через илоотводные трубопроводы, расположенные на определенных расстояниях друг от друга. Аэрационная зона снабжается воздухом через колпачковые аэраторы, монтируемые либо в плиту днища, перекрывающую воздушный

канал, либо в воздуховоды, укладываемые по днищу этой зоны таким образом, чтобы вызывать двойной спиралеобразный поток иловой смеси. Глубина сооружения около 4 м, длина 15–70 м (в зависимости от требуемой пропускной способности). Циркуляционный расход активного ила может достигать 200–300 % расчетного расхода сточной воды.

**Окситенки.** Использование кислорода вместо воздуха позволяет поддерживать в очищаемой воде концентрацию растворенного кислорода 5–10 мг/л вместо обычно принятой для аэротенков концентрации 1,5–2 мг/л. Это позволяет повысить окислительную способность сооружения и устойчивость очистных процессов при шоковых и резко колеблющихся нагрузках на активный ил. Кроме того, прирост активного ила в таких сооружениях на 25–35 % ниже, чем в аэротенках, за счет более глубокого окисления изымаемых загрязнений. Активный ил значительно лучше отделяется от очищенной воды и уплотняется, что позволяет уменьшить объем вторичных отстойников и уплотнителей избыточного ила.

Конструктивно окситенк (рисунок 8.25) выполнен в виде резервуара круглой в плане формы с цилиндрической перегородкой 12, разделяющей его на зону аэрации 13 в центре и илоотделитель 18 по периферии сооружения. В средней части по высоте цилиндрической перегородки устроены окна 16 для перепуска иловой смеси из зоны аэрации в илоотделитель; в нижней части перегородки – окна 15 для возвращения ила в зону аэрации.



1 – продувочный трубопровод; 2 и 5 – задвижки с электрическим приводом;  
3 – электродвигатель; 4 – турбоаэратор; 6 – герметичное перекрытие; 7 – трубопровод подачи кислорода; 8 – вертикальные стержни; 9 – сборный лоток; 10 – труба для сброса избыточного ила; 11 – круглый резервуар; 12 – цилиндрическая перегородка; 13 – зона аэрации;  
14 – скребок; 15 – окна для поступления возвратного ила в зону аэрации; 16 – окна для перепуска иловой смеси из зоны аэрации в илоотделитель; 17 – труба для подачи сточной воды в зону аэрации; 18 – илоотделитель; 19 – труба для отвода очищенной воды

Рисунок 8.25 – Окситенк

Зона аэрации оборудована герметическим перекрытием 6, на котором устанавливается электропривод 3 турбоаэратора 4. На перекрытии смонтированы трубопровод подачи кислорода 7 и продувочный трубопровод 1 с клапанами. Илоотделитель 18 оборудован перемешивающим устройством, представляющим вращаемые приводом решетки из вертикальных стержней 8  $d = 30..50$  мм, расположенных один от другого на расстоянии 300 мм. В нижней части решеток размещается шарнирно подвешенный скребок 14. Илоотделитель работает со взвешенным слоем активного ила, уровень которого стабилизируется автоматически путем сброса избыточного ила через трубу 10. Сточная вода поступает в зону аэрации по трубе 17, где турбоаэратором аэрируется и интенсивно перемешивается с активным илом. Из зоны аэрации через окна 16 и зону дегазации иловая смесь поступает в илоотделитель. Благодаря направляющим щиткам жидкость в илоотделителе медленно движется по окружности, вследствие чего значительно интенсифицируется процесс отделения и уплотнения ила. Очищенная вода проходит сквозь слой взвешенного активного ила, доочищается от взвешенных и растворенных органических веществ, поступает в сборный лоток и отводится по трубе. Возвратный активный ил спирально опускается вниз и через окна 15 направляется в зону аэрации. В настоящее время наиболее перспективно применение окситенков на объектах, которые имеют собственный технический кислород или могут получать его от соседних предприятий (например, заводы по производству синтетического каучука, а также химические, коксохимические, нефтехимические и др.).

### **Системы аэрации и типы аэраторов**

*Пневматическая система аэрации.* Пневматическая аэрация заключается в подаче воздуха с помощью компрессора и распределении его в очищаемой жидкости посредством аэраторов. В зависимости от типа применяемых аэраторов различают мелко-, средне- и крупнопузырчатую аэрацию. При мелкопузырчатой аэрации крупность пузырьков воздуха составляет 1–4 мм, при среднепузырчатой – 5–10 мм, при крупнопузырчатой – более 10 мм.

К мелкопузырчатым аэраторам относятся керамические фильтросные пластины (устарели морально и материально), тканевые и пластиковые аэраторы, мелкопузырчатые пористые титановые дисковые аэраторы, тарельчатые пластиковые аэраторы с лазерной насечкой отверстий, дисковые аэраторы, трубчатые аэраторы и др. Коэффициент использования воздуха – 15–18 %.

Преимуществами современных аэраторов являются высокие окислительная мощность и использование кислорода, экономичность, низкие потери давления, простая конструкция элемента, возможность простой и быстрой замены элемента, высокая устойчивость к засорению. Используются резиновые мембранны, резино-пластиковый или волокнисто-пористый полиэтилен и другие материалы. Эффективность аэрации зависит от их расположе-

ния по днищу аэротенка. Используется пристенная форма монтажа, расположение аэраторов по всему днищу.

*К среднепузырчатым аэраторам* можно отнести перфорированные трубы, щелевые аэраторы и др. Коэффициент использования воздуха – 8–12 %. Перфорированные трубы с отверстиями перфорации диаметром 3–4 мм укладываются у дна аэротенка. Воздухоподающие стояки устанавливают через 20–30 м. Трубы должны быть уложены строго горизонтально, иначе воздух будет продуваться неравномерно по длине трубы. Опыт эксплуатации стальных перфорированных труб показал, что через короткий срок отверстия засоряются ржавчиной и подача воздуха уменьшается.

*К крупнопузырчатым аэраторам* относятся открытые снизу вертикальные трубы, а также сопла. Коэффициент использования воздуха – 6–7 %

**Механическая система аэрации.** Системы механической аэрации иловых смесей известны давно, но широкое распространение получили в 60–70-е годы XX столетия. Механические аэраторы разнообразны в конструктивном отношении, но принцип их работы одинаков: вовлечение воздуха непосредственно из атмосферы вращающимися частями аэратора (ротором) и перемешивание его со всем содержимым аэротенка. Все механические аэраторы можно классифицировать следующим образом:

- по принципу действия: глубинные (импеллерные или кавитационные) и поверхностные;
- по плоскости расположения оси вращения ротора: с горизонтальной и вертикальной осью вращения;
- по конструкции ротора: конические, дисковые, цилиндрические, колесные, турбинные и винтовые;
- по характеру перемещения: самодвижущиеся и с принудительным перемещением.

Наиболее широкое распространение получили аэраторы *поверхностного типа*, особенностью которых является незначительное погружение в сточную воду и непосредственная связь ротора с атмосферным воздухом.

*Импеллерные* (кавитационные) аэраторы отличаются от поверхностных тем, что турбина погружается на значительную глубину в жидкость и соединяется с атмосферным воздухом либо через полый вал, приводящий турбину во вращение, либо через трубу, в которой проходит вал вращения турбины. При вращении турбины труба освобождается от воды и воздух из атмосферы поступает в зону действия турбины и далее вовлекается в жидкость струями выбрасываемой из турбины воды, как это имеет место в поверхностных аэраторах. Однако из-за значительной глубины погружения турбины (иногда в 2–2,5 м) турбина должна вращаться с периферийной скоростью в 15–20 м/с, что отрицательно оказывается на энергетических показателях работы такого аэратора.

***Смешанная, или комбинированная, система*** сочетает элементы пневматической и механической аэрации.

***Струйные, или эжекторные,*** аэраторы по принципу действия аналогичны механическим поверхностным аэраторам с вертикальной осью вращения. Конструктивное оформление эжекторных аэраторов разнообразно, однако, как правило, они имеют в составе сопло для пропуска рабочей жидкости, патрубок для вовлечения воздуха из атмосферы, камеру смешения и диффузор.

Работают эжекторные аэраторы следующим образом. Сточная вода, подаваемая насосной установкой, с большой скоростью вытекает из сопла в камеру смешения, создавая разрежение в приемной камере, что вызывает поступление через специальный патрубок атмосферного воздуха. Струя жидкости увлекает диспергируемый воздух через камеру смешения в диффузор. Попав в диффузор (зону расширения потока), водовоздушная смесь снижает свою скорость при одновременном повышении давления, что ведет к некоторому укрупнению пузырьков воздуха. При этом парциальное давление кислорода в пузырях увеличивается и происходит дополнительное насыщение жидкости кислородом. Процесс переноса кислорода в жидкость продолжается с замедляющейся скоростью и за пределами диффузора в течение всего периода контакта двух фаз (вода – воздух). Применяется эта система аэрации для сравнительно небольших очистных сооружений, так как радиус действия эжекторного аэратора невелик.

## **9 МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД**

---

### **9.1 Состав и свойства осадков сточных вод**

**В** процессах механической, биологической и физико-химической очистки сточных вод на очистных сооружениях образуются различного вида осадки, содержащие органические и минеральные компоненты. Это отбросы, задерживаемые решетками и песколовками, осадок, выпадающий в первичных отстойниках, активный ил или биопленка, образующиеся в сооружениях биологической очистки воды. Общий объем осадков, как правило, не превышает 1 % объема обрабатываемых стоков, при этом на долю активного ила приходится 60 – 70 % образующихся осадков. Можно выделить так называемые вторичные осадки, образовавшиеся в результате обработки первичных осадков (сброшенные, уплотненные, обезвоженные, сухие).

*Отбросы решеток.* В состав отбросов входят крупные взвешенные и плавающие вещества, преимущественно органического происхождения. По данным эксплуатации очистных станций средний состав отбросов включает (в %): бумагу – 65, тряпье – 25, древесину, пластики – 4, другие отбросы – 6. Влажность составляет 80 %, зольность – 7–8 % при объемной массе 750 кг/м<sup>3</sup>.

*Осадки песколовок.* В их состав входят песок, обломки минералов, уголь,битое стекло и др. При проектировании количество задерживаемых тяжелых примесей принимают 0,02 л на одного человека в сутки или 7,2 л в год, при влажности 60 %, зольности 80–90 % и объемной массе 1,5 т/м<sup>3</sup>.

*Осадки, задерживаемые жироловками или всплывающие в отстойниках.* Количество этих примесей в бытовых стоках на одного человека в год составляет 2 л при влажности 60 % и объемной массе 0,6 т/м<sup>3</sup>.

*Осадки сырье первичных отстойников.* В бытовых сточных водах эти осадки представляют студенистую, вязкую суспензию со слабокислой средой. Органические вещества (беззольность) в них составляют 65–75 %, (быстро загнивают, издавая неприятный запах), минеральные (зольность) – 25–35 %. Влажность осадка – 93–95 %. Осадок отличается большой неоднородностью: содержание частиц крупностью более 7–10 мм составляет 5–20 %, крупностью 1–7 мм – 9–33 %, крупностью менее 1 мм – 50–88 % от массы сухого вещества. Насыщен микроорганизмами (в том числе патогенными), содержит яйца гельминтов.

*Активный ил, задерживаемый вторичными отстойниками после аэротенков.* Представляет биоценоз микроорганизмов и простейших, обладает свойством флокуляции. Структура активного ила представляет хлопьевидную массу бурого цвета. В свежем виде активный ил почти не имеет запаха или пахнет землей, но, загнивая, издает специфический гнилостный запах. По фракционному составу активный ил состоит на 98 % по массе из частиц размерами меньше 1 мм. Активный ил аэротенков отличается высокой влажностью (99,2–99,7 %). Органическая часть (беззольность) составляет 70–75 %, минеральная (зольность) – 25–30 %.

**Химический состав осадков.** Основными компонентами беззольной части сырого осадка и ила являются белково-, жиро-, углеводоподобные вещества, составляющие 80–85 %. Остальные 15–20 % приходятся на долю лигниногумусового комплекса соединений. Количественные соотношения отдельных компонентов в осадке и иле различны. Если в беззольном веществе осадка преобладают жироподобные вещества и углеводы, то в активном иле значительную часть органического вещества составляют белки.

Осадки сточных вод содержат ценные вещества (азот 1,6–6 %, фосфор 0,6–5,2 %, калий 0,1–0,6 %) и могут быть использованы в качестве удобрения. Состав осадка и ила может меняться в значительных пределах и зависит от состава сточных вод, принятой схемы очистки и других факторов.

**Свойства осадков.** Осадки сточных вод – это суспензии, в которых дисперской фазой являются твердые частицы органического и минерального происхождения, а дисперсионной средой – вода с растворенными веществами. Свойства суспензии во многом зависят от содержания воды. Общее влагосодержание в осадках принято определять понятием «влажность». Общая влажность – это отношение массы воды к общей массе сырого осадка.

Осадки плохо отдают воду и относятся к категории труднофильтрующихся суспензий. В структуре осадка влага может находиться в форме свободной воды, сорбированной на твердых частицах, а также связанной химическими связями.

Свободная вода может быть удалена из осадка фильтрацией или отжимом, гравитационным уплотнением. Вакуум-фильтрацией, центрифугированием или фильтр-прессованием можно добиться удаления части связанной влаги. На способность осадков отдавать воду влияет ряд факторов: влажность, степень дисперсности частиц твердой фазы, структура осадка и его химический состав, соотношение в осадке свободной и связанной воды.

Обобщающим показателем, характеризующим способность осадков к водоотдаче (фильтруемость осадка), является удельное сопротивление фильтрации – сопротивление, оказываемое потоку фильтрата, равномерным слоем осадка, масса которого на единице площади фильтра равна единице. Удельное сопротивление сырого осадка первичных отстойников составляет  $(50–500) \cdot 10^{10}$  см/г. Чем выше удельное сопротивление, тем труднее отдает воду осадок.

Активный ил имеет значительно большее сопротивление фильтрации, чем сырой осадок. Удельное сопротивление фильтрации служит исходной величиной при выборе метода обезвоживания осадка. Для снижения удельного сопротивления фильтрации и интенсификации процесса отделения воды осадки перед обезвоживанием подвергают предварительной обработке. При этом, чем больше удельное сопротивление, тем более глубокая требуется предварительная обработка. К методам предварительной обработки осадка относятся: промывка водой, обработка химическими реагентами, замораживание с последующим оттаиванием и тепловая обработка.

## 9.2 Методы обработки осадка

Обработка осадков, выделяемых в процессах очистки сточных вод, проводится с целью получения конечного продукта, наносящего минимальный ущерб окружающей среде или пригодного для утилизации в производстве.

Стабилизация – разложение органической части осадков до простых соединений или продуктов, имеющих длительный период ассимиляции (усвоения) окружающей средой, обеспечивает устойчивость к загниванию. Применяется стабилизация биологическая, химическая, физическая и их комбинации. Наиболее распространена биологическая анаэробная и аэробная.

Предварительную обработку осадка для интенсифицирования процесса отделения воды проводят кондиционированием. Для снижения влажности и уменьшения объема осадка проводят обезвоживание. Методами обеззароживания уничтожают патогенных микроорганизмов. Термической обработкой снижают массу и объем осадка для получения сухого сыпучего продукта без патогенных микроорганизмов и яиц гельминтов. При невозможности утилизации осадка проводят складирование его и хранение (ликвидацию). При утилизации осадок используют в производстве.

### *Уплотнители и сгустители осадков.*

Осаждающийся во вторичных отстойниках активный ил имеет влажность 99,2–99,6 %. Основная часть этого ила поступает в аэротенк (рециркуляционный ил). Другая часть – избыточный активный ил – направляется на дальнейшую обработку для стабилизации (в метантенк или аэробный стабилизатор) и обезвоживания.

Осуществлять обработку больших количеств избыточного активного ила такой влажностью нерентабельно, поэтому его предварительно уплотняют. Для этого применяют уплотнители и сгустители различных типов:

- гравитационные (вертикальные, радиальные, горизонтальные);
- флотационные;
- механические и др.

*Гравитационное уплотнение* – наиболее распространенный прием уменьшения объема избыточного активного ила. Конструкции вертикаль-

ных и радиальных уплотнителей аналогичны конструкциям первичных отстойников.

*Данные для расчета гравитационных илоуплотнителей.*

**Вертикальные:**

- продолжительность уплотнения – 10–12 ч;
- влажность уплотненного ила – 98 %.

**Радиальные:**

- продолжительность уплотнения – 9–11 ч;
- влажность уплотненного ила – 97,3 %.

Наиболее эффективными являются радиальные илоуплотнители с илоскребами. Это объясняется:

- медленным перемешиванием активного ила в процессе уплотнения;
- меньшей высотой радиальных илоуплотнителей по сравнению с вертикальными;
- лучшим хлопьеобразованием и осаждением ила (так как при перемешивании снижаются вязкость активного ила и его электрокинетический потенциал).

**Недостатки гравитационного уплотнения:**

- высокое содержание взвешенных веществ в отделенной воде;
- высокая влажность уплотненных осадков;
- продолжительное уплотнение требует больших объемов уплотнителей.

*Флотационное уплотнение.*

**Достиныства:**

- предотвращается загнивание активного ила;
- сокращается продолжительность уплотнения (2–3 ч) и объемы сооружений;
- уплотнение более глубокое (94,5–95 %).

**Недостатки:**

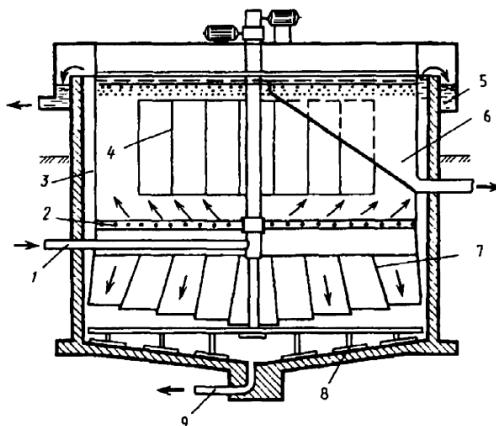
- более высокие по сравнению с гравитационным уплотнением эксплуатационные затраты;
- невозможность накопления большого количества ила в уплотнителе.

Конструкция уплотнителя – круглые в плане резервуары диаметром 6, 9, 12, 15, 18, 20, 24 м и глубиной 2–3 м, различающиеся внутренним оборудованием. Внутри корпуса (рисунок 9.1) в верхней части устраивается концентрическая, не достающая до дна перегородка, разделяющая его на флотационную и отстойную зоны.

Избыточный активный ил, предварительно насыщенный воздухом под давлением, подается в пространство между зонами флотации и отстаивания. Продолжительность пребывания активного ила во флотационной зоне составляет 0,2–0,33 ч.

Насыщенный пузырьками воздуха активный ил вслывает и удаляется в желоб подвижным скребком. Нижняя часть флотатора (зона осаждения)

используется для выделения крупных частиц, имеющих плотность более 1,0. Продолжительность пребывания ила в этой зоне 2–3 ч.



1 – подача иловой смеси; 2 – вращающийся дырчатый распределитель; 3 – периферийная перегородка; 4 – концентрические перегородки; 5 – кольцевой водоотводящий лоток; 6 – илосборный лоток; 7 – конические перегородки; 8 – скребковое устройство; 9 – отвод осадка, опорожнение уплотнителя

Рисунок 9.1 – Флотационный уплотнитель [81]

*Механические сгустители осадка* (как правило, ленточные и барабанные) используются, в основном, для сгущения смеси сырого осадка и активного ила или только активного ила перед подачей в метантенки или на обезвоживание.

Ленточные сгустители работают по принципу гравитационного обезвоживания. К исходной суспензии для улучшения процесса разделения фаз добавляют раствор флокулянта. Приготовление и разбавление раствора до рабочей концентрации производится автоматически. Насос дозирования через смеситель подаёт раствор непосредственно в трубопровод с осадком. Обработанная таким образом суспензия подаётся на верхнюю ленту сгустителя, равномерно распределяясь по всей ширине. Разделение фаз происходит под действием сил тяжести. Вода стекает сквозь перфорированную ленту, а твёрдая фаза остаётся на ленте. Для улучшения процесса разделения над лентой предусмотрены взрыхлители.

Сгущенный осадок сваливается на расположенную ниже ленту и ещё раз проходит через сгуститель. Специальный скребок очищает ленту, сбрасывая осадок во встроенный бункер, из которого осадок насосом подаётся на обезвоживание. Осветлённый фильтрат собирается в нижней части сгустителя и может быть использован в качестве промывной воды. Промывка ленты производится непрерывно после удаления с неё очередной порции осадка.

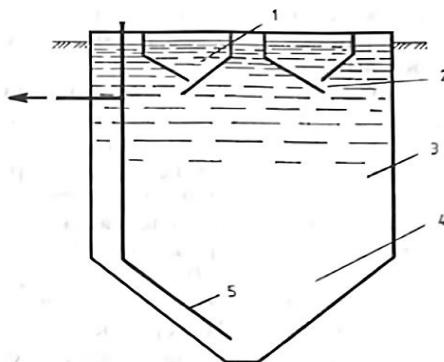
Фильтрат, отделившийся в результате флокуляции осадка, стекает через непрерывно вращающуюся горизонтальную сетку, а твёрдые вещества удерживаются. На сетке осадок постоянно перемешивается специальными «плужками». Для очистки сеток применяется собственный фильтрат, так что при постоянной работе свежей воды не требуется.

После обезвоживания на сгустителе влажность осадка может снижаться с 98–99 до 90–96 %, т. е. происходит сокращение объема осадка в 2–9 раз.

#### *Двухъярусные отстойники, их конструкции и расчет.*

Двухъярусные отстойники служат для осветления сточных вод, уплотнения и сбраживания выпавшего осадка. Они применяются на станциях пропускной способностью до 10 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Отстойники представляют резервуары цилиндрической прямоугольной в плане формы. В верхней части сооружений расположены проточные желоба (рисунок 9.2), в которых происходит осветление сточной воды, а в нижней части находится камера сбраживания выпавшего осадка.



1 – желоба для осветления сточных вод; 2 – щель; 3 – нейтральный слой;  
4 – септическая камера; 5 – трубопровод для удаления осадка

Рисунок 9.2 – Схема двухъярусного отстойника [81]

Осадочные желоба, по которым протекает сточная вода, выполняют функции горизонтального отстойника, в них происходит выпадение оседающих взвешенных веществ. Глубину осадочных желобов принимают 1,2–2,5 м.

Выпавший осадок сползает по наклонным стенкам нижней части желоба в щель и поступает в иловую камеру. Осадок, попавший в иловую камеру двухъярусного отстойника, под воздействием анаэробных микроорганизмов минерализуется в мезофильных условиях. Распад органических веществ при сбраживании осадка в двухъярусных отстойниках принимают равным 40 %. Продолжительность сбраживания составляет 30–210 сут (в среднем 60–120 дней). Влажность выгружаемого осадка в среднем – 90–92 %.

Сброженный ил удаляют из септической камеры снизу (как в вертикальных отстойниках) через иловую трубу диаметром 200 мм под гидростатическим напором 1,5–1,8 м.

### **9.3 Анаэробное метановое сбраживание**

Биохимический процесс стабилизации осуществляется в анаэробных условиях и представляет разложение органического вещества осадков в результате жизнедеятельности сложного комплекса микроорганизмов до конечных продуктов, в основном метана и диоксида углерода. Образуется биогаз, содержащий 60–70 % метана и 30–40 % диоксида углерода.

Анаэробное метановое сбраживание включает четыре взаимосвязанные стадии, осуществляемые разными группами бактерий.

1 Стадия ферментативного гидролиза. Происходит гидролиз нерастворенных сложных органических соединений с образованием более простых растворенных веществ (белки – до пептидов и аминокислот, жиры – до глицерина и жирных кислот, углеводы – до простых сахаров). Оптимальное значение pH для развития этой группы бактерий находится в интервале 6,5–7,5.

2 Стадия кислотообразования (кислотогенная) сопровождается выделением летучих жирных кислот (муравьиной, масляной, пропионовой и др.), спиртов, а также водорода и углекислого газа. Стадия кислотообразования осуществляется быстрорастущими, устойчивыми к неблагоприятным условиям среды гетерогенными бактериями. После этих фаз осадок практически не уменьшается в объеме, плохо сохнет и может загнивать.

3 Ацетатогенная стадия превращения ЛЖК, аминокислот и спиртов в уксусную кислоту осуществляется двумя группами ацетатогенных бактерий. Первая группа, образующая ацетаты с выделением водорода из продуктов предшествующих стадий, называется ацетатогенами, образующими водород. Вторая, также образующая ацетаты и использующая водород для восстановления диоксида углерода, называется ацетатогенами, использующими водород.

4 Метаногенная стадия осуществляется медленнорастущими бактериями, являющимися строгими анаэробами, чувствительными к изменениям условий среды, особенно к снижению pH менее 7,0–7,5 и температуры.

Разные группы метаногенов образуют метан двумя путями: расщеплением ацетата и восстановлением диоксида углерода. По первому пути образуется 72 % метана, по второму – 28 %. Сброженный осадок ( зрелый осадок) пропитан пузырьками газа, содержание органического вещества в сброшенном осадке уменьшается с 80 до 50 %.

Для нормально протекающего процесса метанового брожения характерны слабощелочная реакция среды ( $\text{pH} \leq 7,6$ ), высокая щелочность иловой воды (65–90 мг-экв/л) и низкое содержание жирных кислот (до 5–12 мг-экв/л).

Нарушение процесса может быть результатом перегрузки сооружения, изменения температурного режима, поступления с осадком токсичных веществ и т. д. Нарушение проявляется в накоплении жирных кислот, снижении щелочности иловой воды, падении рН. Резко уменьшается объем образующегося газа, увеличивается содержание в газе угольной кислоты и водорода – продуктов кислой фазы брожения.

*Эффективность процесса анаэробного сбраживания оценивается:*

- по степени распада органического вещества;
- количеству и составу образующегося биогаза.

На данные параметры влияют:

- химический состав осадка;
- температура сбраживания;
- доза загрузки метантенка;
- концентрация загружаемого осадка;
- режим загрузки и выгрузки осадка;
- система перемешивания осадка.

*Химический состав осадка.* Органическую часть (до 80 %) составляют жиры, белки и углеводы. Именно за счет их распада образуется все количество выделяющегося биогаза, в том числе 60–65 % за счет распада жиров, остальные 35–40 % приходятся поровну на долю углеводов и белков. Отсюда следует, что при сбраживании осадков первичных отстойников, содержащих больше жиров, образуется больше газа, чем при сбраживании активного ила, в котором больше белков. Имеется максимальный предел сбраживания и, следовательно, максимальный выход газа с единицы распавшегося вещества, которые существенно различны у жиров, белков и углеводов. Различен и состав выделяющегося газа. Диапазон температур, при котором возможно образование метана в анаэробных микробных процессах, довольно широк. В природе метан образуется при температурах от 0 до 97 °C. Различают три основные температурные зоны жизнедеятельности микроорганизмов: психрофильная – до 20 °C; мезофильная – от 20 до 40 °C; термофильная – от 50 до 70 °C.

Наибольшее практическое применение в обогреваемых метантенках получили два температурных режима: мезофильный (32–35 °C) и термофильный (52–55 °C).

Преимущества термофильного сбраживания:

- отличается большей интенсивностью распада органических веществ и заканчивается почти в 2 раза быстрее, за счет чего вдвое сокращается требуемый объем сооружений;
- обеспечивает глубокое обеззараживание осадков не только от поточной микрофлоры, но и от гельминтов (при термофильном сбраживании достигается полная дегельминтизация осадка, тогда как в условиях мезофильных температур погибает лишь 50–80 % яиц гельминтов).

**Недостатки термофильного сбраживания:**

- низкая водоотдающая способность сброшенного осадка, что требует его промывки при последующем механическом обезвоживании;
- подогрев осадка до термофильных температур, особенно в зимнее время, требует дополнительного расхода топлива, что влечет увеличение эксплуатационных затрат.

**Недостатки мезофильного режима сбраживания:**

- не обеспечивает обеззараживания осадка;
- требует больших объемов метантенков.

**Преимущества мезофильного режима сбраживания:**

- позволяет получить сброженный осадок, лучше поддающийся последующему обезвоживанию;
- обеспечение процесса теплом, получаемым от сжигания газов брожения.

Перемешивание содержимого метантенка необходимо проводить с целью обеспечения:

- эффективного использования всего объема метантенка;
- исключения образования мертвых зон;
- предотвращения расслоения осадка;
- предотвращения отложения песка и образования корки;
- выравнивания температурного поля.

*Режим загрузки и выгрузки.* Метантенки могут работать в периодическом, непрерывном и полунепрерывном режимах. При периодической загрузке наблюдается неравномерность выхода биогаза в период между загрузками. При непрерывной подаче предварительно подогретого сырого осадка, его хорошем смешении с массой бродящего осадка обеспечиваются:

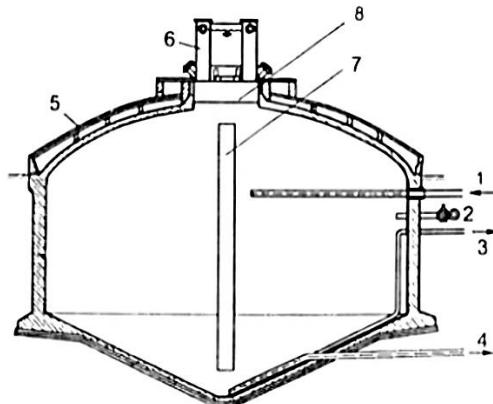
- равномерный тепловой режим сооружения;
- равномерное поступление питательных субстратов;
- возможность работы с повышенными дозами загрузки;
- возможность автоматизации и механизации процесса;
- равномерность газоудаления и однородность выгружаемого осадка.

Недостаток непрерывной подачи – присутствие в выгружаемом осадке хотя бы незначительной части несброшенного, следовательно, необеззараженного осадка.

*Конструкции метантенков.* Метантенки представляют собой герметичные вертикальные резервуары с коническим или плоским днищем, выполненные из железобетона или стали.

В настоящее время разработаны типовые проекты метантенков полезным объемом 500–4000 м<sup>3</sup> и диаметром 10–20 м. Для крупных очистных станций разработаны индивидуальные проекты метантенков с полезным объемом 6000–8000 м<sup>3</sup>.

Схема метантенка представлена на рисунке 9.3. Уровень осадка поддерживается в узкой горловине метантенка, что позволяет повысить интенсивность газовыделения на единицу поверхности бродящей массы и предотвратить образование плотной корки. При разработке конструкций метантенков значительное внимание уделяется теплоизоляции резервуаров и обеспечению газонепроницаемости купола.



1 – подача осадка; 2 – паровой инжектор; 3 – выпуск сброшенного осадка;  
4 – опорожнение метантенка; 5 – теплоизоляция; 6 – система сбора и отвода газа;  
7 – циркуляционная труба; 8 – уровень осадка

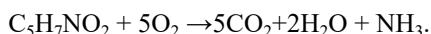
Рисунок 9.3 – Метантенк [81]

Основными конструктивными элементами метантенков, выполняющими определенные технологические функции, являются:

- система подачи осадков на сбраживание и выгрузки стабилизированного осадка;
- система подогрева;
- система перемешивания бродящей массы;
- система сбора и отвода выделяющегося газа.

#### **9.4 Аэробная стабилизация осадков**

Аэробная стабилизация осадков сточных вод – процесс окисления эндогенных (внутреннего происхождения) и экзогенных (внешнего происхождения) органических субстратов (химическое вещество, подвергающееся превращению под действием фермента) в аэробных условиях. В отличие от анаэробного сбраживания аэробная стабилизация протекает в одну стадию:



В результате реакции образуется углекислота, вода, аммонийный азот, который в последующем окисляется до  $\text{NO}_2$ .

Аэробной стабилизации может подвергаться неуплотненный и уплотненный избыточный активный ил и его смесь с осадком первичных отстойников.

Степень распада органического вещества и продолжительность процесса зависят:

- от соотношения количеств сырого осадка и активного ила;
- концентрации органических веществ;
- интенсивности аэрации;
- температуры и пр.

Процесс аэробной стабилизации обычно происходит в психрофильно-мезофильной зоне жизнедеятельности микроорганизмов при температуре от 10 до 42 °С и затухает при температуре менее 8 °С. Степень распада органических веществ изменяется в среднем от 10 до 50 %. В процессе аэробной стабилизации при мезофильных температурах наблюдается снижение содержания кишечной палочки и других патогенных бактерий и вирусов на 70–90 %, однако при этом яйца гельминтов не погибают.

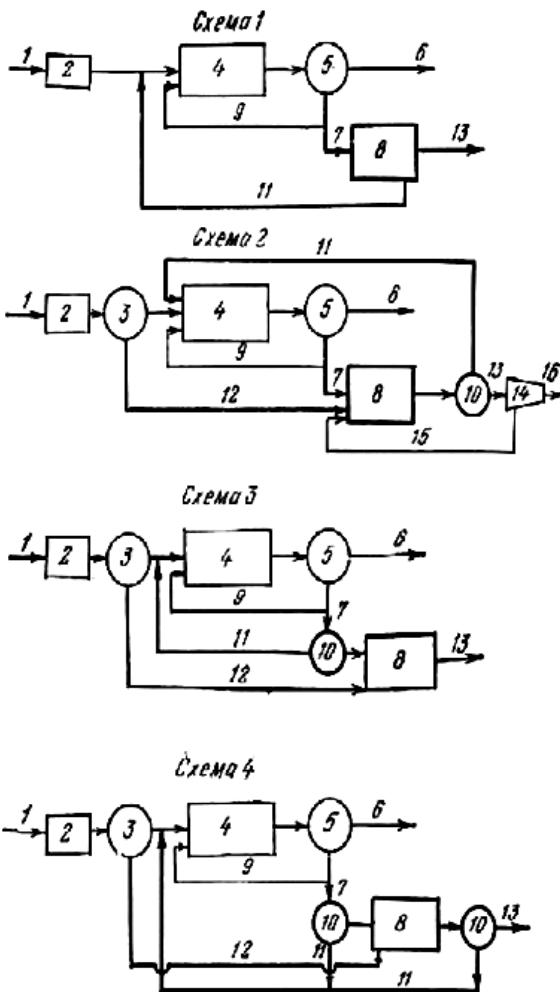
Продолжительность процесса – 2–5 сут для неуплотненного ила, 6–7 сут для смеси неуплотненного ила и осадка из первичных отстойников и 8–12 сут для смеси уплотненного ила и осадка. Удельный расход воздуха следует принимать 1–2  $\text{м}^3/\text{ч}$  на 1  $\text{м}^3$ , объем стабилизатора при интенсивности аэрации не менее 6  $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ .

Технологические схемы аэробной стабилизации представлены на рисунке 9.4. Аэробная стабилизация осадков обеспечивает получение биологически стабильных продуктов, хорошие показатели влагоотдачи, простоту эксплуатации и низкие строительные стоимости сооружений. Однако значительные энергетические затраты на аэрацию ограничивают целесообразность использования этого процесса на очистных сооружениях производительностью более 50–100 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ .

#### *Аэробные стабилизаторы.*

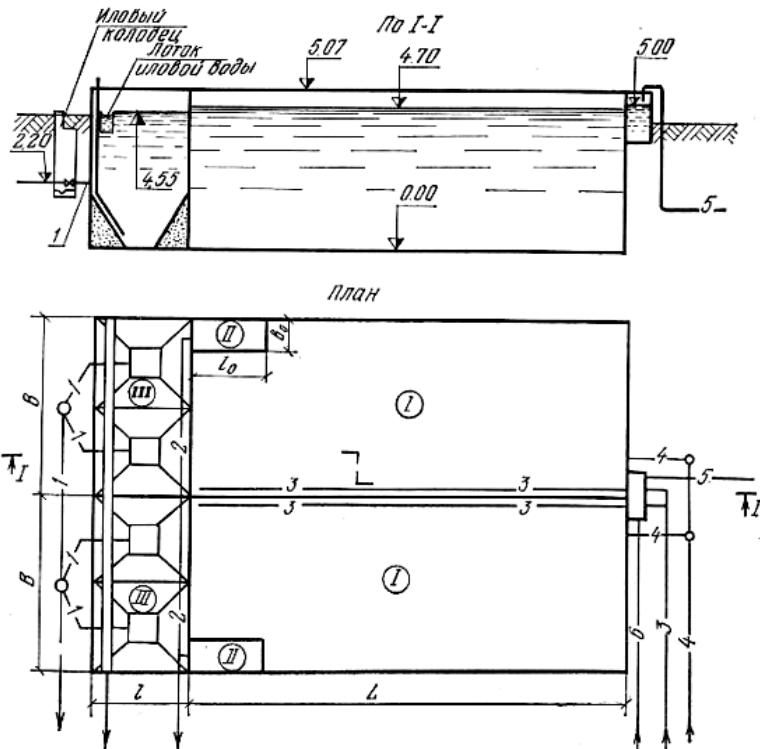
Аэробная стабилизация осадков проводится обычно в сооружениях типа аэротенков глубиной 3–5 м (рисунок 9.5).

Отстаивание и уплотнение аэробно стабилизированного осадка следует производить в течение 1,5–5 ч в отдельно стоящих илоуплотнителях или в специально выделенной зоне внутри стабилизатора. Влажность уплотненного осадка составляет 96,5–98,5 %. Иловая вода должна направляться в аэротенки. Расчет аэробных стабилизаторов заключается в определении необходимого их объема в зависимости от количества поступающего в них сырого осадка и избыточного активного ила, а также в определении необходимого расхода воздуха.



1 – поступающая сточная вода; 2 – решетка и песколовка; 3 – первичный отстойник;  
 4 – аэротенк; 5 – вторичный отстойник; 6 – очищенная сточная вода; 7 – избыточный активный  
 ил; 8 – аэробный стабилизатор; 9 – циркулирующий активный ил;  
 10 – илоуплотнитель; 11 – иловая вода; 12 – сырой осадок первичных отстойников;  
 13 – стабилизированный осадок; 14 – центрифуга; 15 – фугат; 16 – обезвоженный осадок

Рисунок 9.4 – Технологические схемы аэробной стабилизации



I – зона аэрации; II – отстойная зона; III – осадкоуплотнитель;  
 1 – стабилизированный осадок; 2 – выпуск отстойной воды; 3 – воздуховод;  
 4 – опорожнение; 5 – иловая смесь; 6 – фугат из цеха мехобезвоживания

Рисунок 9.5 – Схема аэробного стабилизатора, совмещенного с уплотнителем

## 9.5 Иловые площадки

Наиболее простым и распространенным способом обезвоживания осадков является сушка на иловых площадках. Иловые площадки допускается применять для обезвоживания осадка при производительности очистных сооружений до  $25\ 000\ м^3/сут$ . При большей производительности следует предусматривать сооружения по механическому обезвоживанию осадка, а также дополнительно, при необходимости, аварийные иловые площадки.

Иловые площадки проектируются:

- на естественном основании (с дренажем или без дренажа);
- на искусственном асфальтобетонном основании с дренажем;

- каскадные с отстаиванием и поверхностным удалением иловой воды;
- площадки-уплотнители.

Иловые площадки на естественном основании без дренажа применяют в следующих случаях:

- при хорошо фильтрующихся грунтах (песок, супесь, легкий суглинок);
- уровень грунтовых вод находится на глубине не менее 1,5 м от поверхности карты;
- просачивающиеся дренажные воды можно выпускать в грунт по санитарным условиям.

Иловые площадки на естественном основании без дренажа представляют спланированные участки земли (карты), окруженные со всех сторон земляными валиками.

Осадок влажностью от 90 % (из двухъярусных отстойников) до 99,5 % (несброженный активный ил) периодически наливается небольшим слоем на участки и подсушивается до влажности 75–80 %.

Осадок распределяется по картам с помощью труб или деревянных лотков, укладывающихся по большей части в теле разделительного валика с уклоном 0,01–0,03 и снабжаемых выпусками. Влага из осадка частично просачивается в грунт, но большая часть ее удаляется за счет испарения. Объем осадка при этом уменьшается.

Иловые площадки на естественном основании с дренажом (дырчатые трубы, уложенные в канавы, заполненные щебнем и гравием) применяют при плотном слабопроницаемом грунте. Расстояние между дренажными канавами рекомендуется принимать равным 6–8 м, начальную глубину канавы – 0,6 м с уклоном 0,003. Площадь иловых площадок,  $\text{м}^2$ , определяется по формуле

$$F_{\text{ил}} = \frac{V_{\text{общ}} T}{K}, \quad (9.1)$$

где  $V_{\text{общ}}$  – расход осадка,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;  $T$  – продолжительность подсушивания, сут (принимается 60 сут);  $K$  – нагрузка осадка на иловые площадки,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

Число карт принимается не менее 4. Ширина отдельных карт – не более 10 м на малых станциях, на средних и больших станциях – до 35–40 м. Толщина слоя осадка летом – 0,25–0,3 м и зимой – 0,5 м. Высоту оградительных валиков принимают на 0,3 м выше рабочего уровня.

По приведенной формуле (9.1) определяют рабочую (полезную) площадь иловых площадок. Дополнительная площадь, занимаемая валиками, дорогами, канавками и т. п., учитывается коэффициентом, значения которого колеблются от 1,2 (для больших станций) до 1,4 (для малых станций).

## 9.6 Механическое обезвоживание осадков сточных вод

Вакуум-фильтрование основано на удалении воды из слоя осадка, расположенного на мелкоячеистой сетке (ткани) под действием вакуума, создаваемого на противоположной стороне этой сетки. Влажность обезвоженного осадка составляет 72–87 % при исходной влажности 93–97,5 %.

К данному типу обезвоживающего оборудования относятся барабанные вакуум-фильтры (рисунок 9.6), представляющие вращающийся горизонтально расположенный барабан, погруженный в корыто с осадком на 1/3 диаметра. Имеет две боковые стенки: внутреннюю сплошную и наружную перфорированную, обтянутую фильтровальной тканью. Пространство между стенками разделено на 16–32 секции, не сообщающиеся между собой. Барабан вращается на валу, совершая один оборот за 4–7 мин. На конце вала установлена распределительная головка фильтра, соединенная с вакуум-насосом и линией сжатого воздуха.

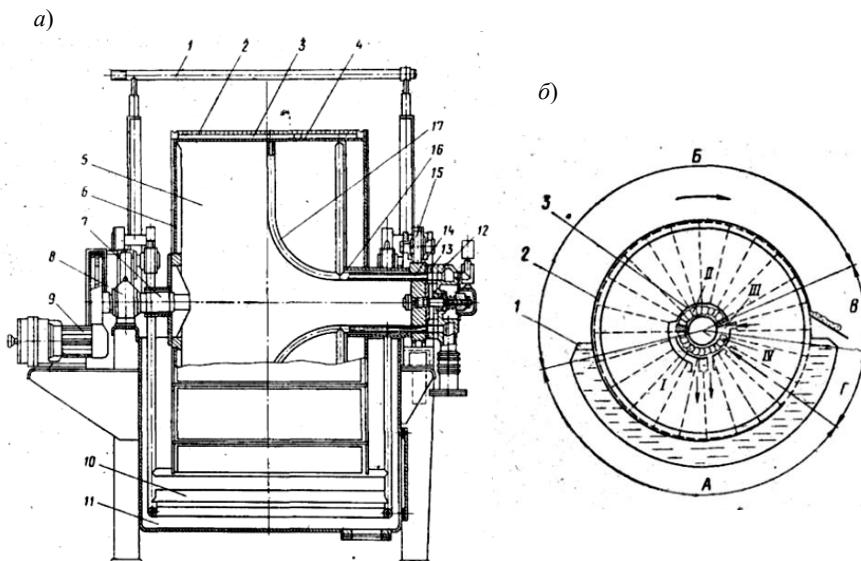


Рисунок 9.6 – Вакуум-фильтр барабанный (а) и схема его работы (б)

Типичный вакуум-фильтр барабанный (см. рисунок 9.6) состоит из барабана 5 с фильтрующими ячейками 3, ванны 11 с маятниковой мешалкой 10, распределительной головки 12, механизма съема осадка (скребка), промывного устройства 1 и приводов барабана и мешалки от электродвигателя 9. Барабан закрыт с торцов плоскими крышками 6. Барабан

состоит из двух соединенных соосных цилиндров: внутреннего сплошного 4 и наружного перфорированного 2, покрытого снаружи фильтрующей тканью или металлической сеткой. Кольцевой зазор между цилиндрами разделен продольными перегородками на фильтрующие ячейки 3. С торцов укреплены сваркой плоские крышки и фланцевые цапфы 7 и 16, с помощью которых барабан установлен слева в подшипнике скольжения 8, а справа – в роликовой опоре, состоящей из двух нижних и одного верхнего роликов 15. Каждая ячейка сообщается трубкой 17 с выводными трубками 14, расположеннымными по окружности плоскости торца цапфы 16, к которой прикреплена ячейковая шайба 19. К шайбе плотно прижимается распределительная головка 12, имеющая в торце овальные отверстия.

При вращении барабана секции последовательно сообщаются с камерами I–IV распределительной головки (см. рисунок 9.6, б), т. е. с линией вакуума или линией сжатого воздуха, проходя зоны вакуума А, осаждения Б, съема осадка В и регенерации ткани Г. Барабан 2 частично погружен в ванну 1, куда поступает суспензия. Во избежание образования осадка суспензия перемешивается маятниковой мешалкой. При вращении барабана его секции последовательно сообщаются с камерами I–IV распределительной головки. Камера I распределительной головки 3 сообщается с вакуумной линией, поэтому происходит отсос фильтрата из тех секций, которые погружены в суспензию. На погруженной в суспензию поверхности барабана образуется слой твердой фазы. При повороте барабана до совмещения с камерой II головки происходит промывка и просушка осадка за счет отсоса промывного фильтрата с помощью вакуума. В зоне съема осадка через камеру III головки поступает сжатый воздух, способствующий отделению от ткани слоя осадка, который по ножу сползает в корыто (бункер). За счёт додачи сжатого воздуха или пара в камеру IV головки осуществляется регенерация ткани. После этого цикл операций повторяется, процесс фильтрации протекает непрерывно.

#### Недостатки вакуум-фильтрации:

- необходимость использования больших объемов ручного труда;
- потребность в большом объеме вспомогательного оборудования;
- значительные производственные площади;
- высокая энергоемкость;
- повышенные расходы минеральных реагентов.

*Обезвоживание осадков на центрифугах.* Для обезвоживания осадков применяют горизонтальные осадительные центрифуги со шнековым устройством для выгрузки осадка типа НОГШ (рисунок 9.7).

Обезвоживание ила происходит за счет вращения барабана и вала, которые врачаются с разной скоростью. За счет центробежных сил более тяжелая фракция концентрируется на периферии (у стенок барабана) и образует там слой осадка. При этом центробежная сила примерно в 3000 раз (зависит

от модели) превосходит гравитационное поле, поэтому выделение осадка (разделение фракций) происходит очень быстро. Шнек внутри барабана непрерывно транспортирует образующийся осадок в зону выгрузки (коническая зона). Шнек и барабан вращаются в одну сторону, но с разной скоростью. Очищенная вода (с минимальным количеством загрязнений) создает внутренний слой, который перетекает в зону отвода воды. В конической зоне (угол наклона  $8,5^{\circ}$ ) происходит осушение осадка. Благодаря удлиненной конструкции шлам выходит более сухим.

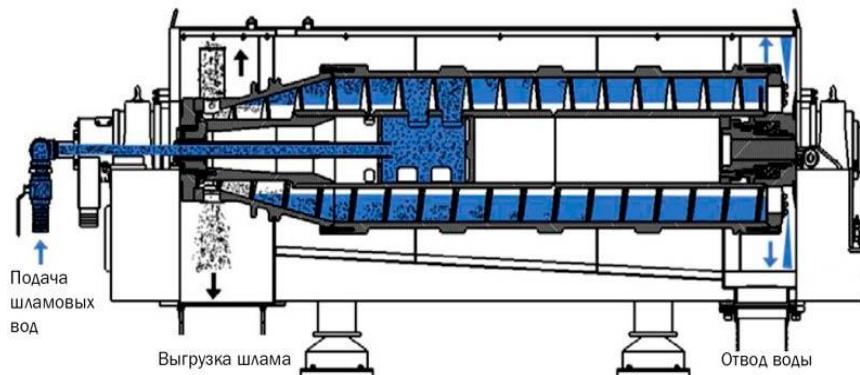


Рисунок 9.7 – Схема устройства центрифуги НОГШ

Центрифуга предназначена для обезвоживания экологически чистого осадка сточных вод, а также механической доочистки оборотной воды для промывки песка и руды. Особенно эффективно декантерные установки применяют для обезвоживания осадка на станциях биологической очистки и установках для очистки промышленных сточных вод пищевых производств, так как замкнутая конструкция декантера не дает запаху распространяться. При осушении осадка в декантерной центрифуге можно использовать дозирование флокулянтов и коагулянтов.

Преимущества горизонтальных центрифуг-декантеров состоит в следующем:

- 1 Низкая влажность выходного шлама (~75 %), что снижает его объем и сокращает затраты на утилизацию твердых отходов.
- 2 Автоматизация работы (самодостаточная система, практически не требует присутствия оператора при правильном подборе и настройке оборудования).
- 3 Гибкая система контроля и управления режимом работы центрифуги.
- 4 Автоматическая выгрузка шлама.

5 Компактность – самая маленькая занимаемая площадь по сравнению со всеми другими методами осушения осадка (самая высокая производительность на единицу площади = низкие затраты на строительство здания для очистных сооружений).

6 Закрытая система, что обеспечивает «чистое» обслуживание и минимальные затраты на уборку цеха.

7 Очень низкое количество выделяемых запахов, что снижает требования к вентиляции и расходы на ее организацию.

8 Высокая надежность оборудования.

9 Небольшой объем воды для промывки.

10 Низкий расход флокулянта – 0,2–0,3 % (зависит от стока и подбора реагентов).

11 Низкое содержание примесей в отводимой воде с осадительной центрифуги.

Эффективность задержания твердой фазы осадков и влажность кека зависят от характера обезвоживаемого осадка. Эффективность задержания сухого вещества – 10–65 %, влажность кека – 65–85 %.

При центрифугировании в качестве реагентов для улучшения водоотдающих свойств осадков сточных вод следует использовать флокулянты. Для предварительных расчетов дозу флокулянтов следует принимать от 4 до 15 кг на 1 т сухого вещества осадка.

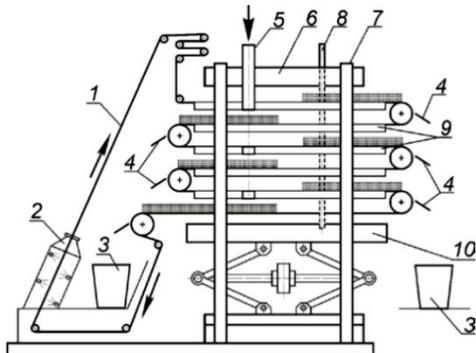
#### *Обезвоживание осадков на фильтр-прессах.*

Движущей силой процесса фильтрации является напор подаваемой в аппарат суспензии. Суспензия под давлением поступает внутрь пакета плотно сжатых фильтровальных плит (рам). Плиты обтягиваются фильтровальной тканью. Частицы твердой фазы задерживаются на поверхности фильтровального полотна, а жидкая фаза свободно проникает через мелкие поры фильтроткани и далее через систему каналов выводится из фильтра.

Фильтр-прессы по принципу действия различают периодического и непрерывного действия. К первому типу относятся раздвижные рамные (камерные) фильтр-прессы, ко второму – ленточные.

Основные конструктивные элементы камерных фильтр-прессов (рисунок 9.8): плиты, оборудованные фильтрующей перегородкой, с протянутой между ними фильтровальной лентой; механизм зажима и раскрытия плит; устройство для выгрузки обезвоженного осадка; коммуникации и арматура для подвода осадка, сжатого воздуха и отвода фильтрата.

Перед обезвоживанием осадка на камерных фильтр-прессах предусмотрена обработка осадка химическими реагентами – 10%-м раствором  $\text{FeCl}_3$  и известковым молоком. Обезвоживание осадка на фильтр-прессах позволяет получить кек влажностью 55–75 %.



1 – фильтровальная лента; 2 – камера регенерации фильтровальной ткани; 3 – бункер;  
4 – ножки для съема осадка; 5 – подающий коллектор; 6 – верхняя опорная плита;  
7 – направляющие; 8 – коллектор для подачи воды на диафрагму;  
9 – средние фильтровальные плиты; 10 – нижняя нажимная плита

Рисунок 9.8 – Фильтр-пресс типа ФПАКМ

## 9.7 Термическая сушка обезвоженного осадка

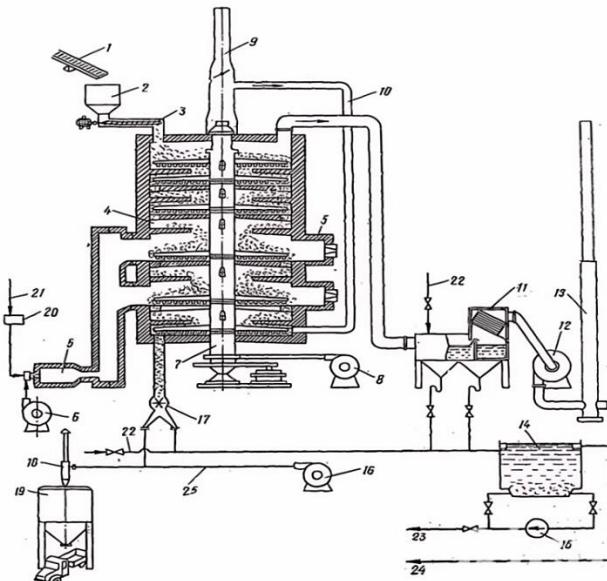
Термическая обработка позволяет в несколько раз снизить массу и объем осадка, получить сухой сыпучий продукт, полностью освобожденный от патогенных микроорганизмов и яиц гельминтов. Осадки после термической обработки можно использовать как органо-минеральное удобрение, в качестве кормовой добавки, как присадочный материал, а также в качестве твердого топлива.

Для сушки обезвоженных осадков городских очистных сооружений наибольшее распространение получили барабанные сушилки с прямоточным движением осадка и топочных газов. В качестве теплоносителя или сушильного агента чаще всего используются топочные газы с температурой от 500 до 800 °C. Сушильный агрегат состоит из топки, сушильной камеры (барабана) и вентиляционного устройства. Осадок поступает в барабан через загрузочную камеру и удаляется из него через выгрузочную камеру.

### *Сжигание осадков.*

В тех случаях, когда утилизация осадка невозможна или нецелесообразна, рекомендуется его сжигание. При сжигании полностью уничтожается органическая часть осадков, объем сокращается в 80–100 раз. Для сжигания осадков применяют многоподовые печи. Принципиальная схема многоподовой печи приведена на рисунке 9.9.

Корпус печи выполнен в виде стального цилиндра диаметром 1–7 м, внутренняя поверхность которого футерована огнеупорным материалом. Печь имеет от 4 до 11 горизонтальных огнеупорных подов, расположенных один под другим.



- 1 – конвейер ленточный; 2 – бункер загрузки осадка; 3 – шнековый питатель;  
 4 – многоподовая печь; 5 – наружная топка; 6 – дутьевой вентилятор; 7 – вал;  
 8 – вентилятор охлаждения; 9 – атмосферная труба; 10 – рециркуляционный трубопровод;  
 11 – мокрый пылеуловитель; 12 – дымосос; 13 – дымовая труба; 14 – сборник золы; 15 – насос  
 перекачки золовой воды; 16 – вентилятор пневмотранспорта; 17 – шлюзовой питатель;  
 18 – циклонный разгрузитель; 19 – бункер выгрузки золы; 20 – газорегуляторная установка;  
 21 – трубопровод топливного газа; 22 – водопровод; 23 – золопровод;  
 24 – канализационный трубопровод; 25 – воздуховод

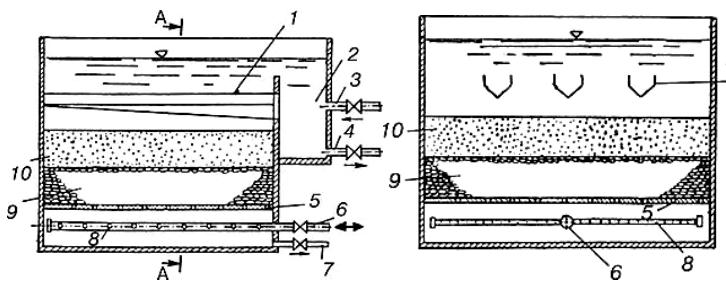
Рисунок 9.9 – Схема многоподовой печи

На верхних подах происходит сушка осадка, в результате которой влажность его с 70–80 % снижается до 40–50 %. В средней зоне печи при подаче избыточного (до 50 %) объема воздуха, а при необходимости и топлива происходит сгорание осадка. Температура в этой зоне достигает 770–925 °C. Воздух нагнетается воздуховкой через вал, благодаря чему последний предохраняется от перегрева. На нижних подах образовавшаяся при сгорании осадка зола охлаждается и через выгрузочное отверстие выпускается в зольный бункер. Отработанный газ с температурой 370–425 °C после очистки в мокрых скрубберах выбрасывается в атмосферу. Многоподовые печи надежны в эксплуатации и просты по конструкции. К числу их недостатков следует отнести высокую строительную стоимость и большие габариты.

## 10 ФИЛЬТРЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ ПИТЬЕВОЙ И СТОЧНОЙ ВОДЫ

### 10.1 Скорые напорные и безнапорные фильтры

**С**корые безнапорные (самотечные) фильтры предназначены для осветления воды после реагентной обработки или без нее. Они представляют прямоугольные в плане железобетонные резервуары площадью 4–140 м<sup>2</sup>, загруженные фильтрующими слоями зернистого материала в один или два слоя с поддерживающими слоями гравия, под которыми размещена дренажная система для сбора отфильтрованной и равномерного распределения промывной воды (рисунок 10.1). Высота слоя загрузки 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 фильтруется сверху вниз, промывка осуществляется подачей воды снизу вверх. Для сбора промывной воды служат специальные желоба, расположенные над слоем фильтрующей загрузки.



- 1 – наклонные желоба; 2 – распределительный карман; 3 – трубопровод подачи исходной воды;  
4 – трубопровод отвода промывной воды; 5 – дырчатое днище;  
6 – трубопровод отвода осветленной воды и подачи промывной воды;  
7 – трубопровод опорожнения фильтра (во время ремонта); 8 – перфорация;  
9 – гравийный (поддерживающий) слой; 10 – фильтрующая песчаная загрузка

Рисунок 10.1 – Скорый песчаный фильтр

Однослойные фильтры загружают кварцевым песком с диаметром зерен 0,5–2,0 мм, двухслойные – однородным материалом с разной крупностью частиц или разнородными материалами. Многослойные фильтры имеют в

2–3 раза большую грязеемкость по сравнению с однослойными. Это позволяет или увеличить скорость фильтрования, или удлинить фильтроцикл.

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

**Скорые напорные фильтры** представляют закрытые вертикальные (рисунок 10.2) или горизонтальные резервуары со сферическими днищами, рассчитанные на рабочее давление до 0,6 МПа.



Рисунок 10.2 – Напорные засыпные фильтры для очистки воды, разработанные в НПЦ по материаловедению НАН Беларусь

Они используются для осветления воды после обработки ее коагулянтами без предварительного отстаивания. Производительность одного вертикального фильтра составляет  $50\text{--}90 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Такие фильтры выпускаются диаметрами 1,0–3,4 м, высота слоя загрузки в них 0,5–1,0 м. 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.

Важным элементом напорных и безнапорных фильтров являются дренажно-распределительные системы. Они применяются в скорых безнапорных фильтрах на станциях водоподготовки и сооружениях доочистки сточных вод, в напорных фильтрах на станциях водоподготовки и сооружениях умягчения воды.

Дренажно-распределительная система (рисунок 10.3) предназначена для распределения потока воды и ее сбора, происходящих в процессе очистки, а также предотвращения уноса фильтрующего материала из аппарата (при прямой промывке). На 70–75 % по высоте фильтр засыпан поддерживающим и фильтрующим материалами. Нижний щелевой коллектор, как правило, закрыт на всю свою высоту поддерживающим слоем (слоем отмытого гравия с размерами 2–5 мм). Далее насыпается слой фильтрующего материала, свойства которого зависят от назначения фильтра в системе очистки воды.

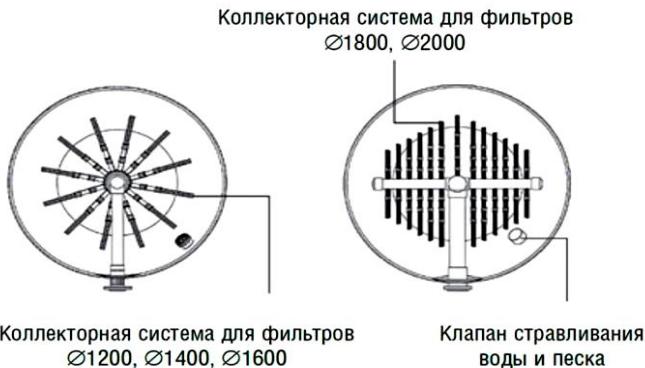


Рисунок 10.3 – Примеры конструкций дренажно-распределительных систем скорых напорных засыпных фильтров

Собственно пористые дренажные элементы могут быть выполнены из разных материалов: коррозионно-стойкой стали (рисунок 10.4), полимеров (рисунок 10.5).

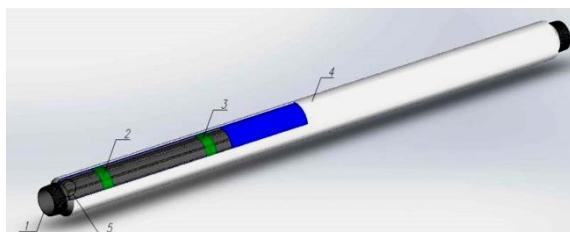


Рисунок 10.4 – Дренажно-распределительные системы из гофрированной ленты коррозионно-стойкой стали



Рисунок 10.5 – Ложное дно и щелевые полимерные колпачки

Для безнапорных засыпных скорых фильтров распространены пористые трубчатые конструкции дренажно-распределительных систем. В качестве несущего каркаса используется перфорированная полимерная труба, благодаря чему дренаж имеет прочную и жёсткую конструкцию. Фильтрующий слой выполнен в виде пористого слоя полимерных волокон (рисунок 10.6). Количество и диаметр элементов дренажной системы, пористость фильтрующего слоя определяются для каждого засыпного фильтра индивидуально. Монтаж системы производится легко и не требует особых усилий.



1 – профилированная каркасная труба; 2 – водораспределительные отверстия; 3 – защитная сетка из коррозионно-стойкой стали (над створм отверстий); 4 – пористое фильтрующее покрытие; 5 – продольные каналы сбора – распределения воды

Рисунок 10.6 – Конструкция дренажного элемента АФТ АПМ-ДФ

Основные параметры и размеры дренажных элементов АФТ АПМ-ДФ приведены в таблице 10.1.

**Таблица 10.1 – Основные параметры дренажных элементов АФТ АПМ-ДФ**

| Параметр   | АФТ<br>АПМ<br>ДФ-65                    | АФТ<br>АПМ<br>ДФ-90 | АФТ<br>АПМ<br>ДФ-100 | АФТ<br>АПМ<br>ДФ-115 | АФТ<br>АПМ<br>ДФ-135 |
|--|--|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Длина элемента АФТ АПМ-ДФ, мм  | До 3100                                |                     |                      |                      |                      |
| Длина дренажного луча, мм  | Определяется размерами постели фильтра |                     |                      |                      |                      |
| Наружный диаметр диспергирующего слоя, мм                                      | 112±2                                  | 130±4               | 146±4                | 160±4                | 180±4                |
| Внутренний диаметр каркасной трубы, мм   | 65±2                                   | 90±2                | 100±2                | 115±2                | 135±2                |
| Рабочее давление, атм.   | 0,5–5,0                                |                     |                      |                      |                      |
| Рабочая температура, °С  | До 60                                  |                     |                      |                      |                      |
| Потери напора при промывке, м вод. ст.   | 1,0–5,0                                |                     |                      |                      |                      |
| Толщина стенки каркасной трубы (по ребрам), мм                                 | 12                                     | 14                  | 16                   | 18                   | 20                   |
| Количество продольных каналов каркасной трубы, шт.                             | 12                                     | 12                  | 14                   | 16                   | 18                   |
| Максимальная нагрузка по фильтрату, м <sup>3</sup> /ч на 1 м дренажной системы | <9                                     | <20                 | <25                  | <32                  | <45                  |
| Удельная нагрузка по промывной воде, м <sup>3</sup> /ч на луч                  | <28                                    | <45                 | 45–55                | 55–75                | 75–105               |
| Удельная фильтрующая поверхность фильтра дренажного м <sup>2</sup> /м. п.      | 0,35                                   | 0,41                | 0,46                 | 0,5                  | 0,57                 |
| Неравномерность распределения воды по длине луча, %                            | До 5 %                                 |                     |                      |                      |                      |
| Диаметр пор пористого слоя, мм   | 0,1–0,2                                |                     |                      |                      |                      |

## 10.2 Фильтры со сменными картриджами

Альтернативой, а в ряде случаев – дополнением засыпных фильтров являются патронные напорные фильтры. Они представляют герметичный стальной, полимерный или композитный корпус, в котором размещён пакет трубчатых или ламельных фильтроэлементов (ФЭ), через которые осуществляется очистка воды (рисунок 10.7).

По сравнению с засыпными фильтрами патронные имеют ряд преимуществ, в первую очередь – меньшая занимаемая площадь при сопоставимой производительности. Гибкость характеристик при использовании унифицированных корпусов: за счёт количества ФЭ можно обеспечить требуемую производительность, а за счёт выбора пористого материала – требуемую тонкость очистки и ресурс. Еще одно достоинство патронных фильтров по сравнению с безнапорными засыпными – скорость монтажа и строительства: привезти и установить фильтры заводской готовности на фундаменты можно значительно быстрее, чем рытье котлованов, бетонирование и засыпка традиционного сооружения.



1 – вход воды; 2 – выход очищенной воды; 3 – устройство подъёма и отвода крышки;  
4 – окно для наблюдения; 5 – трубная доска; 6 – фильтрующие патроны;  
7 – ёмкость для очищенной воды; 8 – сборник шлама

Рисунок 10.7 – Типовая конструкция патронного фильтра

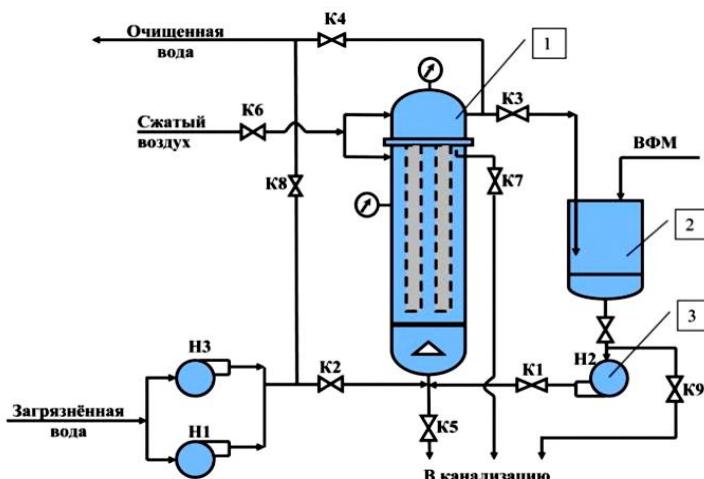
В зависимости от характеристик пористых материалов ФЭ патронный фильтр может быть использован в трёх вариантах: альтернатива традиционному засыпному; предварительный фильтр перед засыпным для увеличения его ресурса в случае использования в нем щелевых ФЭ либо из крупной сетки в 1–3 слоя; финишный фильтр тонкой очистки после засыпного для предотвращения уноса мелких частиц дисперсной засыпки в систему либо на следующие за засыпным фильтром очистные сооружения при использовании глубинных патронных ФЭ из спечённого металлического порошка, керамики, многослойной сетки либо полимера. На рисунке 10.8 представлена широкая номенклатура трубчатых ФЭ из разных пористых материалов для патронных фильтров. Подробнее вопросы применения пористых материалов в процессах и аппаратах очистки воды рассмотрены в разделе 12.

Еще одной современной альтернативой традиционным засыпным фильтрам являются намывные фильтры. Это фильтры, в которых на сменный ФЭ в специальном режиме (рисунок 10.9) наносят дисперсный или волокнистый фильтрующий материал: перлит, кизельгур, целлюлозу, ионообменный порошок, минеральное или синтетическое волокно и т. п. В намывном патронном фильтре слой фильтрационного материала отличается рыхлой развитой структурой с системой разветвленных фильтровальных каналов, у которых размер намного больше, чем у каналов засыпного фильтра и ФЭ-носителя. Удержание частиц примесей в воде, которые проходят через каналы, происходит, в основном, в порах намытого материала или в основном ФЭ. Использование намывного слоя не приводит к резкому увеличению

гидравлического сопротивления фильтра. Промышленные намывные патронные фильтры тонкой очистки воды используют в технологических схемах водоподготовки различных производств топливно-энергетического комплекса (на металлургических, машиностроительных, химических предприятиях, котельных, ТЭЦ и АЭС). Такие фильтры надежно защищают всю запорную арматуру от взвешенных частиц размером более 0,5 мкм.



Рисунок 10.8 – ФЭ из спечённых порошков металлов и металлических сеток (а), из полимеров (б)



1 – намывной патронный фильтр; 2 – бак для приготовления суспензии, намываемой на ФЭ-основу; 3 – насос для намыва

Рисунок 10.9 – Принципиальная схема использования намывных патронных фильтров

Перед началом работы в течение 3–5 минут на ФЭ-основу намывают фильтрующий слой, который удерживается за счет градиента давлений снаружи и внутри ФЭ [55]. Намывные фильтры успешно используются для очистки маломутных (до 40 мг/л) и малоцветных (до 30 градусов) вод. При этом содержание органических веществ снижается не менее чем в 2 раза.

Еще один вид фильтра в технологии водоподготовки – обсадной фильтр – фильтр, размещаемый на обсадной трубе при получении воды из подземных источников. Он представляет несколько слоев металлической (рисунок 10.10, а) или полимерной (рисунок 10.10, б) сетки, намотанной на перфорированный нижний конец обсадной трубы и закрепленной на нем проволокой.

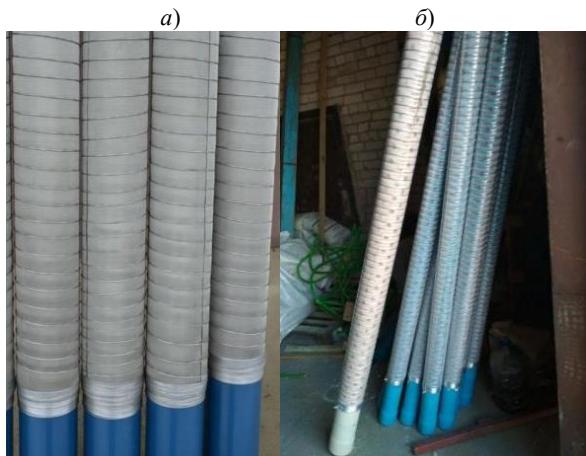


Рисунок 10.10 – Обсадной фильтр из стальной (а) и полимерной (б) сетки

Иногда обсадной фильтр выполнен в виде щелевого из спирально навитой с зазором круглой или профилированной проволоки. Назначение обсадного фильтра – обеспечить свободный доступ воды в скважину, но при этом надежно защищать ее от пескования и обрушений водосодержащих пород.

## 11 АЭРИРУЕМЫЕ ОЧИСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

---

### 11.1 Конструкции современных аэрируемых сооружений для очистки сточной и питьевой воды

Промышленные и бытовые сточные воды содержат частицы растворимых и нерастворимых веществ, которые образуют с водой дисперсные системы трех типов [66]:

- грубодисперсные системы с частицами, размеры которых превышают 0,1 мкм (сусpenзии и эмульсии);
- коллоидные системы с частицами, размеры которых находятся в пределах 0,001–0,1 мкм;
- истинные растворы, размеры частиц которых соответствуют размерам отдельных молекул или ионов (в том числе растворенные газы, органические вещества, неорганические соли, кислоты и основания).

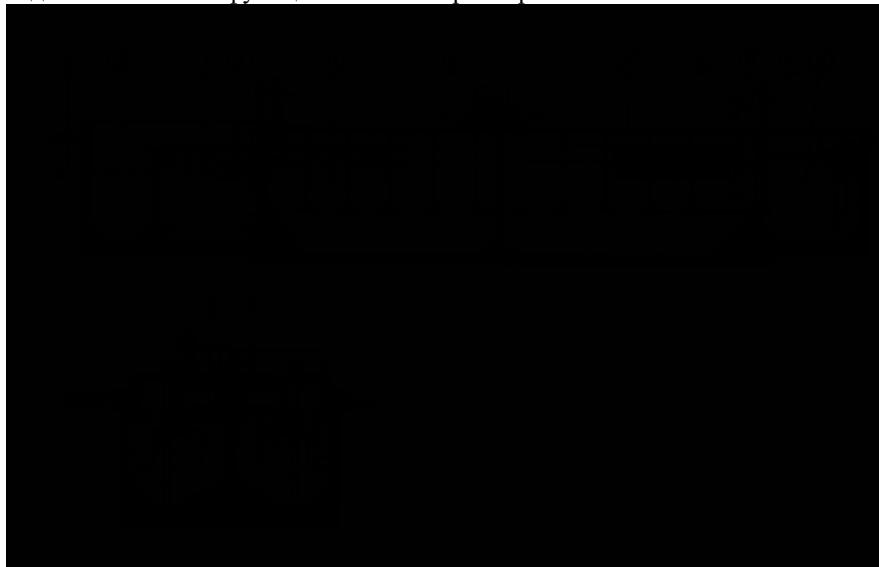
Для обеспечения нормальной работы систем очистки сточных вод необходимо удалить 60–80 % грубодисперсных частиц [66]. Для этой цели используют, как правило, следующую технологическую схему.

В начале очистных сооружений располагают решетки с прозорами шириной 16–19 мм, снабженные скребками, выполненными в виде транспортеров, а также совмещенными в ряде случаев с дробилками [59]. В последнее время получают распространение более эффективные самоочищающиеся решетки с прозорами шириной 6 мм.

Для выделения из сточных вод прошедших через решетки минеральных частиц (как правило – песка), плотность которых в несколько раз больше плотности воды, а размеры частиц превышают 0,2 мм, используют песколовки [66, 59]. Песколовки выполняют, как правило, в виде каналов, длина которых пропорциональна расходу воды. При этом горизонтальная скорость потока не должна превышать 0,3 м/с, что должно обеспечивать отделение органики от задерживаемого песка и вынос ее на последующие очистные сооружения [66]. Однако на практике всегда требуется последующая промывка удаляемого песка либо интенсификация процессов, протекающих в песколовке. Это связано с тем, что органические соединения налипают на

частицы, образуя жировую пленку или пленку нефтепродуктов, что неизбежно ведет к конгломерации частиц и уносу значительной части органики.

Наиболее совершенная аэрируемая песколовка [59] имеет аэраторы, установленные над лотками для сбора песка (рисунок 11.1). Аэрация в этом случае обеспечивает вращение жидкости, поддерживая постоянную попечерную скорость вдоль дна под прямым углом к направлению основного потока. Поскольку горизонтальная скорость потока в этом случае значительно меньше вращательной скорости жидкости, то колебания расхода воды не влияют на функциональные параметры песколовки.



- 1 – выпускной канал; 2 – выпускной шибер; 3 – передвижная тележка для секции песколовки;  
4 – успокоительная решетка; 5 – шибер для удаления жира; 6 – перепускной лоток;  
7 – выпускной шибер; 8 – выпускной канал; 9 – удаление песка; 10 – аварийный перепуск;  
11 – воздуховоды с аэраторами

Рисунок 11.1 – Схема аэрируемой песколовки [59]

Аэрация в песколовке решает, кроме того, и еще ряд важных проблем:

- увеличение степени отделения органических примесей от частиц песка за счет активного перемешивания и соударения частиц;
- интенсификация и начало процессов окисления органических примесей за счет предварительного насыщения стоков кислородом уже в песколовке и в первичном отстойнике;
- предотвращение начала брожения стоков за счет насыщения их кислородом.

Песок из лотков удаляется обычно автоматически: группой эрлифтов, включаемых периодически и извлекающих песок со дна приямка; скребком, укрепленным на бесконечной цепи на скреперном мосте и перемещающим песок к сборному приямку, откуда песчаная пульпа откачивается специальным насосом; непосредственно всасывающим насосом или эрлифтом, смонтированным на движущемся мостике. Затем песок отделяется от воды механически.

Длительность пребывания воды в аэрируемых песковках – 3–5 минут, максимальная гидравлическая нагрузка –  $70 \text{ м}^3$  воды с  $1 \text{ м}^2$  площади поверхности в час, максимальная длина – 30 м. Аэрируемые песковки задерживают не менее 80 % частиц с размерами больше 150–250 мкм.

Из песковок стоки поступают в отстойники, которые в очистных сооружениях используются дважды: для первичного осветления стоков перед их поступлением в аэротенк и для отделения ила по завершении процесса биохимической очистки перед обеззараживанием и сливом на поля орошения или в водоем.

Конструкции первичных и вторичных отстойников сооружений очистки сточных вод подробно описаны в работе [81]. Аэрация в этих отдельных сооружениях не применяется, а параметры процесса отстаивания обеспечиваются конструктивными элементами, направляющими поток в определенных направлениях с заданной скоростью.

Вместе с тем все более широкое распространение получают в последнее время комбинированные *аэротенки-отстойники*, которые заменяют, как правило, функции аэротенка и вторичного отстойника [59, 82]. Они используются при любой производительности. В этом случае обеспечивается компактность сооружений, высокая производительность за счет использования эффекта очистки и отстаивания во взвешенном слое ила.

Такое современное техническое решение было использовано специалистами Республиканского унитарного предприятия «Белорусский проектно-изыскательский институт «Белводоканалпроект» для реконструкции очистных сооружений г. Могилева [82]. Помимо хозяйствственно-бытовых, эти сооружения должны очищать и промышленные стоки ПО «Химволокно», в которых содержатся соли тяжелых металлов и другие токсичные вещества. Для таких тяжелых условий институт спроектировал аэротенк-остойник с трехступенчатой схемой очистки (рисунок 11.2) [82].

Блок представляет круглое в плане сооружение диаметром 40 м, состоящее из первичного отстойника диаметром 18 м, размещенного в центре; концентрически расположенных аэробной зоны (аэротенка), снабженной аэраторами «Ракада», и зоны денитрификации аэротенка, оснащенной мешалками фирмы «Flygt»; вторичного отстойника, размещенного по периметру блока. Блок оборудуется фермой с приводом вращательного движения, к которой подвешивается оборудование (насосы, мешалки и т. п.).

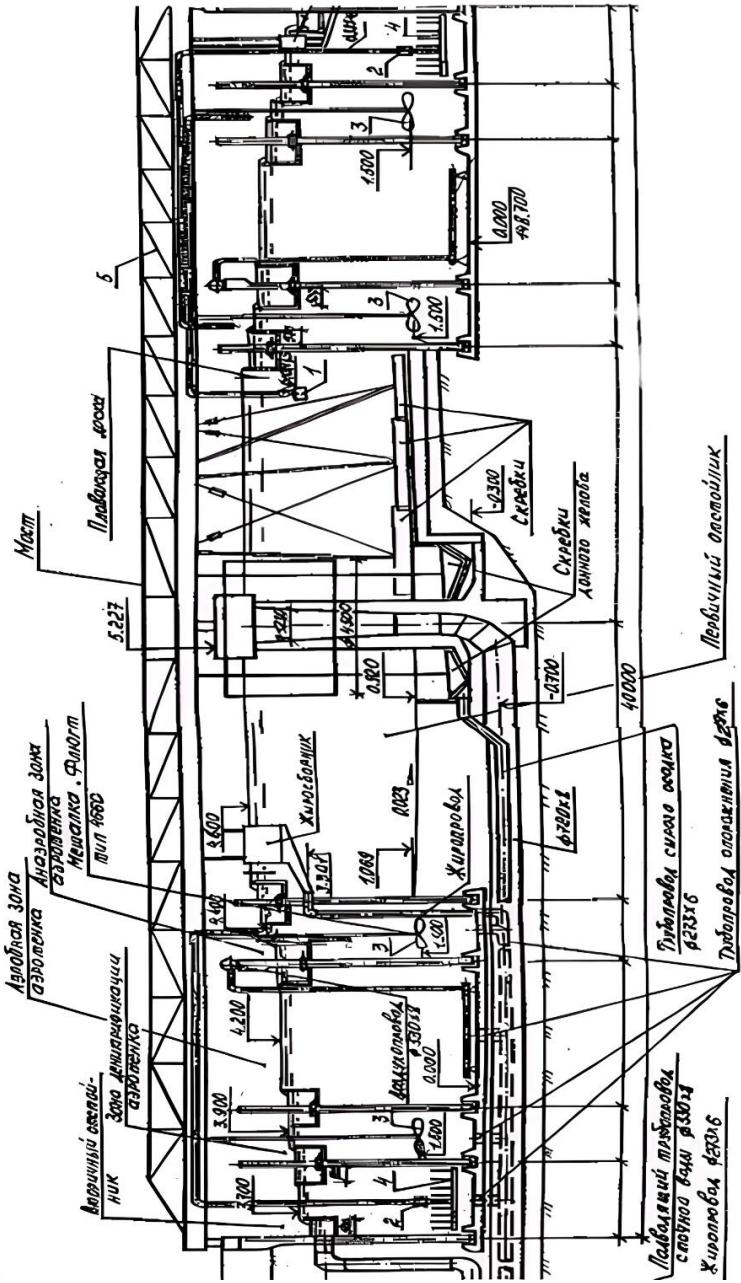
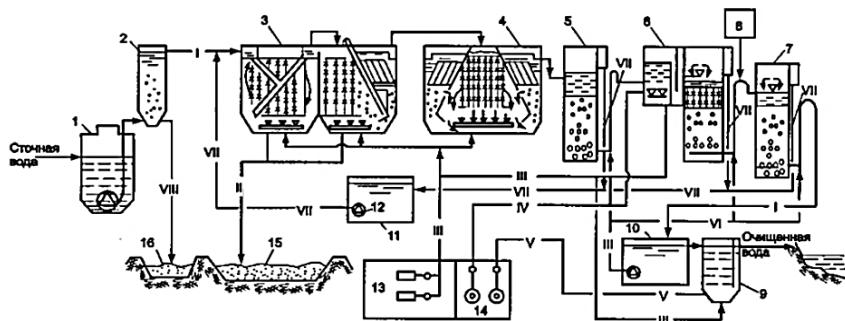


Рисунок 1.1.2 – Схема блока трехступенчатого аэротенка-отстойника, разработанного для очистных сооружений г. Могилева [82]

Производительность такого блока составляет 6–10 тыс. м<sup>3</sup>/сутки. Блоки компонуются в группы по 4 шт. и обслуживаются одной насосно-воздуходувной станцией.

Для очистки сточных вод малых населенных пунктов: поселков, ферм деревень, отдельно стоящих жилых зданий, коттеджей взамен широко известных установок типа «БИО», «КУ», «КУО», «Биокомпакт» в НИИ коммунального водоснабжения и очистки воды (НИИ КВОВ, Москва, Россия) разработана техническая документация и организовано производство блочно-модульной станции глубокой очистки сточных вод «Ручей» [83, 84]. Технологическая схема станции представлена на рисунке 11.3 [84].



I – сточная вода; II – избыточный ил; III – сжатый воздух; IV – реагент для удаления фосфатов;  
V – реагент для обеззараживания; VI – промывная вода; VII – грязная промывная вода;  
VIII – песок;

1 – приемный резервуар; 2 – песколовка; 3 – аэротенк-отстойник первой ступени; 4 – аэротенк-отстойник второй ступени; 5 – денитрификатор; 6 – фильтр-биореактор; 7 – сорбционный фильтр; 8 – озонаторная установка; 9 – контактный резервуар; 10 – резервуар промывной воды; 11 – резервуар грязной промывной воды; 12 – насос; 13 – воздуходувка; 14 – насосы-дозаторы реагентов; 15 – иловые площадки; 16 – песковые площадки

Рисунок 11.3 – Станция «Ручей» для биологической очистки и доочистки сточных вод

Технология очистки включает следующие процессы [83, 84]: задержание плавающих загрязнений и песка на процеживателях и песколовках; двухступенчатую биологическую очистку с нитрификацией сточных вод в аэротенках-отстойниках; денитрификацию; доочистку от взвешенных и растворенных органических загрязнений и от фосфатов в фильтрах-биореакторах; глубокую доочистку стоков окислительно-сорбционным методом с использованием активного угля и озона; обеззараживание воды озоном; обработку осадка в аэробных стабилизаторах и обезвоживание на фильтр-прессах или на иловых площадках.

При разработке станции все сооружения и методы были максимально интенсифицированы. Во многом это стало возможным за счет использова-

ния мелкопузырчатых пористых диспергаторов воздуха, которые позволили реализовать эффективный процесс очистки во взвешенном слое ила и на прикрепленных в зоне аэрации к полимерным насадкам культурах активного ила.

Для дальнейшего повышения эффективности очистки сточных вод, более полного использования сорбционной способности активного угля, в станциях «Ручей» применяется введение озона, которое позволяет увеличить срок службы угля, провести полное обеззараживание и обесцвечивание стоков [83]. В таблице 11.1 приведена техническая характеристика станций «Ручей» [84].

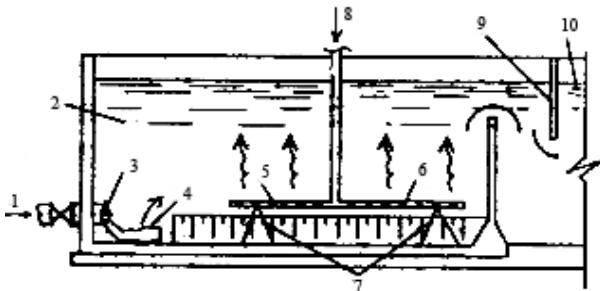
**Таблица 11.1 – Техническая характеристика станций глубокой очистки стоков «РУЧЕЙ»**

| Параметр                                | Ручей-50 | Ручей-100 | Ручей-200 | Ручей-400 | Ручей-700 | Ручей-1500 |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| Производительность, м <sup>3</sup> /сут | 25–50    | 100       | 200       | 400       | 700       | 1500       |
| Обслуживаемое население, чел.           | 150–300  | 300–700   | 600–1350  | 1200–2700 | 2100–4700 | 4500–10000 |
| Занимаемая площадь, га                  | 0,2      | 0,25      | 0,35      | 0,5       | 0,7       | 0,95       |
| Масса, т                                | 20       | 35        | 57        | 103       | 155       | 210        |
| Персонал, чел./смену                    | 1        |           | 2         |           | 3         |            |
| Потребность хлорреагента, кг/сут        | 0,15     | 0,3       | 0,6       | 1,2       | 2,4       | 4,8        |
| Установленная мощность, кВт             | 12       | 18        | 22        | 33        | 42        | 50         |

В технологии подготовки *питьевой воды* получили широкое распространение *аэрируемые отстойники*. Они, как правило, совмещены с камерами хлопьеобразования [85, 86]. Так, в Ростовской государственной академии строительства разработана технология смешения и хлопьеобразования коагулированной воды с использованием аэрации как основной движущей силы процесса [86]. При введении пузырьков воздуха обеспечивается равномерное перемешивание всего объема воды с заданными гидродинамическими параметрами. Применение аэрации в отстойниках позволяет отказаться от сложной конической или пирамidalной формы сооружений, снизить энергоемкость, повысить эффективность хлопьеобразования по сравнению с гидравлическими смесителями традиционной конструкции.

Так, в одном из вариантов переоборудуется типовая камера хлопьеобразования со слоем взвешенного осадка, получившая широкое распространение еще в 60–70-е гг. ХХ в. Она имеет ряд недостатков: низкая эффективность при осветлении мало мутных вод, низкий коэффициент объемного использования, сложность и малая надежность водораспределительной системы. После оборудования камеры системой аэрации по схеме, представ-

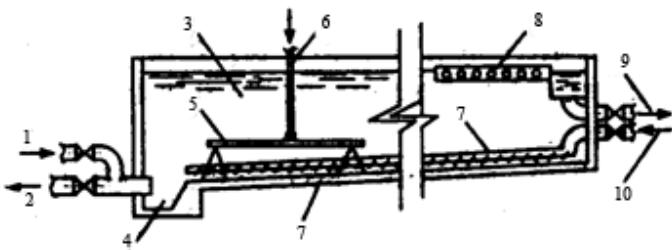
ленной на рисунке 11.4 производительность отстойников возрастает на 50 % и более, качество осветляемой воды улучшается [87, 88].



1 – вход воды с реагентами; 2 – камера хлопьеобразования; 3 – распределительный коллектор; 4 – отверстия для выхода воды; 5 – воздухораспределительный коллектор; 6 – аэраторы; 7 – опоры; 8 – подача воздуха; 9 – отбойник; 10 – отстойник

Рисунок 11.4 – Схема аэрированной камеры хлопьеобразования [88]

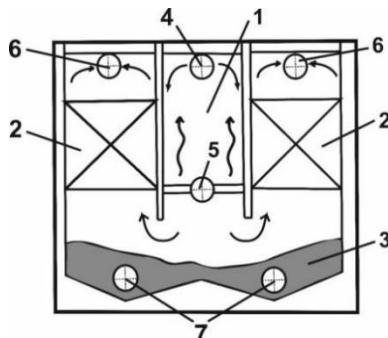
Для строительства новых сооружений разработана более совершенная конструкция горизонтального отстойника с аэрируемой камерой хлопьеобразования (рисунок 11.5) [16].



1 – вход воды с реагентами; 2 – отвод осадка; 3 – зона хлопьеобразования; 4 – приемник; 5 – воздухораспределитель с аэраторами; 6 – подача воздуха; 7 – система гидросмыва осадка; 8 – перфорированные трубы для рассредоточенного сбора осветленной воды; 9 – отвод осветленной воды; 10 – подвод воды к системе гидросмыва

Рисунок 11.5 – Схема горизонтального отстойника с аэрируемой камерой хлопьеобразования [16]

Еще более эффективна конструкция тонкослойного горизонтального отстойника с параллельным размещением аэрируемой камеры хлопьеобразования (в центре) и двух блоков тонкослойного отстаивания по периферии камеры (рисунок 11.6) [88]. Взаимно противоположная направленность водяного и воздушного потоков в камере создает условия для наиболее эффективного протекания хлопьеобразования. Тонкослойные блоки повышают коэффициент объемного использования отстойника.



1 – аэрируемая зона хлопьеобразования; 2 – тонкослойный блок; 3 – зона накопления осадка;  
4 – вход воды с реагентами; 5 – воздухораспределительная система с аэраторами;  
6 – сборник осветленной воды; 7 – система гидроудаления осадка

Рисунок 11.6 – Схема тонкослойного отстойника с аэрируемой камерой хлопьеобразования [88]

Тонкослойный отстойник с аэрируемой камерой хлопьеобразования успешно испытан при осветлении воды реки Дон.

Все три типа аэрируемых сооружений показали в 1,5–2 раза большую производительность и лучшее качество очистки воды по сравнению с традиционными конструкциями.

В технологии очистки питьевой воды аэрируемые сооружения используются и для других целей: для окисления растворенного железа в природных водах [55, 59] в процессах обезжелезивания; для удаления агрессивной углекислоты [55]. По конструкции такие сооружения подобны аэротенкам, либо, в случае применения гранулированной загрузки для повышения поверхности раздела фаз, – биофильтрам. Они подробно описаны в работах [55, 81, 86–88].

Еще один тип аэрируемых сооружений, используемых для очистки сточных вод, а также в технологии подготовки питьевой воды – *флотаторы*. Они применяются преимущественно в следующих процессах очистки: жироодержащих сточных вод предприятий пищевой промышленности; сточных вод химической и резинотехнической промышленности, содержащих дисперсии и эмульсии полимеров, латекса, растворители, химические волокна; сточных вод автопредприятий, заправочных станций, автомоек, предприятий нефтепереработки и хранения нефтепродуктов; для очистки поверхностных вод умеренной мутности с большим содержанием органических соединений или планктона [55, 81, 87–88]. Типовая схема флотатора для удаления легких веществ (жиров, нефтепродуктов, волокон) имеет две раздельные зоны [55]: в первой происходит смешивание и эмульгирование, а во второй, спокойной зоне – флотация (рисунок 11.7).

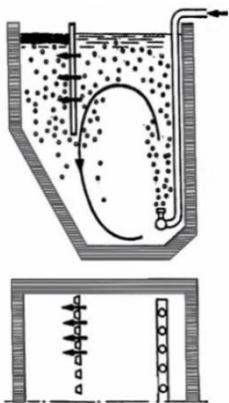


Рисунок 11.7 – Схема двухзонного флотатора с пневматическими аэраторами

В зоне эмульгирования взвешенные вещества взбалтываются и перемешиваются воздухом. Вероятность захвата пузырьками частиц увеличивается за счет спирального движения потока. В зоне флотации и сбора флотируемых веществ пересекающий поток очень медленный и его турбулентность уменьшается. Это создает благоприятные условия для всплытия пузырьков воздуха на поверхность с образованием пены, которую удаляют транспортером со скребками.

В работе [88] подробно описаны принципиальные схемы и эксплуатационные характеристики комбинированных установок-флотаторов с мелкопузырчатыми пористыми аэраторами, используемые для очистки стоков, содержащих нефтепродукты. Это компактные сооружения производительностью 1,5–100,0  $\text{м}^3/\text{ч}$ , изготавливаемые в виде отдельных блоков, готовых к монтажу.

## **11.2 Модернизация воздухораспределительной системы в аэротенках**

Аэротенки – главные сооружения, в которых проходят процессы биохимической очистки сточных вод в результате жизнедеятельности микроорганизмов активного ила. В аэротенках сточные воды непрерывно перемешиваются и насыщаются кислородом воздуха.

В аэротенках протекают два основных процесса – сорбция загрязнений активным илом и внутриклеточное окисление загрязнений микроорганизмами ила. При этом сорбция протекает со значительно большей скоростью, чем биоокисление [81, 89]. Сорбция ведет к быстрому снижению биохимического потребления кислорода (БПК) стоков до требуемого по санитарным нормам показателя. Выделенный во вторичном отстойнике активный ил возвращается в аэротенк.

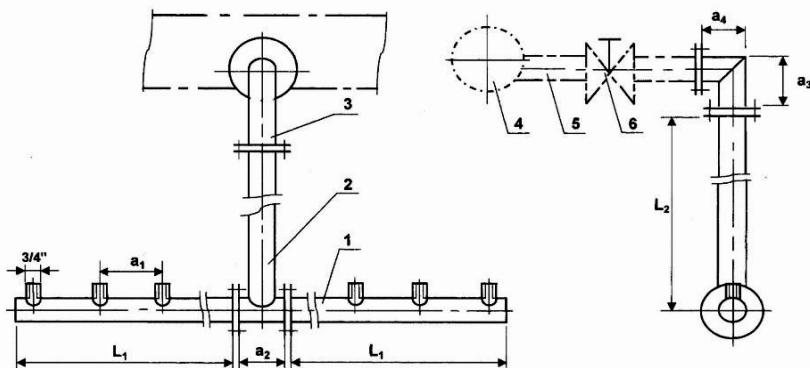
Типовые конструкции аэротенков имеют несколько модификаций и представляют емкостное сооружение, в котором медленно протекает смесь активного ила и очищаемых стоков. Типовой аэротенк-вытеснитель имеет прямоугольную в плане форму и разделен перегородками на 2–4 коридора. Перегородки не доходят поочередно до одной из торцевых стен аэротенка, что позволяет удлинить путь движения стоков за счет изменения направления потока на 180° от коридора к коридору и увеличить время их пребывания в аэротенке. В каждом коридоре выполнены у одной из стен фильтровые каналы, накрытые пористыми керамическими плитами. В каналы

нагнетается воздух, выходящий в виде пузырьков в воду. Конструкция аэротенков различных типов подробно описана в литературе, а методы их расчета даны в СНиП 2.04.03-85.

В последнее время для замены широко распространенных фильтросных плит в действующих аэротенках используются более современные и эффективные пористые аэраторы (трубчатые или дисковые).

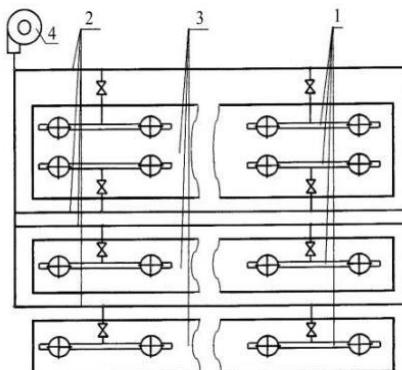
Как будет показано далее, простая замена трубчатых аэраторов на дисковые позволяет без ущерба для степени очистки уменьшить подачу воздуха в аэротенк не менее чем в два раза, сократив тем самым энергозатраты путем отключения одной из установленных в сооружении воздуходувок либо снижения потребляемой мощности. Кроме того, при такой замене возрастет на 25–30 % насыщенность очищаемых стоков кислородом, что неминуемо окажет положительный эффект на процессы биохимической очистки.

На рисунке 11.8 представлена рекомендуемая схема установки дисковых аэраторов в аэротенке, а на рисунке 11.9 – рекомендуемая схема прокладки воздуховодов. Согласно рисунку 11.8 для обеспечения равномерного распределения воздуха магистральный воздуховод целесообразно закольцевать, а сами аэраторы устанавливать на плетях длиной не более 10 м. Расстояние между аэраторами ( $L$ ), их количество в каждом коридоре и размещение в плане уточняются после расчета общего требуемого количества и зоны действия по методике разработанной в ИПМ им. академика О. В. Романа НАН Беларусь. Для размещения аэраторов разработан унифицированный модуль воздуховодов «АЭРОМОД» [40], конструкция которого хорошо видна на рисунке 11.8.



1 – гребенка со штуцерами  $\frac{3}{4}$ " ; 2 – тройник; 3 – угольник; 4 – магистральный воздуховод;  
5 – компенсатор; 6 – задвижка

Рисунок 11.8 – Схема установки аэраторов на модуле «АЭРОМОД»



1 – модули «АЭРОМОД» с установленными аэраторами; 2 – магистральный воздуховод;  
3 – коридоры аэротенка; 4 – компрессор

Рисунок 11.9 – Рекомендуемая схема воздуховодов

### 11.3 Сравнение эффективности аэротенков с аэраторами различных типов

В ряде публикаций [88, 89] на основании сравнительных исследований работы аэротенков до и после модернизации воздухораспределительной системы показаны конкретные достигнутые технико-экономические показатели. Так, в результате замены фильтросных плит на трубчатые аэраторы НПФ «Экополимер» на Диканевской станции аэрации Государственного коммунального предприятия «Харьковкоммуночиствод» эффективность очистки по аммонийному азоту выросла на 30–36 %, а по БПК<sub>5</sub> – на 2–3 % [88]. Аналогичные результаты были получены после подобной реконструкции Безлюдовской станции аэрации.

Ещё лучшие результаты достигаются при замене фильтросных плит на дисковые аэраторы, что показано Р. Ш. Непаридзе в работе [89]. В ней представлена и оригинальная конструкция мелкопузырчатого дискового полимерного аэратора НИИ КВОВ, который, по нашему мнению, за счет наличия обратного клапана и ряда других конструктивных отличий, обладает определенными преимуществами перед аналогами, в том числе и зарубежными. По данным [20], в Российской Федерации эксплуатируются (без учета Москвы и Санкт-Петербурга) около 400 коммунальных станций аэрации суммарной производительностью более 14 млн м<sup>3</sup> сточной воды в сутки. Расход электроэнергии на указанных станциях превышает 6 млн кВт·ч. На рисунке 11.10 представлена оценка потребления электроэнергии и доли энергозатрат на аэрацию в зависимости от производительности станции.



1 – удельный расход электроэнергии на станции, кВт·ч/(кг БПК<sub>5</sub>); 2 – на воздуховодки, кВт·ч/(кг БПК<sub>5</sub>); 3 – доля энергозатрат на аэрацию в общем потреблении на станцию, %

Рисунок 11.10 – Потребление электроэнергии станциями аэрации различной производительности

Экономичность системы аэрации оценивается затратами электроэнергии на окисление единицы (кг) органических веществ. На рисунке 11.11 приведены зависимости, построенные нами по зарубежным данным и по данным работы [89]. Условия сравнительных экспериментов были одинаковыми – глубина погружения 4 м, потери напора в воздуховодах – 0,3 МПа, а в аэраторах – 0,5 МПа.

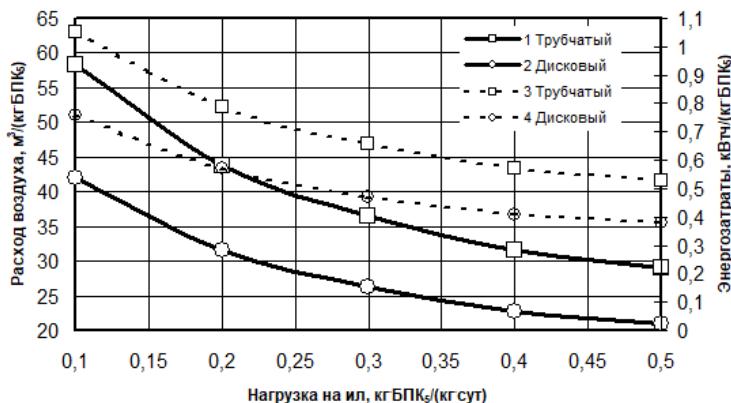


Рисунок 11.11 – Зависимости расхода воздуха (1, 2) и энергозатрат (3, 4) на аэрацию от нагрузки на ил при использовании трубчатых и дисковых пористых аэраторов

На рисунке 11.12 представлено сравнение степени использования кислорода воздуха и эффективности окисления для трубчатых и дисковых аэраторов из одинаковых пористых материалов, приведенное в работе [89].



Рисунок 11.12 – Сравнение степени использования кислорода и эффективности окисления различными пористыми аэраторами

Результаты исследований, представленные на рисунках 11.11 и 11.12, доказывают, что наиболее высокой эффективностью при одном и том же пористом материале диспергирующего элемента обладают дисковые аэраторы.

Практический интерес представляет оценка общего энергопотребления для стандартных систем аэрации, используемых на отечественных очистных станциях, выполненная в работе [89] и представленная нами в графическом виде на рисунке 11.13.

Представленные на рисунке 11.13 зависимости показывают, что, совершенствуя и оптимизируя аэрационные системы, можно достичь существенной экономии электроэнергии на очистку сточных вод без значительных капитальных затрат на реконструкцию действующих очистных сооружений.

В работе [90] показано, что отмеченный в работе [91] недостаток дисковых аэраторов, отложение ила на дне аэротенка, устраняется уже при интенсивности аэрации  $1,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , в то время как в аэротенке с трубчатыми аэраторами для предотвращения отложения ила необходима интенсивность аэрации  $4,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и выше. Таким образом, в работе [90] в целом был сделан вывод о неоспоримых преимуществах пористых дисковых аэраторов перед трубчатыми. Единственным относительным достоинством трубчатых аэраторов является возможность отказа от донных распределительных воздухоподводов и использования для этой цели непосредственно плетей аэраторов, соединенных последовательно друг с другом. Однако следует при этом учитывать не только относительное упрощение конструкции и снижение материоемкости воздухораспределительной системы, но и ожидаемое в этом случае снижение степени использования кислорода, снижение эффективности окисления и повышение энергопотребления.

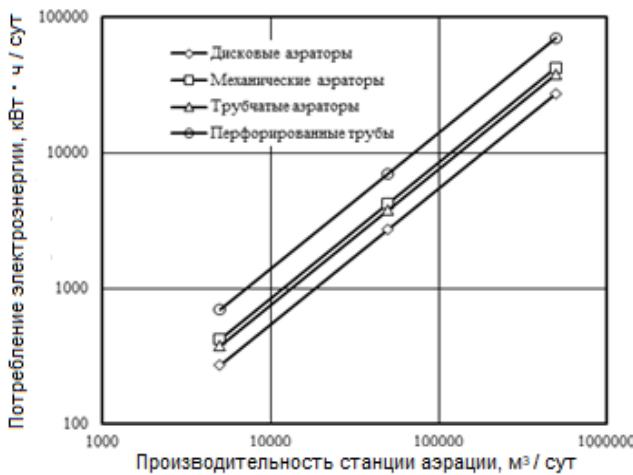


Рисунок 11.13 – Зависимости энергопотребления от производительности станций аэрации, оборудованных аэраторами различных типов

#### 11.4 Конструкции аэраторов и их использование

Классификация пневматических пористых аэраторов представлена на рисунке 11.14 [39].

В зависимости от давления воздуха, подаваемого в аэратор и расходуемого на преодоление сопротивления пористого материала и гидростатического давления столба воды, различают аэраторы низкого (до 10 кПа), среднего или нормального (от 10 до 50 кПа) и высокого (свыше 50 кПа) давления. В зависимости от размеров диспергируемых пузырьков воздуха, выходящих в воду из пористых элементов, аэраторы делят на три типа: мелкопузирчатые (тонкого диспергирования), среднепузирчатые и крупнопузирчатые. Следует при этом отметить, что в отечественной [39] и зарубежной [59] технической литературе границы этих диапазонов различны: к первому типу в отечественных работах относят пузырьки с размерами 1–4 мм, ко второму – 4–10 мм; к третьему – более 10 мм; в зарубежной литературе – до 1,2 мм, 1,2–1,6 мм и больше 1,6 мм соответственно [39]. Остальные принципы классификации пневматических пористых аэраторов ясны из рисунка 11.13.

Исследованиями [36, 39, 91, 92] установлено, что наиболее эффективен процесс передачи кислорода в жидкости при относительно малых размерах пузырьков, причем это связано не только с ростом поверхности раздела фаз, но и с уменьшением скорости подъема пузырьков, а, следовательно, увеличением времени контакта.



Рисунок 11.14 – Классификация пневматических пористых аэраторов

Рассмотрим подробнее конструкции аэраторов тонкого диспергирования. Аэрация тонкодиспергированным газом осуществляется через пористые керамические, тканевые или полимерные трубчатые или плоские элементы [93–95].

До начала 90-х гг. XX в. наиболее распространенными пористыми аэраторами были фильтросные плиты с габаритными размерами  $300 \times 300 \times 35$  мм (ТУ 400-1-21-79), выполненные из дробленого шамота на связке. Размеры пор плит находятся в диапазоне 80–500 мкм (средний размер пор – около 400 мкм). Крепление фильтросных плит производится в каналах подвода воздуха с помощью специальных приспособлений либо на бетонной стяжке [95]. Фильтросные плиты имеют следующие недостатки: высокое гидравлическое сопротивление, связанное с большой толщиной и малой пористостью; большую неравномерность проницаемости по площади; крупный размер генерируемых пузырьков, связанный с очень широким диапазоном и большим средним размером пор (400–850 мкм); хрупкость и связанные с ней низкую надежность, малый срок службы, необходимость в частых ремонтах; трудность монтажа в аэротенке.

В США уже к 1945 г. на многих станциях аэрации использовались пористые керамические трубы диаметром 70–100 и длиной до 500 мм [95–97], монтаж и замена которых осуществляется проще и быстрее, чем фильтросных плит. Трубчатые пористые керамические аэраторы производства фирмы Schumacher (ФРГ) были установлены до 1987 г. на очистной водопроводной станции ПО «Минскводоканал» в цехе подготовки питьевой воды. Фирма Nokia (Финляндия) выпускает из пористого полиэтилена марки Nopol 100 мелкопузырчатые аэраторы «НКР 600», представляющие перфорированную металлическую трубу, на которую надета труба из пористого полиэтилена. Однако эти и аналогичные (а.с. СССР № 695968; 969680; пат. Японии № 56-42350; пат. ФРГ № 3508593; 3224171; 3513368) конструкции аэраторов, выполненные в виде трубок из различных пористых материалов, имеют помимо специфичных индивидуальных недостатков, связанных со структурой, химическим составом и другими свойствами пористых материалов, один общий и весьма существенный недостаток – неэффективное использование поверхности, связанное с трубчатой формой. В этом случае, во-первых, используется лишь в 1/4–1/3 поверхности трубы выше горизонтальной диаметральной плоскости (рисунок 11.15) [96]. Во-вторых, пузырьки, выходящие из нижней части трубы, огибая ее поверхность при всплытии, коалесцируют, увеличиваясь в размерах, что приводит к резкому увеличению скорости всплытия, переходу на струйный режим движения и существенному уменьшению времени и поверхности контакта кислорода воздуха с жидкостью [97].

Данный недостаток трубчатых аэраторов подтвердили результаты наших экспериментов и опыт эксплуатации пористых аэраторов разных типов на предприятиях водопроводов. Так, на рисунке 11.15 представлены зависимости содержания кислорода в 1 м<sup>3</sup> водопроводной воды от подачи воздуха в дисковый и трубчатый аэраторы из пористого полимера с одинаковыми размерами пор, пористостью и толщиной стенки [40].

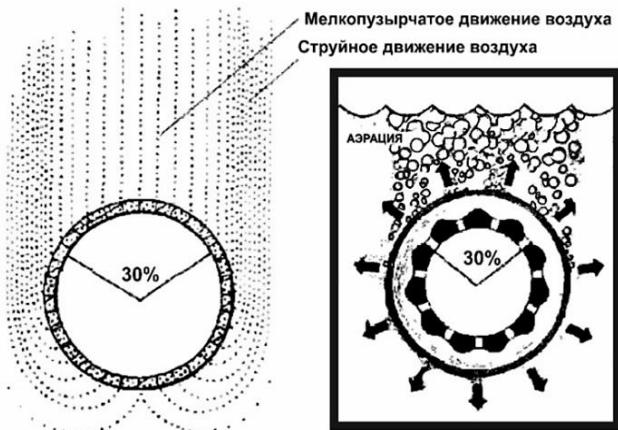


Рисунок 11.15 – Схема движения пузырьков воздуха, диспергируемых пористыми трубами [96]

Из рисунка 11.16 хорошо видно, что, несмотря на то, что площадь поверхности дискового аэратора в 1,2 раза меньше, чем трубчатого, при подаче воздуха в дисковый аэратор  $2 \text{ м}^3/\text{ч}$  содержание кислорода в воде составляет  $4,8\text{--}5,0 \text{ г}/\text{м}^3$ , а при такой же подаче воздуха в пористую трубу содержание кислорода достигает лишь  $2,05\text{--}2,1 \text{ г}/\text{м}^3$ .

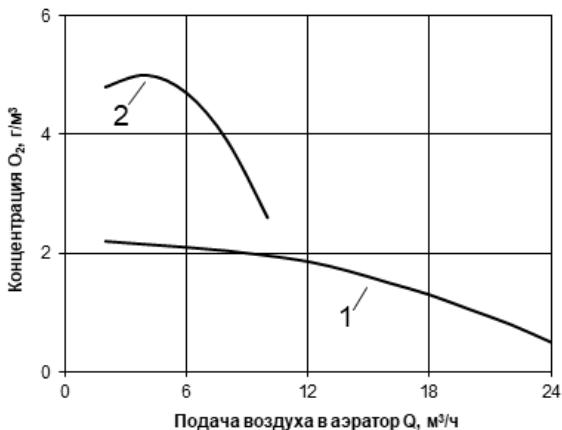
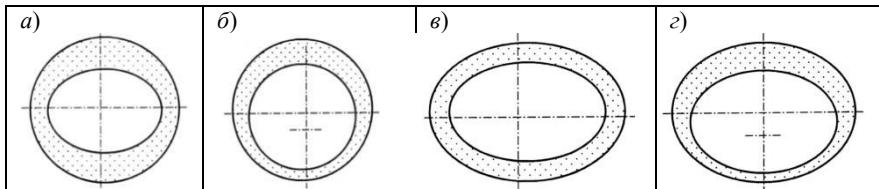


Рисунок 11.16 – Зависимость содержания кислорода в воде от подачи воздуха в пористые полимерные аэраторы с равными размерами пор и пористостью (данные фирмы Didier Filtertechnik, Германия [40]): 1 – труба  $\varnothing 70\times 1000 \text{ мм}$ ; 2 – диск  $\varnothing 280 \text{ мм}$

Для увеличения эффективности использования поверхности трубчатых пористых аэраторов предложено [98] применять специальные сечения с переменной толщиной стенки (рисунок 11.17). Однако такое техническое решение, помимо усложнения технологии изготовления пористых труб, не позволяет диспергировать пузырьки номинального размера более чем с 1/2 всей площади трубы.

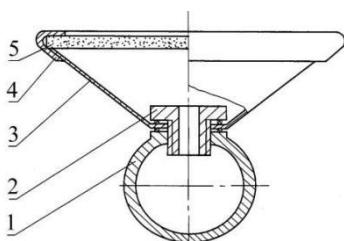


а – эллипс в круге; б – эксцентрик; в – «эквидистантные» эллипсы; г – «эксцентричные» эллипсы

Рисунок 11.17 – Конфигурация поперечных сечений пористых трубчатых аэраторов повышенной эффективности [98]

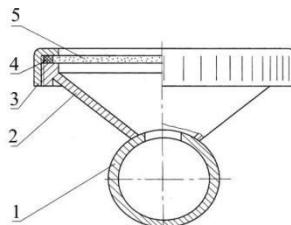
Стремление устраниить специфичные недостатки пористых трубчатых аэраторов привело к разработке купольных аэраторов, впервые примененных в Великобритании в 1944 г. Аэраторы купольного типа представляют перевернутые керамические тарелки с горизонтальным (или слегка выпуклым) дном с центральным отверстием и цилиндрическим (либо коническим) буртом, которым они через уплотнение прижимаются к опоре стяжным болтом [96, 97]. Испытания таких аэраторов показали, что рабочей является лишь горизонтальная поверхность.

Следующим шагом явилась разработка грибовидных (рисунок 11.18) и дисковых (рисунок 11.19) плоских аэраторов, которые (свободные от недостатков предыдущих конструкций) постепенно приходят им на замену по всему миру [96–98].



1 – воздухопровод; 2 – полый болт;  
3 – поддерживающая воронка; 4 – при-  
жимное кольцо; 5 – пористый диск

Рисунок 11.18 – Грибовидный аэратор



1 – воздухопровод; 2 – корпус;  
3 – прижимное кольцо;

4 – уплотнение; 5 – пористый диск

Рисунок 11.19 – Дисковый аэратор HKL-21:

Дисковые или грибовидные аэраторы могут выполняться из различных пористых материалов: полиэтилена; специального коррозионно-стойкого материала, представляющего сформованную смесь гранулированного инер-тного (либо реакционноспособного природного или синтетического) пористого материала и гранулированного активированного угля (заявка ФРГ № 2156571); мягкой ячеистой пластмассы – пенополиуретана (а. с. СССР № 340151); целлюлозы (а. с. СССР № 1316978); многослойного композиционного материала (пат. Польши № 251811).

Широкое применение плоских и трубчатых пористых элементов, полученных методами порошковой металлургии, для очистки и осушки технологических газов, тонкой очистки и стерилизации воды микрофильтрацией [99], привлекло внимание ряда исследователей, попытавшихся использовать свойства проницаемости данных материалов для насыщения жидкостей газами. В работе [100] проанализированы результаты сравнительных испытаний четырех видов материалов, использованных для аэрации, итогом которых явился вывод о преимуществе по коррозионной стойкости, длительной прочности, регенерируемости и эффективности аэрации пористых материалов, изготовленных методами порошковой металлургии перед тканями, сетками, войлоком, перфорированными металлическими и полимерными листами. Это связано с достоинствами порошковой металлургии, позволяющей не только регулировать в широком диапазоне размеры пор (1–1000 мкм), но и изменять физико-химические свойства поверхности, а, следовательно, влиять на размеры, частоту и плотность генерирования пузырьков и определяемые ими насыщенность жидкости кислородом и коэффициент использования кислорода. Однако оптимальный тип пористой структуры в работе [100] не определен, не даны и рекомендации по размещению аэраторов в аэротенке.

В Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа разработана технология и организовано серийное производство из порошка титана пористых мелкопузырчатых дисковых аэраторов, применяемых для диспергирования озона и других газов в водной среде [40, 101–106].

На рисунке 11.20 представлен чертеж аэратора с пористым титановым диском. Для установки в нагнетательную систему дисковых аэраторов разработана конструкция тарельчатого корпуса 1 и технология его изготовления методом холодного выдавливания из листовой коррозионно-стойкой стали. Пористый диск 2 закрепляется и герметизируется в корпусе 1 завальцовкой, а к нагнетательной системе корпус подсоединеняется через приваренный в его нижней части штуцер 3 с внутренней резьбой 3/4". Общий вид пористых титановых аэраторов разных размеров приведен на рисунке 11.21. Данные аэраторы производятся разных типоразмеров и отличаются площадью пористого диска.

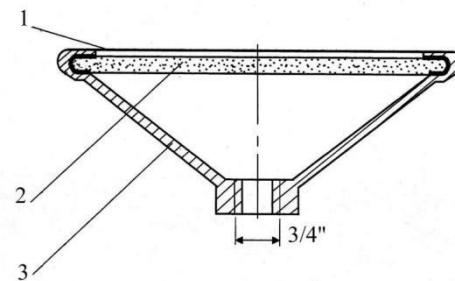


Рисунок 11.20 – Чертеж аэратора с пористым титановым диском



Рисунок 11.21 – Аэраторы с пористым титановым диском разного размера

Основные технико-экономические характеристики аэраторов приведены в таблице 11.2.

*Таблица 11.2 – Характеристики пористых аэраторов*

| Характеристика                 | ПА-2            | ПА-2-1    | ATT-480 |
|--------------------------------|-----------------|-----------|---------|
| Материал корпуса               | Сталь 12Х18Н10Т | –         | –       |
| Материал пористого элемента    | Порошок титана  |           |         |
| Подача газа, м <sup>3</sup> /ч | 3,0–5,0         | 8,0–10,0  | 25      |
| Сопротивление потоку газа, Па  | 2500–3000       | 2500–3500 | 2000    |
| Наружный диаметр, мм           | 190             | 290       | 120     |
| Диаметр резьбы штуцера         | 3/4"            | 3/4"      | –       |
| Внутренний диаметр, мм         | –               | –         | 110     |
| Высота (длина), мм             | 40              | 45        | 480     |
| Масса, кг                      | 0,6             | 1,2       | 3,0     |

С 1987 г. 2 тысячи аэраторов ПА-2 успешно эксплуатируются в камерах озонирования на очистной водопроводной станции города Минска, оснащенной генераторами озона фирмы TRAELIGAZ (Франция). Аэраторы ПА-2 заменили пористые керамические трубы AEROLIT фирмы SCHUMACHER (ФРГ), что позволило уменьшить на 14–17 % дозу озона и подачу озоно-воздушной смеси при сохранении параметров очистки питьевой воды. Общая производительность станции подготовки питьевой воды составляет 200000 м<sup>3</sup> в сутки. В таблице 11.3 проведено сравнение технико-экономических показателей одной из камер озонирования предприятия речного водозабора ПО «Минскводоканал» с импортными и отечественными пористыми аэраторами.

**Таблица 11.3 – Характеристика камеры озонирования питьевой воды по «Минскводоканал» с разными пористыми аэраторами**

| Характеристика   | AEROLIT,<br>SCHUMACHER, ФРГ        | ПА-2,<br>ИПМ, Беларусь |
|--|------------------------------------|------------------------|
| Форма и размеры  | Труба, Ø150×1000 мм                | Диск, Ø188 мм          |
| Материал   | Керамика SiO <sub>2</sub> , связка | Порошок титана         |
| Подача озоно-воздушной смеси в камеру, м <sup>3</sup> /ч | 1020–1200                          | 800–960                |
| Доза озона, г/м <sup>3</sup>                             | 2,2–2,8                            | 1,5–2,0                |
| Количество диспергаторов                                 | 240                                | 480                    |
| Потребляемая воздуходувкой мощность, кВт                 | 70–80                              | 55–60                  |

На рисунке 11.22 представлен внутренний вид этой камеры с установленными в ней аэраторами типа ПА-2.



**Рисунок 11.22 – Внутренний вид камеры вторичного озонирования предприятия речного водозабора ПО «Минскводоканал» с установленными аэраторами типа ПА-2, 1988 г.**

Из таблицы 11.3 хорошо видно, что применение отечественных пористых титановых дисковых аэраторов типа ПА-2 позволило не только сни-

зить в 3 раза капитальные затраты, но и уменьшить почти на 40 % среднюю потребляемую воздуходувками мощность, сберечь за 11 лет значительное количество энергоресурсов. В 1995–1996 и в 2018–2022 гг. более 10 тысяч аэраторов ПА-2 были установлены на Восточной водопроводной станции города Москвы производительностью 1200000 м<sup>3</sup> в сутки. Эта станция также оборудована генераторами озона фирмы TRAELIGAZ. В 1997 г. во Франции партия аэраторов ПА-2 и ПА-2.1 прошла успешные лабораторно-производственные испытания на фирме TRAELIGAZ.

Аэраторы ПА-2 и ПА-2.1 успешно используются не только для диспергирования озона в системах подготовки питьевой воды Москвы и Минска, деструкции токсичных промышленных стоков и обеззараживания стоков микробиологических производств. С 1988 г. аэраторы обоих типов общим количеством более 100000 шт. эксплуатируются на сооружениях биохимической очистки стоков Ивано-Франковского завода тонкого органического синтеза, Кемеровского анилино-красочного завода, Усть-Каменогорского и Белорусского цементных заводов, ПО «Ивано-Франковск-водоканал», ПО «Выборгводоканал», ПО «Красноярскводоканал», ОАО «Новокуйбышевский НПЗ», предприятия «Коалесцент» (г. Севастополь), ПО «Нафттан», где применяются для диспергирования воздуха, нагнетаемого в аэротенки и флототенки.

Институтом порошковой металлургии имени академика О. В. Романа выпускаются и малогабаритные аэраторы для диспергирования озона с пористым титановым диском диаметром 30, 50, 70 и 100 мм в корпусах из коррозионно-стойкой стали с подводом озоновоздушной смеси снизу и сверху (рисунок 11.23). Данными изделиями комплектуются бытовые генераторы озона, выпускаемые рядом фирм России для очистки и дезинфекции питьевой воды.



Рисунок 11.23 – Аэраторы ПА-2, ПА-2.1 и малогабаритные, выпускаемые в Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа

Дисковый аэратор типа Д300-Р, но с пористым диском, полученным вырубкой пористого листового проката из порошка коррозионно-стойкой стали, производит АО «Курганхиммаш» [107]. Конструкция аэратора Д300-Р представлена на рисунок 11.24.

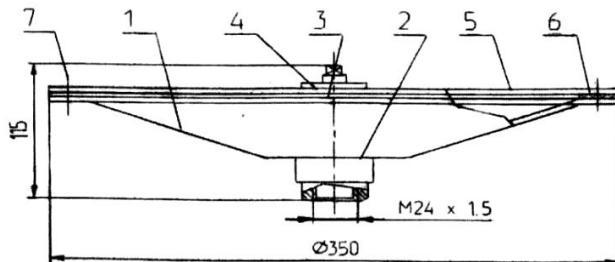
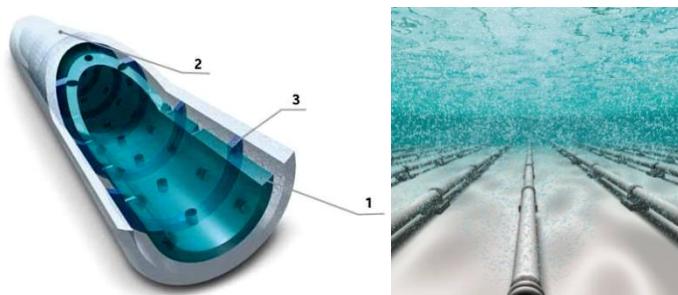


Рисунок 11.24 – Дисковый аэратор Д300-Р, выпускаемый АО «Курганхиммаш»

Аэратор Д300-Р состоит из корпуса 1, игольчатого распылителя 2, регулятора 3, уплотнительной втулки 4, пористого диска 5, прокладки 6 и винтов 7. Эффективный диаметр пористого диска составляет 300 мм, размеры пор – 10–15 мкм, а пропускная способность регулируется в пределах 2–10 м<sup>3</sup>/ч изменением зазора в распылителе 2 вращением винта регулятора 3. Масса аэратора – 4,2 кг.

Специалистами Промышленной группы ЭКОТОН (г. Белгород, Россия) разработана конструкция и выпускаются трубчатые аэраторы с пористым полимерным диспергирующим слоем из полимерного волокна, наносимого методом пневмоэкструзии. Конструкция данных аэраторов представлена на рисунке 11.25. Плети из аэраторов могут иметь длину до 80 м и не требуют дополнительных воздуховодов.



1 – перфорированная труба, ПВХ; 2 – волокнисто-пористый диспергатор, ПВД;  
3 – поперечные кольцевые вставки, ПВД

Рисунок 11.25 – Трубчатый пористый аэратор ЭКОТОН

В аэраторе ЭКОТОН между опорной трубой и пористым полимерным диспергирующим слоем имеется кольцевой зазор для выравнивания расхода воздуха вдоль аэратора.

Следует отметить, что Промышленной группой ЭКОТОН разработаны и выпускаются аэраторы АКВА-ПЛАСТ с диспергирующим элементом в виде резиновой перфорированной мембранны [108, 109] – аналогом ряда зарубежных конструкций.

Наиболее совершенные и массовые полимерные аэраторы выпускает фирма NOPON Oy (Финляндия). Это дисковые аэраторы диаметрами 215 и 300 мм с диспергирующими элементами, спеченными из порошка полиэтилена низкого давления (ПЭНД), либо выполненнымными в виде перфорированной эластичной мембранны (ПЭМ) [40]. Общий вид аэраторов приведен на рисунке 11.26, а основные характеристики – в таблице 11.4.

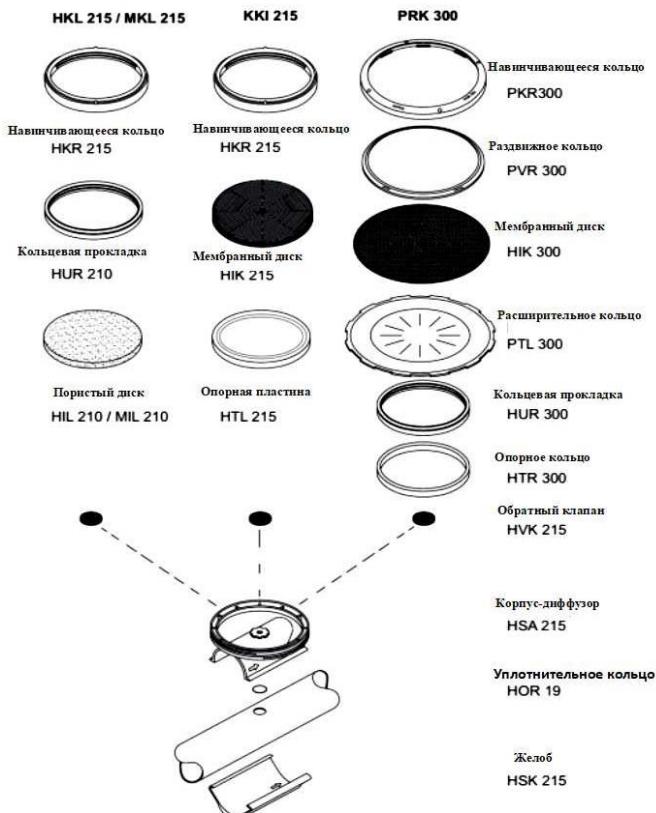


Рисунок 11.26 – Конструкция полимерных аэраторов фирмы NOPON Oy, Финляндия

**Таблица 11.4 – Характеристики аэраторов NOPOL**

| Показатель                              | KKR 300 | HKL 215 | MKL 215 |
|---|---------|---------|---------|
| Производительность, м <sup>3</sup> /ч   | 1–8     | 1–5     | 1,5–6   |
| Площадь пористого диска, м <sup>2</sup> | 0,060   | 0,025   | 0,025   |
| Материал пористого диска                | ПЭМ     | ПЭНД    | ПЭМ     |
| Вес, кг                                 | 1,044   | 0,790   | 0,790   |

В настоящее время широкое распространение получили трубчатые и дисковые аэраторы с перфорированной эластичной мембраной. Типичный дисковый аэратор состоит из корпуса, фиксирующего кольца, представляющего собой вторую половину корпуса, и эластичной мембранны, которая при сборке зажимается между корпусом и фиксирующим кольцом. Корпус и фиксирующее кольцо соединяются с помощью резьбового соединения.

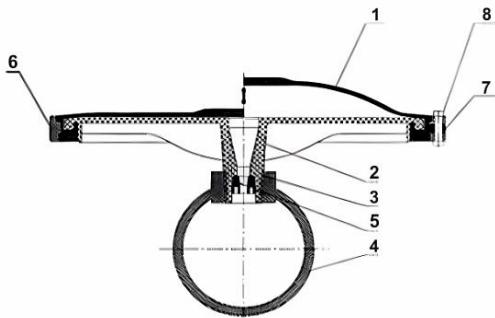
Мембрана представляет диск со сложным профилем. Внешний край диска утолщен и образует кольцо, которое гарантирует надежное крепление мембранны в корпусе аэратора. Материал мембранны – этиленпропиленовый каучук EPDM, обеспечивает высокие механические свойства и устойчивость к температурным изменениям. По требованиям эксплуатации мембрана может быть изготовлена из силикона или тефлона PTFE. Технология перфорации разработана таким образом, чтобы получить пузырьки размером 0,8–2,1 мм.

Мембрана перфорируется изнутри наружу с помощью ножей специальной формы. В результате образуются трапецидальные просечки (щели), с вершинами на внешней поверхности мембранны.

При отсутствии давления воздуха в аэраторе щели мембранны закрыты. При поступлении воздуха в пространство между мембранны и корпусом мембрана растягивается, щели открываются, и воздух в виде мелких пузырьков поступает в аэрируемую жидкость. При прекращении подачи воздуха мембрана прижимается к гладкой поверхности корпуса, возвращаясь в ненагруженное состояние, и щели закрываются. Таким образом, мембрана работает как обратный клапан, предотвращая попадание жидкости в воздуховоды аэрационной системы при прекращении подачи воздуха.

На рисунках 11.27 и 11.28 представлен один из выпускаемых в Российской Федерации мембранный дисковый аэратор в режиме ожидания (рисунок 11.27) и в процессе работы (рисунок 11.28). В таблице 11.5 приведены основные характеристики таких аэраторов.

Развитием данного типа аэраторов стала система АКВА-TOP-M (рисунок 11.29). Она представляет аэрирующий модуль с кольцеобразным диспергатором, имеющим центральное отверстие для прохода воды [109].



1 – мембрана; 2 – корпус; 3 – патрубок с конической резьбой; 4 – воздухораспределительная труба; 5 – ниппель; 6 – полиэтиленовый хомут; 7 – замок хомута; 8 – цилиндр фиксации замка

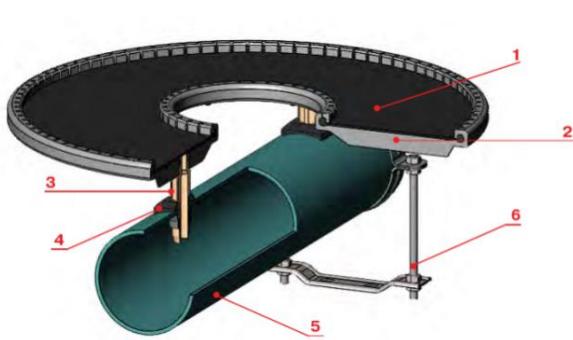
Рисунок 11.27 – Мембранный дисковый аэратор



Рисунок 11.28 – Симуляция барботирования жидкости мембранным дисковым аэратором

*Таблица 11.5 – Основные характеристики дисковых мембранных аэраторов*

| Тип аэратора                         | Диаметр мембранны, мм | Размер пузырьков воздуха, мм | Зона покрытия, м <sup>3</sup> /шт. | Эффективность аэрации, кгO <sub>2</sub> /кВт | Коэффициент переноса кислорода, кгO <sub>2</sub> /ч | Потребление кислорода, % | Сопротивление, кПа |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------|--|---|--------------------------|--------------------|
| Дисковый AIRX-D 215<br>Мембрана EPDM | 215                   | 0,8–2,1                      | 0,25–0,45                          | 6,5  | 0,13–0,35   | Более 30                 | Менее 3            |
| Дисковый AIRX-D 260<br>Мембрана EPDM | 260                   | 0,8–2,1                      | 0,35–0,65                          | 6,5  | 0,18–0,45   |                          |                    |
| Дисковый AIRX-D 320<br>Мембрана EPDM | 320                   | 0,8–2,1                      | 0,45–0,75                          | 6,5  | 0,25–0,5  |                          |                    |



1 – мембрана; 2 – корпус; 3 – коннектор; 4 – втулка; 5 – коллектор; 6 – опора коллектора

Рисунок 11.29 – Конструкция аэратора АКВА-ТОР-М

Кольцеобразная конфигурация диспергатора позволяет воде вместе с находящимся на дне аэротенка илом подниматься сквозь центральное отверстие (эрлифтный эффект, рисунок 11.30). При этом предотвращается залегание ила под аэратором: ил попадает в водовоздушный факел над диспергатором, что способствует турбулизации потока на границе «вода – иловый хлопок» и тем самым ускорению процессов очистки воды. Вторым следствием наличия отверстия для прохода воды внутри кольцевого аэратора является изменение структуры водовоздушного факела, который сжимается в значительно меньшей степени, чем у тарельчатых аэраторов. Вследствие этого коалесценция воздушных пузырьков существенно ослабевает, коэффициент массопередачи возрастает.

Оптимизация конструкции и размеров привела к тому, что аэратор АКВА-ТОР имеет не только высокие массообменные характеристики, но и является эффективным перемешивающим устройством. Это позволяет использовать небольшое количество аэраторов в тех случаях, когда процесс лимитируется минимальной эффективностью аэрации. Первая модель аэраторов АКВА-ТОР была выполнена из пористого полиэтилена, полученного методом melt-blowing [110–113], следствием чего явилась их относительно высокая себестоимость.

При разработке конструкции мембранныго аэратора АКВА-ТОР-М, определены оптимальные соотношения внешнего и внутреннего диаметров тора, длины щелей перфорации мембранны, а также материала мембранны. Это позволило повысить величину передачи кислорода еще на 7–9 %. В результате был создан аэратор, который заменяет три стандартных 12-дюймовых мембранных аэратора или четыре 9-дюймовых (рисунок 11.31).

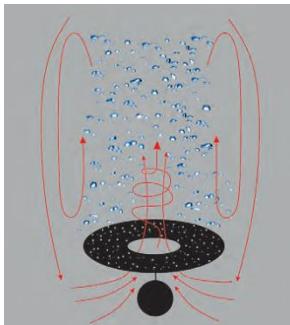


Рисунок 11.30 – Эрлифтный эффект

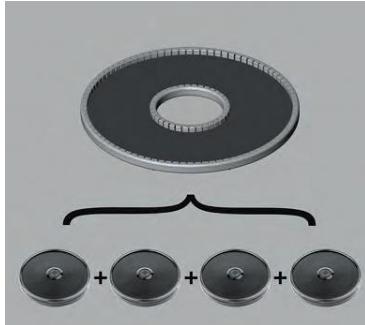


Рисунок 11.31 – AKVA-TOP-M

В таблице 11.6 приведены технологические параметры аэраторов АКВА-TOP-M.

*Таблица 11.6 – Технологические параметры аэраторов АКВА-TOP-M*

| Рабочий диапазон нагрузки, м <sup>3</sup> /ч | Максимальный расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч | Потеря напора воды, мм вод.ст. | Эффективность переноса кислорода (SOTE), %/м | Производительность, кгО <sub>2</sub> /ч·м |
|--|--|--------------------------------|--|---|
| 10–25  | 30   | 200–400                        | 6,0–7,5                                      | До 0,49                                   |

Специалистами фирмы «Гефлис» (Гомель, Беларусь) установлено в ходе эксплуатации продукции собственного производства, что мембранные аэраторы подвержены биообрастанию и отложению в них солей жёсткости, что уже в первые годы эксплуатации приводит к резкому увеличению внутреннего сопротивления таких аэраторов и, соответственно, увеличению энергозатрат на аэрацию [114].

В целом, при массовом применении и кажущейся низкой стоимости все вышеописанные полимерные трубчатые и дисковые аэраторы имеют ряд существенных общих недостатков. Среди них – невысокая стойкость, особенно при колебаниях pH и температуры стоков, температуры нагнетаемого воздуха, ведущая к быстрому старению пористого элемента, его растрескиванию и разрушению. Другой недостаток – склонность к биообрастанию (пористые и ячеистые полимеры – идеальная загрузка для биофильтров), ведущая к перекрытию поровых каналов, возрастанию гидравлического сопротивления и нарушению номинальных режимов аэрации. Третий недостаток полимеров и аэраторов из них – положительная плавучесть, требующая искусственного утяжеления либо жесткого крепления аэраторов ко дну очистного сооружения. Недостатком полимерных аэраторов является их малая механическая прочность, требующая аккуратного и осторожного обращения при монтаже и обслуживании для избежания поломок. Еще один

недостаток пористых полимеров, как это будет показано далее, не самый оптимальный размер генерируемого пузырька, сказывающийся непосредственно на технико-экономических параметрах процессов массопереноса.

Мы также предполагаем, исходя из данных, полученных при эксплуатации в ПО «Минскводоканал» керамических аэраторов фирмы Schumacher, что пористые керамические аэраторы других производителей вследствие особенностей физико-химических свойств поверхности керамики также подвержены биообрастанию, несмотря на воздействие озоновоздушной среды. Еще более интенсивно керамические пористые аэраторы обрастают в сточной воде, что требует частых ремонтно-восстановительных работ, опорожнения и простоеов сооружений.

Тем не менее керамические пористые трубчатые и дисковые аэраторы, корнями уходящие к фильтросным плитам, востребованы на рынке и продолжают производиться.

Подобную конструкцию дискового пористого керамического аэратора типа DGBM (рисунок 11.32) разработала фирма Didier Filtertechnik (Германия).

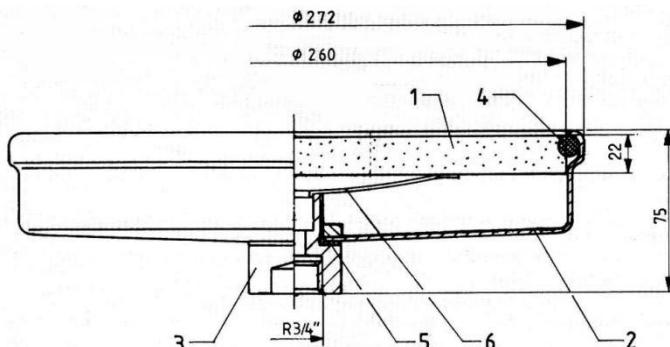


Рисунок 11.32 – Конструкция дискового пористого керамического аэратора типа DGBM фирмы Didier Filtertechnik (Германия)

Аэратор содержит пористый керамический диск 1, тарельчатый корпус 2, резьбовой штуцер 3, уплотнительное кольцо 4, уплотнение 5 между корпусом и штуцером, тарельчатую пружину 6. Особенностью конструкции является ее простая сборка и демонтаж в процессе обслуживания и замены пористого диска, а также значительная толщина последнего – 22 мм, что должно выравнивать давление и обеспечивать равномерное диспергирование пузырьков газа по площади диска. Номинальная производительность аэратора типа DGBM по газу находится в пределах 5–6 м<sup>3</sup>/ч, а рабочий диапазон – 2–10 м<sup>3</sup>/ч. По мнению авторов, они также вследствие особенностей физико-химических свойств поверхности керамики подвержены биообрастанию даже в условиях воздействия озоновоздушной среды.

Для выравнивания распределения газового потока по площади диспергирующего керамического элемента он в классической конструкции HCL фирмы NOPON Oy выполнен профицированным (рисунок 11.33).

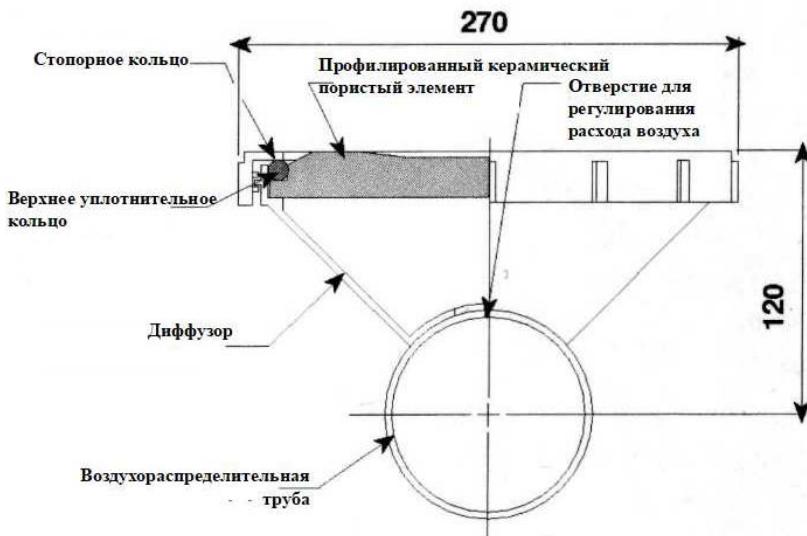


Рисунок 11.33 – Керамический дисковый аэратор HCL фирмы NOPON Oy

Дисковый аэратор HCL имеет оригинальную подводящую систему, облегчающую монтаж, – диффузоры в заводских условиях закрепляют на подводящих трубах, соединяемых в плети муфтами. После установки труб в диффузоры вкладывают пористые керамические диффузоры, круглые уплотнительные кольца, а затем – закрепляют кольцом. Характеристики аэраторов HCL подобны описанным выше пористым полимерным – производительность 1–6  $\text{м}^3/\text{ч}$ , а масса – 1,3 кг.

Еще один тип пористых дисковых аэраторов с керамическим диспергирующим элементом выпускает фирма Envicon (Германия). Корпус аэратора и штуцер для подсоединения к воздухоподводящей системе выполнены из коррозионно-стойкой стали. На рисунке 11.34 представлен общий вид, а на рисунке 11.35 – чертеж аэратора Envicon с основными присоединительными размерами.

Основные характеристики аэратора Envicon, такие же, как и у аналогов – производительность 2–10  $\text{м}^3/\text{ч}$  (оптимальная – в диапазоне 5–6  $\text{м}^3/\text{ч}$ ), сопротивление – 25–30 Па. Оригинальным является крепление диспергирующего диска в корпусе с помощью хомутика (см. рисунок 11.34).



Рисунок 11.34 – Общий вид аэратора Envicon, Германия

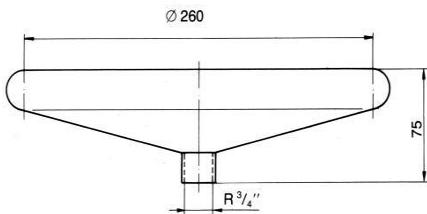


Рисунок 11.35 – Основные габаритные и присоединительные размеры аэратора Envicon

Учеными и специалистами УрФУ (Екатеринбург) – Вайсуловой Э. Ф., Безматерных М. А., Селезневой И. С. на Северной аэрационной станции МУП «Водоканал» города Екатеринбурга проведена замена мембранных аэраторов Hafi на керамические аэраторы НТЦ «Бакор» (Москва), которые представляют проницаемые для газа прямоугольные пластины различных размеров, производимые из наномодифицированной высокопористой (~ 42–45 %) керамики с размером пор около 100 мкм [115]. Монтаж аэраторов предусматривается в существующие воздуховоды. Конструкция аэраторов модульного типа из наномодифицированной пористой керамики и схема работы представлены на рисунке 11.36. Такая конструкция не требует специальных креплений в аэротенке, при этом штуцер подвода воздуха находится непосредственно в самом аэраторе.

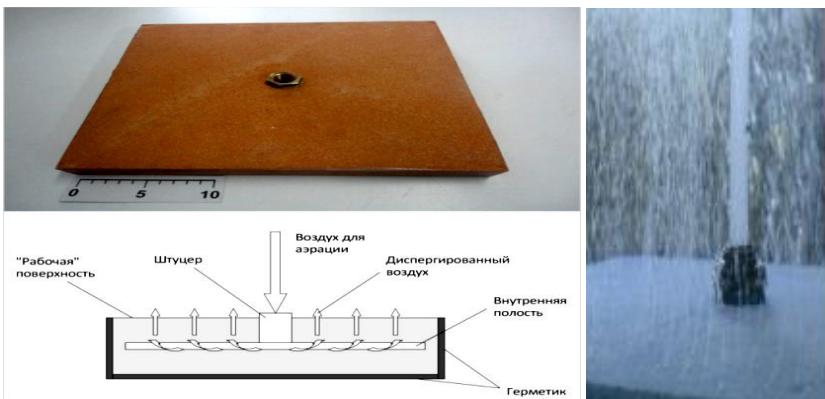


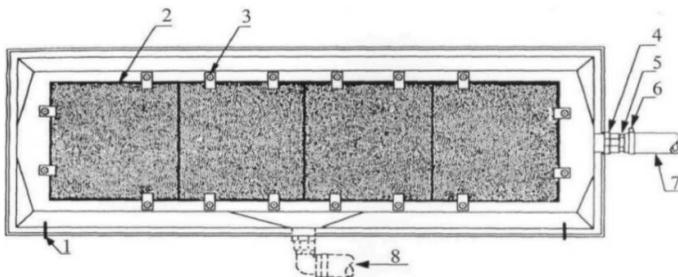
Рисунок 11.36 – Пористый керамический аэратор НТЦ «Бакор» и схема его работы

В случае использования керамических аэраторов «Бакор» можно снизить расход воздуха без ущерба качества и степени биохимической очистки, поэтому с помощью частотного регулятора можно снизить мощность возду-

ходувки на 50 %, т. е. до 66 кВт, что позволило рассчитать проектное потребление электроэнергии с учётом снижения мощности воздуходувок, которая составила 2458,16 тыс. кВт·ч.

Таким образом, использование аэраторов «Бакор» обеспечит более эффективную очистку сточных вод при минимальных затратах электроэнергии. Сокращение затрат на электроэнергию возможно благодаря уменьшению расхода воздуха и, как следствие, снижению мощности воздуходувок.

Конструкция керамического аэратора НТЦ «Бакор» напоминает классическую конструкцию фильтросных плит – первых и самых массовых керамических аэраторов систем биохимической очистки (рисунок 11.37) [116].



1 – анкер из нержавеющей стали; 2 – керамическая пластина; 3 – удерживающий зажим из нержавеющей стали; 4 – воздушное выпускное отверстие; 5 – рукавный переходник из ПВХ; 6 – зажим из нержавеющей стали; 7 – воздухопровод; 8 – дополнительный вспомогательный воздухопровод

Рисунок 11.37 – Типичный керамический пластинчатый аэратор [116]

Следует отметить, что купольные керамические аэраторы широко производятся и применяются до настоящего времени на очистных сооружениях США, причем не только для подачи воздуха в аэротенки в диспергированном виде – пузырьках, но и для ввода озоновоздушной смеси в контрактные камеры сооружений водоподготовки. На рисунке 11.38 представлены купольные керамические аэраторы и схема их работы.

Керамические пористые аэраторы до сих пор востребованы, несмотря на их очевидные недостатки – низкую прочность, склонность к биообразстванию и колыммации пор, благодаря их относительно низкой стоимости и, при этом, стойкости к агрессивным средам. Так, всемирно известной корпорацией Pall под торговой маркой Brandol® производятся более 50 лет трубчатые пористые аэраторы из чистого кварцевого песка на органической связке (рисунок 11.39).

С 1979 по 1987 г. такие аэраторы, выпускавшиеся в то время фирмой Schumacher GmbH, были установлены в контактной камере озонирования ПО «Минскводоканал». В таблице 11.7 представлены основные технические характеристики аэраторов Brandol®.



Рисунок 11.38 – Пористые купольные керамические аэраторы (Spartan Environmental Technologies, LLC, США) и схема их работы

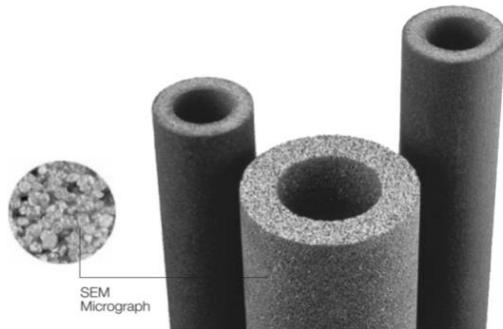


Рисунок 11.39 – Пористые трубчатые керамические аэраторы Brandol®

*Таблица 11.7 – Технические характеристики аэраторов Brandol®*

| Показатель  | BR 60    | BR 120 |
|---|----------|--------|
| Средний размер пор, мкм   | 75       | 200    |
| Пористость, %   | 32       | 30     |
| Сопротивление (воздух в воду) при подаче воздуха $8 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м})$ , мбар | 20       | 12     |
| Максимальная подача воздуха, $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м})$                               | $\pm 40$ |        |
| Рекомендуемая подача воздуха, $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м})$                              | 8–12     |        |
| Минимальная подача воздуха, $\text{м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м})$                                | 2,3      |        |
| Усилие сжатия хомута, МПа   | > 12     |        |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>  | 1,6      |        |
| Максимальная рабочая температура, °C  | 130      |        |
| Размеры ( $D_{\text{н}}/D_{\text{вн}}$ ), мм  | 70/40    |        |

Оригинальную конструкцию пористых полусферических аэраторов из порошка титана разработали и производят специалисты из Китая (рисунок 11.40) [117].



Рисунок 11.40 – Пористые полусферические аэраторы из порошка титана [117]

Особенностью конструкции данных аэраторов является титановый корпус и соединение полусферического пористого элемента с дисковым корпусом сваркой, что не всегда целесообразно с точки зрения регенерации и ремонта в процессе эксплуатации. В таблице 11.8 приведены технические характеристики полусферических аэраторов.

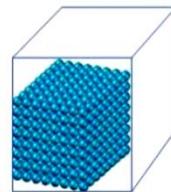
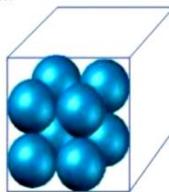
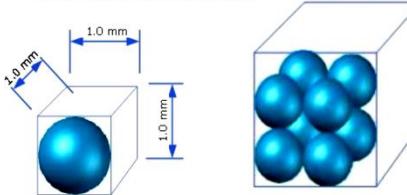
*Таблица 11.8 – Технические характеристики полусферических пористых титановых аэраторов [117]*

| Диаметр, мм | Высота, мм | Резьба | Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч | Площадь аэрации, м <sup>2</sup> |
|-------------|------------|--------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 110         | 55         | “1/2   | 1,0–1,5                           | 0,15–0,31                       |
| 150         | 58         | “1/2   | 1,3–2,5                           | 0,21–0,51                       |
| 180         | 62         | “1/2   | 2,1–3,2                           | 0,25–0,72                       |

По утверждению разработчиков, полусферическая форма пористого элемента аэратора позволяет сформировать факел пузырьков газа в жидкости диаметром заметно больше диаметра основания аэратора, что дает возможность меньшим, по сравнению с дисковыми, числом аэраторов охватить всю площадь аэротенка или контактной камеры без ухудшения насыщения воды газом. Это хорошо видно из крайнего правого столбца таблицы 11.8.

Для расчетов параметров массообмена и растворения газа в воде полезным является рисунок 11.41 [119].

**Ozone Bubble Size Calculation:**



|                  |                        |
|------------------|------------------------|
| <b>Cube</b>      | : 1.0 mm <sup>3</sup>  |
| Bubble Dia       | : 1.0 mm               |
| Nos. of bubbles: | 1.0 no.                |
| Surface Area     | : 3.14 mm <sup>2</sup> |
| Total S. Area    | : 3.14 mm <sup>2</sup> |

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| <b>Cube</b>      | : 1.0 mm <sup>3</sup>   |
| Bubble Dia       | : 0.5 mm                |
| Nos. of bubbles: | 8.0 no.                 |
| Surface Area     | : 0.786 mm <sup>2</sup> |
| Total S. Area    | : 6.29 mm <sup>2</sup>  |

|                  |                          |
|------------------|--------------------------|
| <b>Cube</b>      | : 1.0 mm <sup>3</sup>    |
| Bubble Dia       | : 0.1 mm                 |
| Nos. of bubbles: | 1,000.0 no.              |
| Surface Area     | : 0.0314 mm <sup>2</sup> |
| Total S. Area    | : 31.43 mm <sup>2</sup>  |

Рисунок 11.41 – Соотношение размеров пузырьков и поверхности массообмена при расчете размера пузырьков [118]

## **12 ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ДИСПЕРСНЫЕ ЗАСЫПКИ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ В ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ**

---

### **12.1 Пористые материалы фильтров и аэраторов**

**П**ористые материалы (металлические и полимерные сетки, объёмно-пористые полимеры и керамика, спеченные порошковые металлические материалы и др.) широко используются в установках и сооружениях водоподготовки в качестве картриджей фильтров грубой и тонкой очистки воды от механических загрязнений; элементов дренажа насыпных фильтров; аэраторов реакторов флотационной очистки и обезжелезивания; аэраторов для ввода озона-воздушной смеси в воду при ее финальной очистке и обеззараживании. Диапазон структурных характеристик указанных пористых материалов (ПМ) достаточно широк: размеры пор – от микрометров до миллиметров; пористость объемная и поверхностная – от 24–30 до 60–70 %. Предельные рабочие температуры и допустимый перепад давления также находятся в широких пределах, определяемых, в первую очередь, характеристиками исходного сырья. Стоимость ПМ также может сильно отличаться.

В данной главе приведен анализ свойств ПМ, фильтров и аэраторов из них, разработаны обоснованные рекомендации по их предпочтительному применению. Исследования проводились как путем анализа научно-технической литературы, так и на основании собственного многолетнего опыта работы по созданию ПМ и изделий для очистки воды.

**Сетки, сетчатые фильтрующие и дренажные элементы** из них – наиболее простые и относительно недорогие ПМ. Они, как правило, выполнены из коррозионно-стойкой стали (рисунок 12.1). Размер ячеек подбирается так, чтобы они не препятствовали потоку воды, но задерживали крупные загрязнения. Плюс таких фильтров – относительная дешевизна и возможность регенерации. Для промывки сетки достаточно пустить обратный поток чистой воды. После очистки эффективность фильтрации приближается к первоначальному уровню. На сетках реализуется режим поверхностной фильтрации. Известны многослойные сетчатые фильтроэлементы, в которых размер ячеек изменяется от слоя к слою, что позволяет повысить эффективность путем объёмной фильтрации. Однако такие градиентные сетчатые многослойные ПМ существенно дороже однослойных. В зависимости от типа переплетения нержавеющая тканая сетка может быть:

- саржевая двустороннего плетения – переплетаются (через одну и две) с проволоками основы расположенные друг к другу впритык нити утка (данный тип плетения иногда называют «голландским плетением»);
- полотняная – переплетаются с проволоками основы (через одну) нити утка;
- саржевая одностороннего плетения – с нитями основы переплетаются (через две) проволоки утка.

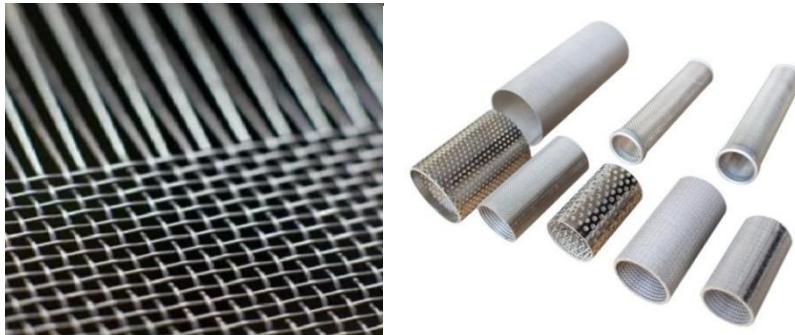


Рисунок 12.1 – Сетка из коррозионно-стойкой стали и пористые элементы из нее

В таблице 12.1 приведены характеристики тканых проволочных фильтровых сеток, составленные на основе ГОСТ 3187-76 и данных производителей.

*Таблица 12.1 – Характеристики тканых проволочных фильтровых сеток*

| Номер сетки | Тонкость фильтрации / номинальная тонкость фильтрации, мкм | Диаметр проволоки основы, мм | Диаметр проволоки утка, мм | Теоретическая масса 1 м <sup>2</sup> сетки |
|-------------|--|------------------------------|----------------------------|--|
| П24         | 350 / 400  | 0,7                          | 0,4                        | 3,49                                       |
| П28         | 330 / 340  | 0,6                          | 0,4                        | 3,39                                       |
| П32         | 300 / 320  | 0,6                          | 0,4                        | 3,47                                       |
| П36         | 260 / 315  | 0,5                          | 0,4                        | 3,33                                       |
| П40         | 245 / 310  | 0,5                          | 0,35                       | 3,18                                       |
| П48         | 210 / 280  | 0,45                         | 0,3                        | 2,63                                       |
| П52         | 200 / 250  | 0,45                         | 0,28                       | 2,64                                       |
| П56         | 180 / 230  | 0,4                          | 0,28                       | 2,54                                       |
| П60         | 170 / 215  | 0,4                          | 0,28                       | 2,58                                       |
| П64         | 160 / 195  | 0,35                         | 0,22                       | 2,03                                       |
| П68         | 165 / 190  | 0,35                         | 0,22                       | 2,07                                       |
| П72         | 140 / 150  | 0,3                          | 0,2                        | 1,82                                       |
| П76         | 135 / 140  | 0,3                          | 0,2                        | 1,83                                       |

Как видно из таблицы 12.1, тонкость фильтрации сеток находится в пределах 140–400 мкм, что определяет их использование преимущественно в системах предварительной грубой очистки. Поэтому одно из самых массовых их применений – очистка уже подготовленной водопроводной воды перед счетчиками в квартирах и индивидуальных домах, предохранение механических счетчиков не только от повреждений, но и от занижения показаний вследствие попадания продуктов коррозии трубопроводов и арматуры.

Получили распространение сетки галунного плетения из полиамида 6 или полиэфира (рисунок 12.2), которые чаще всего используются в скважинных фильтрах для первичной очистки подземных вод от песка и мелко-зернистых минеральных частиц. Недостаток полимерных сеток – невысокие рабочее давление и температура, а главное преимущество – низкая цена по сравнению с металлическими.



Рисунок 12.2 – Полимерные фильтрующие сетки галунного плетения

Галунное плетение представляет собой двойное плетение нитей с основой. В результате этого улучшаются фильтрующие способности сетки, так как ячейки не видны на просвет, при этом без уменьшения протока воды.

**Пористые волокнистые полимерные материалы (ПВПМ)** отличаются от сетчатых объемным режимом фильтрации, возможностью формирования градиентной пористой структуры [110–113]. В Институте механики металлокомпозитных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси (ИММС НАН Беларуси) разработаны технология и оборудование аэродинамического распыления расплава полимеров (*meltblowing*) для производства ПВПМ, фильтрующих элементов и аэраторов из них, имеющих волокнистую пористую структуру (рисунок 12.3) [110–113]. В качестве сырья для их производства используются термопластичные полимеры, такие как полипропилен, полиэтилен, полиамид и некоторые другие.

Изначально ПВПМ использовались для тонкой фильтрации газовых сред благодаря тому, что могут иметь электретный заряд, содержать магнитные и адсорбционно-активные наполнители. Однако впоследствии они также нашли применение для очистки скважинной воды от железосодержащих примесей; для очистки пищевых жидкостей, в том числе молока, от механи-

ческих загрязнений, микробных и соматических клеток с достижением показателей качества молока «Экстра». В 80–90-е гг. ХХ в. дисковые и трубчатые ПВПМ широко использовались в качестве аэраторов систем биохимической очистки сточных вод [112, 113].

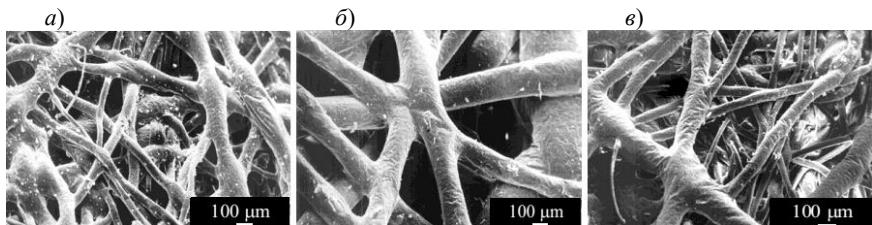


Рисунок 12.3 – Электронно-микроскопические изображения ПВПМ на основе ПЭВД: *а* – пористость  $\Pi = 28\%$ ; *б* –  $\Pi = 39\%$ ; *в* –  $\Pi = 46\%$  [113]

В ИММС НАН Беларуси разработана оригинальная технология получения волокнисто-пористого материала «Грифтекс» из политетрафторэтилена (ПТФЭ) методом лазерной абляции [119]. Материал состоит из коротких волокон средним диаметром 10–15 мкм и длиной 0,2–2 мм. Тонкость фильтрации – до 1 мкм. Пористость составляет 85–90 % (рисунок 12.4).

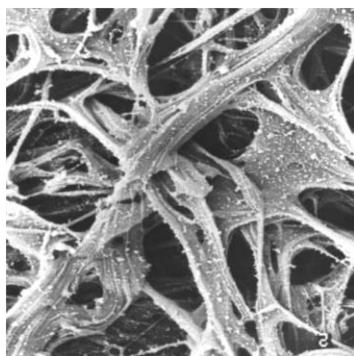


Рисунок 12.4 – Электронно-микроскопические изображения ПВПМ на основе

ПТФЭ «Грифтекс» [119]

Производится в виде ваты и фетра. Материал «Грифтекс» обладает малой адсорбционной памятью, гидрофобностью (лиофильностью), стойкостью к агрессивным жидкостям и газам, УФ-излучению, высокой термостойкостью. По химическим и термическим свойствам полностью соответствует исходному ПТФЭ. «Грифтекс» применяется в качестве фильтровального материала при изготовлении различного фильтрующего оборудования, работающего в интервале температур от –196 до +260 °C.

Изначально ПМ «Грифтекс» был предназначен для очистки и осушки воздуха и технологических газов, сепарации капельной влаги. Затем подтвердил свою эффективность при тонкой очистке технологических жидкостей и смазок, а в последствии – и воды.

**Пористая фильтрующая керамика** занимает значимое место среди разработок Института общей и неорганической химии НАН Беларуси [120].

В качестве исходных материалов используют недорогое и доступное сырье: кварцевые пески марок ВС-020 и ВС-030 ГОСТ 22551-77 (силикаты), продукты размоля фарфорового боя (алюмосиликаты), в которых содержится до 68,1 %  $\text{SiO}_2$  и 23,6 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [120, 121]. На рисунке 12.5 представлена микроструктура такого пористого керамического трубчатого фильтроэлемента.

Пористые керамические элементы также производят из электрокорунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), каолина, глинозема, другого минерального или синтезированного дисперсного сырья [121–123], а также стеклокерамики [124].

Наиболее распространенным типом мелкопузырчатого аэратора является уже более 100 лет фильтросная пластина размером 300×300 мм и толщиной 35 мм, изготавливаемая из шамота на связке жидкого стекла с мелкой шамотной пылью или из кварцевого песка и кокса на связке бакелитовой смолы. Структура этого пористого материала представлена на рисунке 12.6 [40].



Рисунок 12.5 – Микроструктура пористой проницаемой керамики [121]

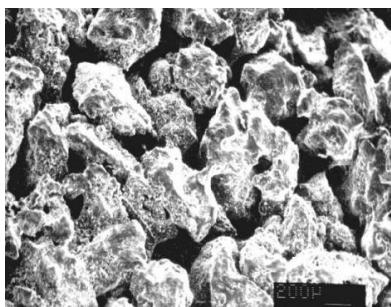


Рисунок 12.6 – Поверхность фильтросной плиты [40] (увеличение ×50)

**Пористые материалы из порошков металлов.** В технологии водоподготовки используют для получения пористых элементов, как правило, два исходных порошка – коррозионно-стойких сталей и титана [40] (рисунок 12.7). Первый вариант предпочитают зарубежные производители, второй – отечественные. Причины такого разделения – массовое промышленное производство на Западе распыленных порошков коррозионно-стойких сталей, в первую очередь – марки 316L, разрешенной к использованию в оборудовании пищевой и фармацевтической промышленности, в медицине, а также высокая цена порошков титана и титановых сплавов, которые производятся преимущественно сферической формы. В России и Украине, наоборот, со времен СССР, освоено промышленное производство губчатых порошков титана, обладающих хорошей прессуемостью и являющихся промежуточным продуктом магний-термического восстановления – титановой губки, которую затем измельчают и подвергают рассеву на фракции. В пользу титана в очистке воды свидетельствует и слабый бактерицидный эффект ок-

сида титана на его поверхности [40] – напоминающий действие ионов серебра. Благодаря этому эффекту титановые пористые элементы меньше подвержены биообразтанию, повышают степень очистки воды по сравнению с иными пористыми элементами.

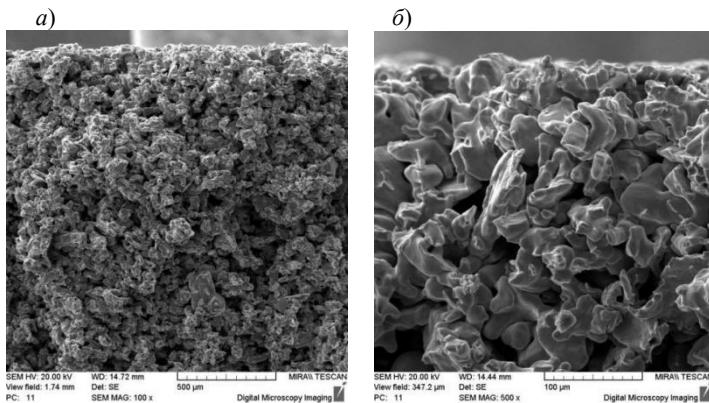


Рисунок 12.7 – Микроструктура пористого элемента из порошка стали 316L (а) и из порошка губчатого титана (б)

Некоторое время для получения пористых дисков аэраторов сточных вод использовали распыленный порошок бронзы марки БрОФ 10-1 [40].

Нами проведены исследования всех трех, указанных выше, типов пористых материалов, результаты которых приведены далее.

Пористые диски из порошков титана и коррозионно-стойкой стали изготавливали традиционными методами порошковой металлургии – прессованием в металлической пресс-форме и спеканием в вакууме. Пористые диски из порошка бронзы получали спеканием свободно насыпанного порошка в форму из коррозионно-стойкой стали в атмосфере диссоциированного аммиака. В таблице 12.2 представлены свойства порошков трех указанных металлов и спеченных из них пористых материалов.

На рисунке 12.8 показана зависимость максимального и среднего размеров пор от размера частиц порошков исследованных металлов. Как видно из рисунка 12.8, для бронзы, полученной спеканием со свободной насыпкой, эта зависимость практически прямо пропорциональна, в то время как для стали и титана, получаемых прессованием и спеканием, указанная зависимость близка к функции вида  $D_{\text{пор}} = k \text{Arsh } D_{\text{част}}$ , где  $k$  – некоторый коэффициент, а  $\text{Arsh}$  – функция, обратная гиперболическому синусу.

На рисунке 12.9 представлена зависимость коэффициента проницаемости от среднего размера пор для трех указанных выше металлических материалов.

Таблица 12.2 – Свойства исходных порошков и пористых элементов из них

| Размеры частиц $D_q$ , мм        | Фактор формы FF | Удельная поверхность $S_s$ , $\text{м}^2/\text{м}^3$ | Пористость $\Pi$ , отн. ед. | Размеры пор, мкм |          | Коэффициент проницаемости $K \cdot 10^{13}$ , $\text{м}^2$ | Предел прочности при растяжении, МПа |
|----------------------------------|-----------------|--|-----------------------------|------------------|----------|--|--------------------------------------|
|                                  |                 |  |                             | $D_{\max}$       | $D_{cp}$ |  |                                      |
| Титан ТПП                        |                 |  |                             |                  |          |  |                                      |
| -0,1+0,063                       | 0,40            | 1785400  | 0,35–0,38                   | 22–30            | 13–20    | 9–26   | 70–90                                |
| -0,16+0,1                        | 0,36            | 1215000  | 0,36–0,39                   | 36–45            | 22–27    | 14–33  |                                      |
| -0,2+0,16                        | 0,35            | 832650   | 0,36–0,39                   | 49–60            | 32–41    | 57–80  |                                      |
| -0,315+0,2                       | 0,33            | 589360   | 0,37–0,40                   | 63–80            | 47–60    | 85–50  |                                      |
| -0,4+0,315                       | 0,32            | 334325   | 0,38–0,41                   | 86–105           | 64–75    | 160–205  |                                      |
| -0,63+0,4                        | 0,31            | 288190   | 0,38–0,41                   | 86–105           | 64–75    | 160–205  |                                      |
| Коррозионно-стойкая сталь X18H15 |                 |  |                             |                  |          |  |                                      |
| -0,1+0,063                       | 0,62            | 291944   | 0,27–0,31                   | 12–18            | 7–11     | 4–7  | 60–70                                |
| -0,16+0,1                        | 0,62            | 259317   | 0,29–0,32                   | 19–28            | 12–15    | 8–4  |                                      |
| -0,2+0,16                        | 0,63            | 217252   | 0,30–0,33                   | 27–34            | 16–19    | 13–19  |                                      |
| -0,315+0,2                       | 0,65            | 172440   | 0,30–0,33                   | 33–46            | 20–27    | 18–26  |                                      |
| Бронза Бр ОФ 10-1                |                 |  |                             |                  |          |  |                                      |
| -0,1+0,063                       | 0,93            | 188985   | 0,31–0,33                   | 33–40            | 25–30    | 50–60  | 30–40                                |
| -0,16+0,1                        | 0,92            | 98333  | 0,32–0,34                   | 50–58            | 43–47    | 100–110  |                                      |
| -0,2+0,16                        | 0,93            | 95040  | 0,34–0,35                   | 60–80            | 55–58    | 120–160  |                                      |
| -0,315+0,2                       | 0,94            | 56320  | 0,35–0,36                   | 94–98            | 73–79    | 250–395  |                                      |
| -0,4+0,315                       | 0,95            | 38676  | 0,35–0,36                   | 131–140          | 109–116  | 643–700  |                                      |
| -0,63+0,4                        | 0,94            | 33060  | 0,35–0,37                   | 179–190          | 151–166  | 695–929  |                                      |

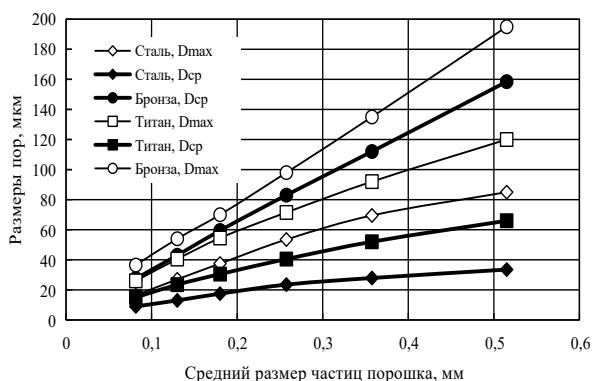


Рисунок 12.8 – Зависимости размеров пор от размеров частиц порошков пористых материалов

Как видно из рисунка 12.8 их гидравлическое сопротивление сопоставимо друг с другом, однако у пористого титана при равном размере пор (а значит и при близком размере генерируемых пузырьков) сопротивление меньше, чем у коррозионно-стойкой пористой стали, но больше, чем у со-

противления пористой бронзы. Такая зависимость связана с меньшей, чем у титана, пористостью исследованных образцов стали, и более гладкой поверхностью частиц порошка бронзы (см. таблицу 12.2).

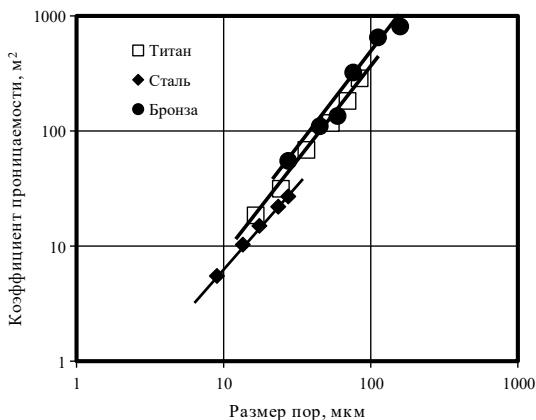


Рисунок 12.9 – Зависимость коэффициента проницаемости от среднего размера пор пористых элементов из порошков титана, коррозионно-стойкой стали и бронзы

В Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ИПМ НАН Беларусь) разработан ряд процессов формования и спекания трубчатых и плоских пористых элементов из порошка губчатого титана, распыленного порошка коррозионно-стойкой стали, которые более 40 лет успешно применяются в качестве фильтроэлементов и аэраторов в разных установках и сооружениях очистки питьевой и технической воды (рисунок 12.10).



Рисунок 12.10 – Пористые элементы фильтров и аэраторов из порошков титана и коррозионно-стойкой стали, разработанные и выпускаемые в Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа

Решающим преимуществом пористых титановых элементов при фильтрации и аэрации питьевой воды является их радикально большой (до 16–18 лет по опыту эксплуатации на предприятии речного водозабора ПО

«Минскводоканал» [125]) срок службы до замены, который нивелирует относительно высокую их цену по сравнению с аналогами из керамики и полимеров.

В распоряжении специалистов – разработчиков систем водоподготовки, специалистов, эксплуатирующих сооружения и установки очистки воды, имеется широкий выбор пористых материалов из порошков металлов, фильтрующих элементов и аэраторов различной цены и технических характеристик, который может удовлетворить всем современным требованиям.

## 12.2 Дисперсная загрузка засыпных фильтров

Фильтрация воды с поверхности к водоносным подземным пластам через дисперсную структуру почвы (песок, гравий и т. п.) позволяет природе накапливать в них значительные объемы пригодной для питья воды. По этим причинам медленные и скорые фильтры с дисперсными фильтрующими загрузками являются аналогами природных процессов фильтрации.

В работе [126] приведен исторический анализ фильтрации в процессах очистки и подготовки воды:

- фильтры из песка и гравия применялись в Индии за 2000 лет до н. э.;
- римляне рыли каналы рядом с озёрами, чтобы воспользоваться естественной фильтрацией через стенки каналов;
- коммерческое фильтрование воды через песок появилось во Франции около 1750 г.;
- фильтрование в муниципальной системе водоснабжения стало применяться в Соединённом королевстве на рубеже XVIII–XIX вв.;
- первая система медленных песчаных фильтров современного типа появилась в Лондоне в 1829 г.;
- скорые фильтры появляются в США в 1880-х;
- первая муниципальная установка с коагуляцией и фильтрацией – Сомервиль, Нью-Джерси, 1885 г.;
- «Surface water treatment rule» 1989 года – первый нормативный документ, предписывающий обязательное применение фильтрования при очистке воды в США.

Фильтрующая загрузка является основным рабочим элементом фильтровальных сооружений, поэтому правильный выбор ее параметров имеет первостепенное значение для их нормальной работы. При работе фильтрующего материала основополагающими являются его стоимость, возможность получения в районе строительства данного фильтровального комплекса и соблюдение определенных технических требований, к числу которых относятся: определенные фракционный состав загрузки и степень однородности размеров ее зерен; механическая прочность; химическая стойкость материалов по отношению к фильтруемой воде [55].

Степень однородности размеров зерен, фильтрующей загрузки и ее фракционный состав существенно влияют на работу фильтра. Использование более крупного фильтрующего материала, чем это предусмотрено, влечет снижение качества фильтрата. Использование более мелкого фильтрующего материала вызывает уменьшение фильтроцикла, перерасход промывной воды и удорожание эксплуатационной стоимости очистки воды. Использование фильтрующих материалов с большой степенью неоднородности по величине зерен, превышающей допустимые пределы, ухудшает условия их промывки, так как вынос верхних мелких фракций начнется раньше, чем придет в движение основная масса зерен загрузки. Это вызывает необходимость снижения интенсивности промывки, чтобы прекратить вынос мелких фракций. При этом значительная часть фильтрующего слоя будет промыта недостаточно. Кроме ухудшения условий промывки загрузки, применение весьма неоднородного по крупности фильтрующего материала вызывает ухудшение условий фильтрования из-за образования поверхностной фильтрующей пленки.

Однородность и крупность фильтрующего материала определяют ситовым анализом путем просеивания навески материала через ряд калиброванных сит. Калибр сита определяется диаметром шара, равновеликого по объему наиболее крупным зернам фильтрующего материала, проходящим еще через данное сито. Для определения зернового состава и однородности из партии фильтрующего материала отбирают среднюю пробу в количестве 300 г и высушивают до постоянного веса при температуре 105 °С. Из этого количества высшенного материала берут навеску 200 г (взвешенную с точностью до 0,01 г) и рассеивают на наборе калиброванных сит. Остатки на ситах взвешивают и записывают по форме, приведенной в таблице 12.3 [55].

По данным таблицы 12.3 можно построить график ситового анализа фильтрующего материала, по которому можно определить основные показатели фильтрующей загрузки: эквивалентный диаметр зерен, который имеет важное значение при расчете фильтрующей загрузки; параметры, определяющие коэффициент неоднородности фильтрующей загрузки, а именно: 10%-й калибр зерен материала, равный такому калибру сита, через который прошло 10 % (по массе) просеиваемого материала, и 80%-й калибр, равный такому калибру сита, через который прошло при просеивании 80 % зерен (по массе) [55].

Важным показателем качества фильтрующего материала является его механическая прочность. При истирании и измельчении материала происходит повышение гидравлического сопротивления верхнего слоя фильтрующей загрузки из-за забивания мелочью и вынос измельченных зерен с промывной водой, т. е. безвозвратная потеря фильтрующего материала. Механическую прочность фильтрующих материалов оценивают двумя показателями: истираемостью (т. е. процентом износа материала вследствие тре-

ния зерен друг о друга во время промывок – до 0,5) и измельчаемостью (процентом износа вследствие растрескивания зерен – до 4,0).

**Таблица 12.3 – Пример записи результатов ситового анализа фильтрующего материала**

| Размер ячеек сита, мм | Осталось на сите |      | Прошло через сито |      |
|-----------------------|------------------|------|-------------------|------|
|                       | г                | %    | г                 | %    |
| 0,25                  | 18               | 9,0  | 1                 | 0,05 |
| 0,41                  | 12               | 6,0  | 19                | 9,5  |
| 0,56                  | 71               | 35,5 | 29                | 14,5 |
| 0,68                  | 60               | 30,0 | 129               | 64,5 |
| 0,80                  | 18               | 9,0  | 159               | 79,5 |
| 0,94                  | 11               | 5,5  | 174               | 87,0 |
| 1,01                  | 6                | 3,0  | 187               | 93,5 |
| 1,28                  | 2                | 1,0  | 198               | 99,0 |

Важным требованием, предъявляемым к качеству фильтрующих материалов, является их химическая стойкость по отношению к фильтруемой воде, т. е. чтобы она не обогащалась веществами, вредными для здоровья людей (в питьевых водопроводах) для технологии того производства, где она используется. Фильтрующий материал считается химически стойким, если он дает прирост растворенного остатка не более 20 мг/л, окисляемости – 10 мг О<sub>2</sub>/л и кремниевой кислоты – 10 мг/л.

Кроме вышеизложенных технических требований фильтрующие материалы, используемые в хозяйственно-питьевом водоснабжении, проходят санитарно-гигиеническую оценку на микроэлементы, переходящие из материала в воду (бериллий, молибден, мышьяк, алюминий, хром, кобальт, свинец, серебро, марганец, медь, цинк, железо, стронций).

Наиболее распространенным фильтрующим материалом является кварцевый песок – речной или карьерный. Кварцевый песок при небольшом содержании примесей известняка отвечает всем вышеперечисленным требованиям, предъявляемым к фильтрующим материалам. Наряду с песком применяют антрацит, керамзит, горелые породы, шунгизит, вулканические и доменные шлаки, гранодиорит, пенополистирол и др. [55].

Зерна дробленого антрацита имеют меньшую плотность, чем кварцевый песок, и поэтому его обычно используют в качестве верхнего слоя загрузки двухслойных фильтров. Предъявляемым требованиям по механической прочности и химической стойкости удовлетворяет антрацит классов АП – антрацитовая плита, АК – кулак и АС – мытое семечко.

Важнейшими характеристиками фильтрующих материалов являются межчастичная пористость засыпки  $n$ , форма зерен и плотность  $\rho$ . Зерна угловатой формы, имеющие шероховатую поверхность, характеризуются повышенным эффектом адсорбции примесей, а большая пористость засыпки

обеспечивает меньшее гидравлическое сопротивление фильтрующей загрузки. Плотность зерен фильтрующего материала определяет необходимую интенсивность промывки фильтрующей загрузки, а также определяет технологический режим работы контактных осветлителей. Межчастичную пористость засыпки определяют по формуле  $n = m/(\rho V) - 1$ , где  $m$  – масса отмытого и отсортированного материала, имеющего объем  $V$ . Форма зерен загрузки оценивается коэффициентом формы  $a$ , представляющим отношение поверхности зерна к поверхности равновеликого по объему шара. Коэффициент формы зерен реальных загрузок всегда больше единицы.

В таблице 12.4 приведены характеристики некоторых дисперсных фильтрующих материалов [55].

**Таблица 12.4 – Характеристики некоторых дисперсных фильтрующих материалов**

| Вид материала                       | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Пористость загрузки, % | Коэффициент формы зерен |
|-------------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Кварцевый песок                     | 2,6–2,65                     | 40–42                  | 1,17                    |
| Антрацит дробленый                  | 1,6–1,7                      | 45                     | 1,5                     |
| Керамзит дробленый                  | 1,2–1,5                      | 58–62                  | 1,7–2,5                 |
| Керамзит недробленый                | 1,7–1,8                      | 45                     | 1,3                     |
| Горелые породы                      | 2,4–2,5                      | 52                     | 2                       |
| Вулканические шлаки Армении:        |                              |                        |                         |
| – мастара                           | 11,7                         | 64                     | 2,67                    |
| – ангехакот                         | 2,4                          | 54                     | 1,98                    |
| Шунгизит дробленый                  | 1,5–1,8                      | 56–58                  | 1,7–2,0                 |
| Доменные шлаки                      | 2,6                          | 42–44                  | –                       |
| Шлаки медно-никелевого производства | 3,2                          | 48                     | –                       |
| Пенополиэтилол                      | 0,1–0,2                      | 41–43                  | 1,05–1,1                |

Керамзит представляет гранулированный пористый материал, получаемый обжигом глинистого сырья в специальных печах. Необходимые для загрузки водоочистных фильтров фракции керамзита могут быть получены либо отсевом из общей массы неоднородного керамзита, либо дроблением крупных гранул с последующим отсевом нужных фракций. Зерна дробленого керамзита имеют более развитую поверхность и соответственно лучшие фильтрующие свойства по сравнению с окатанными зернами недробленого керамзита.

Горелые породы представляют метаморфизированные угленосные породы, подвергнутые обжигу при подземных пожарах. Необходимые фракции этого материала получают его дроблением с последующей сортировкой.

Вулканические шлаки – материалы, образовавшиеся в результате скопления газов в жидкой остывающей лаве. В Закавказье вулканические шлаки

залегают как в виде сыпучих материалов, так и в виде смеси щебня и песка. Свойства вулканических шлаков разных месторождений различны.

Шунгизит получают путем обжига природного малоугленосного материала шунгита, который по свойствам близок к дробленому керамзиту.

В качестве фильтрующих материалов можно использовать отходы промышленных производств: доменные шлаки и шлаки медно-никелевого производства. Достоинством шлаков является то, что они обычно имеют фракционный состав, близкий к тому, который требуется для загрузки фильтровальных аппаратов.

В качестве фильтрующего материала на фильтрах с плавающей загрузкой используют пенополистирол. Этот зернистый материал получают вслушиванием в результате тепловой обработки исходного полистирольного бисера, выпускавшегося химической промышленностью. При всепенивании получают плавающие в воде зерна, имеющие плотность от 100 до 200 кг/м<sup>3</sup>.

Полимерные загрузки нашли широкое применение для доочистки производственных сточных вод, содержащих мелкодисперсные взвешенные вещества, эмульгированные масла, смолы и нефтепродукты. Фильтры с такой загрузкой устанавливают после отстойников, флотаторов, аэротенков биологической очистки, перед выпуском их в водные объекты или подачей на повторное использование [127].

Указанные фильтрующие материалы не охватывают всего многообразия местных фильтрующих материалов, предложенных в последние годы. Имеются данные о применении аглопорита, фарфоровой крошки, гранодиорита, габбродиабаза, граната и т. д. [128–131].

Находят применение активные фильтрующие материалы, которые благодаря своим свойствам могут извлекать из воды не только взвешенные и коллоидные примеси, но и истинно растворенные загрязнения. Так, для стабилизационной обработки воды применяют мраморную крошку и магногруппу. Все более широко применяют активные угли для извлечения из воды веществ, обуславливающих привкусы и запахи. Применяют природный ионообменный материал клиноптиолит для удаления из воды растворенных соединений фтора и азота. Однако доступность и дешевизна этого материала позволяют все более широко применять его в качестве загрузки фильтровальных аппаратов.

Поддерживающие слои способствуют более равномерному распределению промывной воды по площади фильтра и поддерживают фильтрующую загрузку. В качестве поддерживающих слоев применяют гравий или щебень изверженных пород; примесь зерен известняка в них допускается не более 15 %, а примесь зерен мела недопустима.

При наличии дренажных трубчатых систем, располагаемых в слоях гравия, СНиП 2.04.02-84 рекомендует принимать следующий фракционный состав и высоту поддерживающих слоев (таблица 12.5) [55].

Таблица 12.5 – Размеры частиц засыпки и рекомендуемая высота слоев

| Пределы крупности зерен в слое, мм | Высота слоя, мм   |
|------------------------------------|---|
| 40–20                              | Верхняя граница слоя должна быть на 100 мм выше отверстий распределительной системы |
| 20–40                              | 100–150   |
| 10–5                               | 100–150   |
| 5–2                                | 50–100  |

В настоящее время организован промышленный выпуск готовых фильтрующих загрузок, решающих комплексные задачи водоочистки.

На рынке СНГ доступна фильтрующая загрузка нового поколения ОДМ-5Ф, которая является оптимальным, экономически эффективным решением для комплексного удаления марганца, железа, взвешенных веществ, нефтепродуктов и других загрязнений воды. ОДМ-5Ф рекомендован для применения в качестве основного или одного из компонентов многослойной фильтрующей загрузки (рисунок 12.11). Выпускается в виде гранул фракций 0,5–1,0 мм и 1,0–2,0 мм, активные компоненты которых расположены равномерно по объему гранулы, что не снижает эффективность очистки воды даже в случае разрушения гранулы. Особенно эффективен ОДМ-5Ф при совместном применении с сорбентом ОДМ-2Ф.



Рисунок 12.11 – ОДМ-5Ф – фильтрующая загрузка нового поколения

ОДМ-5Ф не требует для регенерации химических реагентов. Достаточной является периодическая водная или водо-воздушная промывка противотоком очищенной водой. В процессе эксплуатации фильтровальный материал служит длительное время, так как является очень прочным материалом (истираемость – 0,06 %, измельчаемость – 0,14 %). Физико-химические свойства фильтровального материала ОДМ-5Ф полностью отвечают требованиям ГОСТ Р 51641-2000 «Материалы фильтрующие зернистые».

Одно из важных отличий ОДМ-5Ф от других фильтрующих загрузок (типа BIRM, Greensand, «МЖФ» и др.), заключается в том, что его гранулы не покрыты химически активными веществами – они входят в саму структуру гранул. Скорость фильтрации при использовании ОДМ-5Ф составляет от 5 до 12 метров в час. Интенсивность промывки – от 14 до 16 литров в

секунду на квадратный метр площади загрузки, при условии расширения фильтрующей загрузки на 30–35 %. Высота слоя, при котором возможно эффективно использовать ОДМ-5Ф, должна быть от 90 до 180 см разных фракций.

ОДМ-5Ф можно эффективно использовать для удаления из воды  $H_2S$ , Fe, Mn, взвешенных веществ. ОДМ-5Ф ускоряет в присутствии кислорода в воде окисление солей тяжелых металлов, а также органических соединений до нерастворимой формы, которая легко удаляется с поверхности зерен ОДМ-5Ф и межзернового пространства противотоком чистой промывной воды. ОДМ-5Ф работает со всеми видами окислителей: озоном, гипохлоритом натрия и другими, снижает цветность на 70–80 % (автокоагуляция на зерне ОДМ-5Ф), обеспечивает снижение перманганатной окисляемости до 35 %. Технические характеристики и условия эксплуатации засыпки ОДМ-5Ф:

- насыпная плотность,  $kg/m^3$ , – 1250;
- плотность,  $kg/m^3$ , – 3250;
- истираемость, %, – 0,06;
- измельчаемость, %, – 0,14;
- общая пористость, %, – 65;
- коэффициент неоднородности – 1,4–1,6;
- скорость фильтрации,  $m/ch$ , – 10–12;
- интенсивность промывки – 14–16  $l/(c \cdot m^2)$  ( $50–54 m^2/ch$ );
- высота слоя загрузки, см, – 90–180 (в зависимости от высоты фильтра).

Химический состав ОДМ-5Ф:

| $MgO_2$ | $SiO_2$ | $FeO+Fe_2O_3$ | $Al_2O_3$ | $CaO$ | $Na_2O_5, P_2O_5, TiO_2, Cr$ и др. |
|---------|---------|---------------|-----------|-------|------------------------------------|
| 53 %    | 36 %    | 8,5 %         | 0,4 %     | 0,3 % | 1,7 %                              |

Сорбент ОДМ-2Ф производится фракций 0,8–2,0 мм; 0,7–1,5 мм (рисунок 12.12). ОДМ-2Ф – гранулированный автокаталитический алюмосиликатный сорбент нового поколения. Разработан на основе природного минерального сырья – опалкристобалитовой породы (опоки), представляющей лёгкую тонкопористую кремнистую породу, состоящую из окременелых створок диатомовых водорослей с содержанием основного вещества 85–95 % (основные компоненты:  $SiO_2$  до 86 %,  $Fe_2O_3$  не более 3,2 %).



Рисунок 12.12 – Сорбент ОДМ-2Ф

ОДМ-2Ф является прочным материалом, в процессе эксплуатации не расходуется, химически устойчив к окислителям (гипохлорит натрия, перманганат калия, коагулянты, озон и др.), физико-химические свойства сорбента отвечают требованиям ГОСТ Р 51641-2000.

У ОДМ-2Ф развитая удельная поверхность – около 100 м<sup>2</sup>/г. Сорбционная способность ОДМ-2Ф высокая: 1 литр фильтрующего материала способен задержать до 3 г железа (III), 1 г алюминия, 6 г нефтепродуктов или 10 г фенола. Сорбент не обработан химически активными покрытиями на основе марганца или иного каталитически активного металла, что исключает отказ в работе при истощении или смыте данных поверхностей. Каталитически активные компоненты входят в структуру зерна равномерно, обеспечивая эффективную работу даже при разломе зерна. ОДМ-2Ф действует как катализатор окисления в реакциях взаимодействия растворенного кислорода с соединениями железа (II), в результате чего образуется гидроксид железа (III), который является нерастворимым соединением и легко удаляется обратным током воды. В процессе прохождения воды через фильтрующий материал на его гранулах формируется плёнка гидроксида железа, которая еще больше повышает сорбционные свойства материала не только по железу, но и по сероводороду, марганцу, алюминию, стронцию, хрому, барнию, тяжелым цветным металлам, фенолу, фтору, радионуклидам. ОДМ-2Ф переводит их в грубодисперсные примеси, которые легко задерживаются в фильтрующем слое. Применяется для очистки всех типов воды от широкого спектра загрязнений, в том числе железа в концентрациях до 50 мг/л, стронция, алюминия, а также нефтепродуктов, фенола, фтора и т. д. Фильтроцикл в среднем превышает в 3–4 раза фильтры с песчаными загрузками.

В таблице 12.6 приведены некоторые свойства других фильтрующих гранулированных материалов, выпускаемых промышленностью и широко используемых в засыпных фильтрах водоподготовки.

В качестве нижнего слоя засыпки часто используют гранулированные активированные угли [132–134], которые применяют для химической и органической адсорбции. Они позволяют удалять такие вещества, как хлор, хлорамин, мышьяк, свинец, а также другие тяжелые металлы и примеси органики. Устраняют неприятные запахи (амиака, сероводорода и др.). Вместе с тем вкусовые качества воды повышаются.

Определяющее влияние на структуру пор активированных углей оказывают исходные материалы для их получения. Активированные угли на основе скорлупы кокосов характеризуются большей долей микропор (размером до 2 нм), на основе каменного угля – большей долей мезопор (2–50 нм). Большая доля макропор (более 50 нм) характерна для активированных углей на основе древесины. Микропоры особенно хорошо подходят для адсорбции молекул небольшого размера, а мезопоры – для адсорбции более крупных органических молекул.

**Таблица 12.6 – Характеристика новых фильтрующих материалов, поставляемых промышленностью**

| Материал загрузки   | Торговая марка                    | Свойства материалов |                 |                    |            |       | Гранулометрический состав, мм |
|---|-----------------------------------|---------------------|-----------------|--------------------|------------|-------|-------------------------------|
|   |                                   | Физико-механические |                 |                    |            |       |                               |
| плотность, кг/м <sup>3</sup>  | насыпная масса, кг/м <sup>3</sup> | измельчаемость, %   | истираемость, % | пористость, % макс |            |       |                               |
| Зернистые фильтрующие материалы:<br>- дробленый кварцевый песок<br>- дробленый песок из серпентинита<br>- циролюзитовый песок | ГРАНКВАРЦ                         | 2650                | 1350            | 2,6 (4,0)          | 0,15(0,5)  | 54    | 0,5–0,8                       |
|   | ГРАН-ФИЛЬТР                       | 2650                | 1450            | 0,75 (4,0)         | 0,15 (0,5) | 50    | 0,5–1,25                      |
|   | ГРАНАКВА                          | 2650                | 1510            | 1,52 (4,0)         | 0,26 (0,5) | 63,7  | 0,5–2                         |
| Зерна дробленого гранита  | Графил                            |                     | 1300–1350       | 1,0                | 0,5        | 45    | 0,6–2                         |
| Антрацит-фильтртант   | Purolat-standart                  | 1200                | 800             | 3,0                | 0,5        | 51    | 0,6–6                         |
| Цеолит-клиноптилит  | ПВАО «Рыстас»                     | 2180–2500           |                 | 0,83–1,13          | 0,07–0,17  | 25–28 | 0,5–3,2                       |
| Гранулированный активированный уголь  | Фильтросорб TL                    | 600                 |                 |                    | 0,75       |       |                               |
| Активированные угли   | WATERLINK Sutcliffe Carbons       | 600–700             |                 |                    |            |       | 0,5–2,5                       |
| Катализитически активный фильтрующий материал   | МЖФ                               |                     | Не более 1400   |                    |            |       | 0,5–1,6                       |

Уголь активированный марки БАУ-А получают из древесного березового угля. Активный уголь БАУ-А имеет очень развитую общую пористость (рисунок 12.13, а), широкий диапазон пор и значительную величину удельной поверхности ( $700\text{--}800 \text{ м}^2/\text{г}$ ). Такие характеристики дают возможность использовать уголь БАУ-А для очистки воды от широкого спектра примесей (от мелких, соизмеримых с молекулами йода до молекул жиров, масел, нефтепродуктов, хлорорганических соединений и др.).

Удаление загрязнителей из воды активированным углеродом происходит по двум механизмам: адсорбция и каталитическое окисление. Органи-

ческие соединения удаляются адсорбцией (это связано с высокой пористостью), а окислители (хлор, хлорамин) – катализитическим окислением.

Уголь активированный марки АКУ производят из скорлупы кокосовых орехов, пористые гранулы имеют удельную поверхность более  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ . Обладает лучшими свойствами среди активированных углей – высокой прочностью и износостойкостью. Способен выдерживать большое количество циклов фильтрации жидкости. Микроструктура активированного угля из скорлупы кокоса представлена на рисунке 12.13, б.

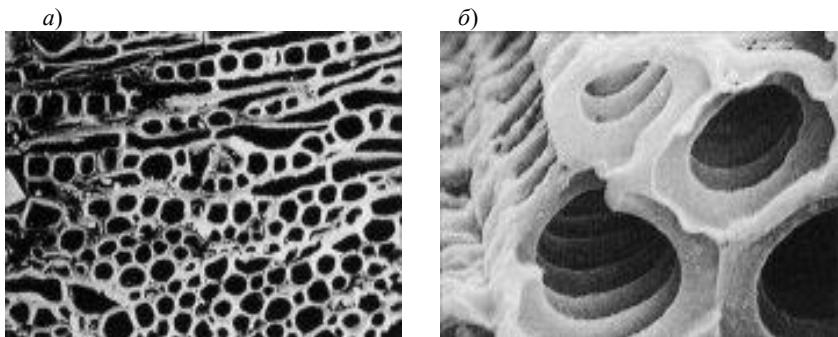


Рисунок 12.13 – Микроструктура угля:  
а – древесного активированного; б – активированного из скорлупы кокоса

Уголь активированный марки АГ-3 производится из угольной пыли – побочного продукта угледобычи. Каменноугольная крошка измельчается, перемешивается со связующим и обрабатывается паром при высоких температурах (выше  $800^\circ\text{C}$ ). Затем формуется в виде цилиндрических гранул диаметром 1,5–2,8 мм. Внутри гранулы формируется система открытых пор, обеспечивающая высокие сорбционные способности материала. Цилиндрическая форма препятствует слеживанию слоя. В сочетании с высокой прочностью каждого зерна это дает возможность создавать фильтрующие слои большой высоты. Активированный уголь АГ-3 содержит огромное количество мезопор (от 2 до 50 нм), поэтому подходит для адсорбции более крупных органических молекул. Обладает удельной поверхностью  $800 \text{ м}^2/\text{г}$ . Микроструктура активированного угля АГ-3 представлена на рисунке 12.14, а. Общий вид гранул угля АГ-3 представлен на рисунке 12.14, б. Подобный вид имеют гранулы и других марок углей (АКУ, БАУ-А).

Поиск новых источников сырья для производства активированных углей ведется по всему миру. Положительные результаты достигнуты учеными и специалистами Азии, Юго-Восточной Азии и Европы при использовании банановой кожуры для получения активированных углей [135, 136]. Помимо утилизации отходов, исследователями подтвержден факт активации уг-

лей из такого сырья при 200 °C, а не при 800–850 °C, как у традиционных углей из древесины, скорлупы кокоса, антрацита.

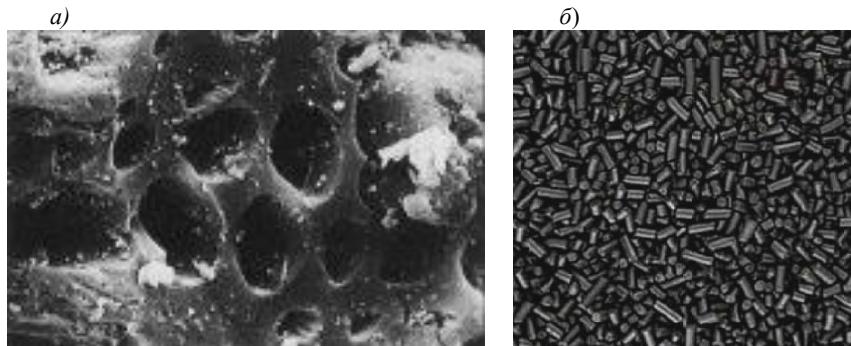


Рисунок 12.14 – Микроструктура (а) и гранулы (б)  
активированного угля АГ-3

Еще одной перспективной тенденцией стал переход от цилиндрических гранул углей диаметром 1,5–3,0 мм к более крупным, но с многоканальной макроструктурой (рисунок 12.15) [137].

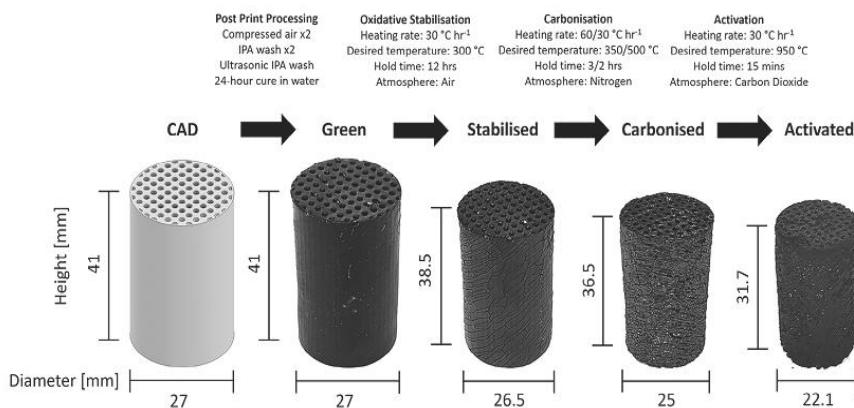


Рисунок 12.15 – Процесс производства гранул активированного угля нового поколения [137]

Очевидны перспективы использования таких гранул в технологии водоподготовки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Приведенные в данной работе цитируемые и оригинальные результаты исследований методов, технологий, материалов, их применения в процессах очистки питьевой, технической и сточной воды, некоторые конструкции аппаратов и сооружений, реализующих данные технологии, безусловно, не претендуют на всеобъемлющую полноту и законченность. Так, в монографии лишь упомянуты реагентные методы очистки воды, сооружения для их реализации, поскольку они достаточно подробно и компетентно описаны учеными и специалистами в ряде известных и широко доступных монографий, в частности, в уже процитированных [41, 44–47, 54–56, 58, 80], а также в [127, 128, 130, 131]. В то же время в работе уделено значительное внимание вопросам аэрации современными конструкциями и материалами пористых аэраторов, их оптимальному выбору. По сравнению с предыдущими публикациями в этой области, в первую очередь [40], внесены актуальные дополнения, сделан ретроспективный анализ эффективности многолетней эксплуатации разработанных отечественных конструкций.

В приложениях приведены обобщенные авторами работ [54, 127] сведения о методах очистки воды и субъективные рекомендации по их оптимальному применению в зависимости от наличия, вида и концентрации загрязнений, требуемого качества воды, которые органично дополняют содержание данной монографии, могут послужить ориентиром в выборе адекватных способов и технических средств водоподготовки.

Авторы будут рады, если данная монография послужит базой для проведения читателями собственных исследований, разработки новых технологических процессов водоподготовки и очистки сточной воды. Авторы надеются на внимание читателей, будут благодарны за конструктивные замечания и пожелания в дальнейшей работе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

- 1 **Михайловская, С. В.** Вода для жизни / С. В. Михайловская // Наука и инновации. – 2005. – № 3. – С. 48–55.
- 2 **Кудина, Е. Ф.** Химия и микробиология воды : учеб. пособие / Е. Ф. Кудина, О. А. Ермолович, Ю. М. Плескачевский ; под ред. Ю. М. Плескачевского, А. С. Неверова ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 335 с.
- 3 **Гусакова, Н. В.** Химия окружающей среды / Н. В. Гусакова. – М. : Социальная защита, 2004. – 192 с. – ISBN 5-222-05386-5.
- 4 **Голдовская, Л. Ф.** Химия окружающей среды / Л. Ф. Голдовская. – М. : Мир, 2005. – 296 с. – ISBN 5-03-003649-0.
- 5 **Буря, А. И.** Вода – свойства, проблемы и методы очистки / А. И. Буря, Е. Ф. Кудина. – Днепропетровск : Пороги, 2006. – 520 с.
- 6 **Возная, Н. Ф.** Химия воды и микробиология / Н. Ф. Возная. – М. : Высш. шк., 1979. – 340 с.
- 7 ГН-3. Гигиенический норматив «Показатели безопасности питьевой воды» : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 25.01.2021 № 37. – Минск, 2021. – С. 187–225.
- 8 **Филончиков, А. В.** Гидросфера / А. В. Филончиков – Кострома : Изд-во КГСХА, 2003. – 152 с.
- 9 **Кульский, Л. И.** Чистая вода и перспективы ее сохранения / Л. И. Кульский, В. В. Даль. – Киев : Наук. думка, 1978. – 157 с.
- 10 **Дугин, Г. В.** Прямое потенциометрическое определение концентрации органических веществ (ХПК) в воде / Г. В. Дугин, А. М. Писаревский, И. П. Полозова // Химия и технология воды. – 1985. – № 4. – С. 51–53.
- 11 **Мосин, О. В.** Вода – главный природный ресурс / О. В. Мосин – СПб., 2008. – URL : <http://www.o8ode.ru>. (дата обращения: 09.01.2010).
- 12 Химия промышленных сточных вод / пер. с англ.; под ред. А. Рубина.– М. : Химия, 1983. – 360 с.
- 13 **Кутолин, С. А.** Химия и микробиология воды : учеб. пособие / С. А. Кутолин, Г. М. Писиченко, – Новосибирск : Chem.Lab.NCD, 1997. – 64 с.
- 14 **Карапетьянц, М. Х.** Общая и неорганическая химия : учеб. пособие / М. Х. Карапетьянц, С. И. Дракин. – М. : Химия, 1981. – 632 с.
- 15 Курс общей химии : учеб. для студ. энергет. спец. вузов. / Э. И. Мингулина, Г. Н. Масленникова, Н. В. Коровин, Э. Л. Филиппов. – М. : Высш. шк., 1990. – 446 с. – ISBN 5-06-000663-8.
- 16 **Угай, Н. А.** Общая химия / Н. А. Угай. – М. : Высш. шк., 2000. – 527 с.
- 17 **Желиговская, Е. А.** Кристаллические льды / Е. А. Желиговская, Г. Г. Маленков // Успехи химии. – 2006. – Т. 75, № 1. – С. 64–85.
- 18 **Третьяков, Ю. М.** Структура воды и теплофизические параметры / Ю. М. Третьяков. – М. : НИЦ «РХД», 2006. – 114 с. – ISBN 5-93972-464-7.

- 19 Структура воды: гигантские гетерофазные кластеры воды / А. Н. Смирнов, А. В. Сыроежкин, А. В. Балышев [и др.] // Химия и технология воды. – 2005. – № 2. – С. 11–37.
- 20 **Громов, Б. В.** Удивительный мир архей / Б. В. Громов. // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 4. – С. 23–26.
- 21 **Прозоркина, Н. В.** Основы микробиологии, вирусологии и иммунологии : учеб. пособие для средних спец. мед. учеб. заведений / Н. В. Прозоркина, Л. А. Рубашкина. – Ростов н/Д : Феникс, 2002. – 416 с. – ISBN 5-222-02499-7.
- 22 **Емцев, В. Т.** Микробиология / В. Т. Емцев, Е. Н. Мишустин. – М. : Дрофа, 2006. – 444 с. – ISBN 5-358-00443-2.
- 23 **Гусев, М. В.** Микробиология / М. В. Гусев, Л. А. Минеева. – М. : Академия, 2003. – 464 с. – ISBN 5-7695-1403-5.
- 24 **Шапиро, Я. С.** Микроорганизмы: вирусы, бактерии, грибы : учеб. пособие / Я. С. Шапиро. – СПб. : ЭЛБИ-СПб, 2003. – 324 с. – ISBN 5-93979-059-3.
- 25 **Пяткин, К. Д.** Микробиология / К. Д. Пяткин, Ю. С. Кривошеин. – М. : Медицина, 1981. – 512 с.
- 26 **Черепанов, Н. П.** Морфология и размножение грибов / Н. П. Черепанов, А. В. Тобиас. – М. : Академия, 2006. – 160 с. – ISBN 5-7695-2736-6.
- 27 **Теппер, Е. З.** Практикум по микробиологии / Е. З. Теппер, В. К. Шильникова, Г. И. Переверзева. – М. : Дрофа, 2004. – 256 с. – ISBN 5-7107-7437-5.
- 28 Медицинская микробиология : учеб. для студ. мед. высш. учеб. заведений / Д. К. Новиков [и др.]; под ред. акад. РАЕН, д. м. н., проф. Д. К. Новикова, д. м. н. И. И. Генералова. – М. : Медицина, 2003. – 562 с. – ISBN 5-8114-0633-9.
- 29 **Борисов, Л. Б.** Медицинская микробиология, вирусология, иммунология : учеб. / Л. Б. Борисов. – М. : Медицинское информационное агентство, 2005. – 736 с. – ISBN 5-89481-278-X.
- 30 **Benjamin, M.** Griffin Nitrite, an Electron Donor for Anoxygenic Photosynthesis / M. Griffin Benjamin, Schott Joachim, Schink Bernhard // Science. – 2007. – Vol. 316. – P. 1870.
- 31 Асептика и антисептика : учеб. пособие / Ю. С. Винник, Л. В. Кочетова, Е. А. Карлова, О. В. Теплякова. – Ростов н/Д : Феникс, 2007. – 128 с. – ISBN 978-5-222-11409-4.
- 32 **Поздеев, О. К.** Медицинская микробиология / О. К. Поздеев. – М. : ГЭОТАР-МЕД, 2001. – 765 с.
- 33 **Репин, Б. Н.** Биологические пруды для очистки сточных вод пищевой промышленности / Б. Н. Репин, О. Н. Русина, А. Ф. Афанасьева. – М. : Пищевая пром-сть, 1977. – 205 с.
- 34 **Симаков, Ю. Г.** Активный ил очищает воду / Ю. Г. Симаков // Наука и жизнь. – 1974. – № 1. – С. 73.
- 35 **Родионов, А. И.** Техника защиты окружающей среды / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, Н. С. Торочешников. – М. : Химия, 1989. – 512 с.
- 36 **Карелин, Я. В.** Очистка производственных сточных вод в аэротенках / Я. В. Карелин, В. Н. Жуков, Б. М. Репин. – М. : Стройиздат, 1973. – 184 с.
- 37 **Скирдов, И. В.** Многоступенчатая схема биологической очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий / И. В. Скирдов, В. Н. Саинова. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 8. – С. 23–25.
- 38 Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод / Л. Н. Брагинский, М. А. Евилевич, В. И. Бегачев [и др.]. – Л. : Химия, 1980. – 143 с.

- 39 **Попкович, Г. С.** Системы аэрации сточных вод / Г. С. Попкович, Б. Н. Репин. – М. : Стройиздат, 1986. – 136 с.
- 40 **Жерноклев, А. К.** Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич ; под ред. Н. В. Холдинской. – Минск : Тонпик, 2002. – 129 с.
- 41 **Ющенко, В. Д.** Водоподготовка : учеб.-метод. комплекс для студентов спец. 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов». В 2 ч. Ч. 1 / В. Д. Ющенко. – Новополоцк : ПГУ, 2009. – 252 с.
- 42 **Абрамов, Н. Н.** Водоснабжение / Н. Н. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1982. – 440 с.
- 43 **Кульский, Л. А.** Теоретические основы и технология кондиционирования воды (процессы и аппараты) / Л. А. Кульский. – Киев : Наук. думка, 1971. – 499 с.
- 44 **Николадзе, Г. И.** Водоснабжение: учеб. для вузов / Г. И. Николадзе, М. В. Соловьев. – М. : Стройиздат, 1996. – 688 с.
- 45 **Николадзе, Г. И.** Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения : учеб. пособие для вузов по спец. «Водоснабжение и канализация» / Г. И. Николадзе, Д. М. Минц, А. А. Кастанский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Вышш. шк., 1984. – 368 с.
- 46 **Фрог, Б. Н.** Водоподготовка / Б. Н. Фрог. – 2-е изд. – М. : МГУ, 2001. – 680 с. // Методы и способы очистки воды. «Интех ГмбХ». – URL : [https://oil-filters.ru/water\\_cleaning\\_methods/](https://oil-filters.ru/water_cleaning_methods/) (дата обращения : 12.09.2024).
- 47 **Басс, Г. М.** Строительство водопроводных очистных станций : учеб. для вузов по спец. «Водоснабжение и канализация» / Г. М. Басс, Б. Ф. Белецкий, Г. П. Владыченко. – М. : Вышш. шк., 1979. – 172 с.
- 48 **Бородин, И. В.** Технология и организация строительства и водопроводно-канализационных сетей и сооружений / И. В. Бородин. – М. : Стройиздат, 1977. – 621 с.
- 49 **Брежнев, В. И.** Обеззараживание питьевой воды на городских водопроводах / В. И. Брежнев. – М. : Стройиздат, 1971. – 125 с.
- 50 Водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий : справочник проектировщика / под ред. И. А. Назарова. – М. : Стройиздат, 1977. – 289 с.
- 51 Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : учеб. пособие для вузов. В 3 т. Т. 2. Очистка и кондиционирование природных вод / М. Г. Журба, В. В. Ванин, Е. М. Гальперин [и др.]; под общ. ред. М. Г. Журбы. – Вологда : ВоГТУ, 2001. – 324 с.
- 52 Водозaborные и очистные сооружения и устройства / под ред. М. Г. Журбы. – М. : ВОДГЕО, 2001. – 272 с.
- 53 Пористые материалы фильтров и аэраторов для очистки воды разными методами / В. В. Савич, Д. Ю. Вербицкий, Р. П. Голодок [и др.] // Водоснабжение, химия и прикладная экология : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 26 марта 2024 г.) / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. Е. Ф. Кудиной. – Гомель : БелГУТ, 2024. – С. 16–23.
- 54 **Николадзе, Г. И.** Технология очистки природных вод : учеб. для вузов. – М. : Вышш. шк., 1987. – 479 с.
- 55 **Сологаев, В. И.** Водоснабжение и водоотведение : учеб. пособие / В. И. Сологаев, Г. И. Николадзе. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2010. – URL : <http://sologaev2010.narod.ru/> (дата обращения : 12.11.2024).
- 56 **Чудновский, С. М.** Водозaborы для комплексного использования и охраны водных ресурсов : учеб. пособие / С. М. Чудновский, А. В. Зенков. – Вологда : ВоГТУ, 2007. – 95 с.
- 57 Совершенствование технологии очистки поверхностных водоисточников / Е. М. Наурызбаев, С. Сейсенов, К. С. Сыпабек, Г. Ж. Сыпабекова // Европейская

наука XXI столетия : стратегия и перспективы развития : материалы I междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск, 2006. – Т. 21. – С. 36–40.

58 Технический справочник по обработке воды : в 2 т. : [пер. с фр.]. / науч. ред.: М. И. Алексеев, В. Г. Иванов, А. М. Курганов [и др.]. – 2-е изд. – СПб : Водоканал Санкт-Петербурга : Новый журн., 2007. – 1696 с.

59 **Жолдакова, З. И.** Ультрафиолетовое обеззараживание как элемент многобарьерной схемы очистки воды для защиты от патогенов, устойчивых к хлорированию / З. И. Жолдакова, Е. А. Тульская, С. В. Костюченко, А. А. Ткачев // Гигиена и санитария. – 2017. – № 96 (6). – С. 531–535.

60 **Покровский, В. А.** Гигиена / В. А. Покровский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Медицина, 1979. – 496 с.

61 Гигиена : учеб. / под ред. акад. РАМН Г. И. Румянцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ГЭОТАР-МЕД, 2002. – 608 с.

62 **Кузубова, Л. И.** Химические методы подготовки воды (хлорирование, озонирование, фторирование) / Л. И. Кузубова, В. Н. Кобрин // Аналит. обзор СО РАН, ГННТБ, НИОХ. – Новосибирск, 1996. – 132 с.

63 Дезинфицирующие средства / под ред. С. И. Иванова, М. Г. Шандалы. – М. : ФГУП ИнтерСЭН, 2001. – 204 с.

64 **Лунин, В. В.** Физическая химия озона / В. В. Лунин, М. П. Попович, С. Н. Ткаченко. – М. : МГУ, 1988. – 490 с.

65 Техника защиты окружающей среды / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, Н. С. Торочешников. – М.: Химия, 1989. – 512 с.

66 **Орехов, В. А.** Озонирование воды / В. А. Орехов. – М. : Стройиздат, 1984. – 100 с.

67 **Апельцина, Е. И.** Проблемы озонирования при подготовке питьевой воды / Е. И. Апельцина, Л. П. Алексеева, Н. О. Черская // Водоснабжение и санитарная техника. – 1992. – № 4. – С. 9–11.

68 **Жуков, Н. Н.** Озонирование в технологии водоподготовки / Н. Н. Жуков // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 1. – С. 2–4.

69 **Гончарук, В. В.** Озонирование как метод подготовки питьевой воды: возможные побочные продукты и токсикологическая оценка / В. В. Гончарук, Н. Г. Потапченко, В. Ф. Вакуленко // Химия и технология воды. – 1995. – Т. 17, № 1. – С. 3–33.

70 **Singer, P. C.** Assessing ozonation research needs in water treatment / P. C. Singer // J. Amer. Water Works Assoc. – 1990. – Vol. 82, № 10. – P. 78–88.

71 **Драгинский, В. Л.** Озонирование при подготовке питьевой воды / В. Л. Драгинский // Водоснабжение и санитарная техника. – 1993. – № 2. – С. 5–6.

72 Современные технологии подготовки питьевой воды на Слудинской водопроводной станции Нижнего Новгорода / А. А. Павлов, Ч. А. Дзиминскас, С. В. Костюченко, С. Г. Зайцева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 1. – С. 10–16.

73 How preoxidation effects particle removal during clarification and filtration / A. Wilczar, E. W. Howe, E. M. Aieta, R. G. Lee // J. Amer. Water Works Assoc. – 1992. – Vol. 84, № 12. – P. 85–94.

74 **Прейс, С. В.** Роль предварительного озонирования при очистке воды озера Юлемисте / С. В. Прейс, Э. К. Сийрде, Л. И. Пылдоя // Химия и технология воды. – 1991. – Т. 13, № 8. – С. 736–739.

75 **Драгинский, В. Л.** Очистка подземных вод от соединений железа, марганца и органических загрязнений / В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 1. – С. 13–14.

- 76 **Русанова, Н. А.** Подготовка питьевой воды с учетом микробиологических показателей / Н. А. Русанова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1997. – № 12. – С. 16–19.
- 77 **Рабинович, Г. Р.** Проектные решения станций водоподготовки с применением озонирования и адсорбции / Г. Р. Рабинович, Е. А. Беляева // Водоснабжение и санитарная техника. – 1997. – № 6. – С. 8–11.
- 78 **Бо, Д.** Практика озонирования в обработке питьевых вод / Д. Бо, Г. Н. Герасимов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 1. – С. 26–29.
- 79 **Храменков, С. В.** Опыт и перспективы применения озонирования на Московском водопроводе / С. В. Храменков, А. В. Коверга, О. Е. Благова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 1. – С. 6–8.
- 80 **Акулич, Т. И.** Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Технология очистки сточных вод» / Т. И. Акулич, С. В. Андреюк. – Брест : БрГТУ, 2022. – 257 с. – URL : <https://rep.bstu.by/handle/data/32603>. (дата обращения: 19.07.2024).
- 81 **Белецкий, Б. Ф.** Конструкции водопроводно-канализационных сооружений : справочник / Б. Ф. Белецкий, Н. И. Зотов, Л. В. Ярославский. – М. : Стройиздат, 1989. – 448 с.
- 82 **Демидов, О. В.** Сблокированные сооружения биохимической очистки / О. В. Демидов, И. А. Сидорова, А. А. Кац, В. И. Скирта // Водоснабжение и санитарная техника. – 1987. – № 2. – С. 24–25.
- 83 **Суханова, М. Ф.** Могилев: мощности очистных сооружений должны возрасти / М. Ф. Суханова // Вода. – 1999. – № 1. – С. 8.
- 84 **Разумовский, Э. С.** Эффективность очистки сточных вод на станциях типа «Ручей» / Э. С. Разумовский // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 3. – С. 6–7.
- 85 **Непаридзе, Р. Ш.** Станция заводского изготовления «Ручей» для глубокой очистки сточных вод / Р. Ш. Непаридзе // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 7. – С. 13–16.
- 86 Научные и прикладные аспекты подготовки питьевой воды. Обзор / В. В. Гончарук, В. В. Подлеснюк, Л. Е. Фридман, Г. Е. Рода // Химия и технология воды. – 1992. – Т. 14, № 7. – С. 506–525.
- 87 Применение воздушного перемешивания в процессах смешения и хлопьевобразования / А. В. Бутко, В. А. Михайлов, Ю. В. Баринов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. – № 7. – С. 20–22.
- 88 Очистка нефтесодержащих вод на установках заводского изготовления / И. Н. Мясников, В. А. Потанина, С. А. Кудрявцев, Ю. А. Чмелев // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 6. – С. 20–21.
- 89 Влияние реконструкции систем аэрации на качество очистки сточных вод / А. И. Щетинин, О. Ю. Вавилов, А. М. Есин [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 12. – Ч. 2. – С. 9–10.
- 90 **Непаридзе, Р. Ш.** Мелкопузырчатая система аэрации в аэротенках / Р. Ш. Непаридзе // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 2. – С. 12–16.
- 91 Аэраторы АКВА-TOP и комбинированные системы аэрации / Ю. М. Мещенгиссер, Р. А. Галич, Ю. Г. Марченко, В. А. Чернуха // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 12. – Ч. 2. – С. 11–13.

- 92 **Рябов, А. К.** Искусственная аэрация природных вод / А. К. Рябов. – Киев : Наук. думка, 1982. – 197 с.
- 93 Аэрационное оборудование для биологической очистки сточных вод в аэротенках / Б. М. Худенко, Л. Н. Брагинский, Б. С. Прицкер, М. Я. Шраер. – М. : ВНИИПИЭЛеспром, 1969. – 63 с.
- 94 Обеззараживание при подготовке питьевой воды из поверхностных источников / С. В. Костюченко, С. В. Волков, А. В. Якименко [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 2. – С. 9–12.
- 95 **Кузнецова, Т. В.** Озонирование сточных вод / Т. В. Кузнецова, Н. Н. Пальгунов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1997. – № 2. – С. 12–15.
- 96 **Ракевич, И. Л.** Аэраторы и системы аэрации / И. Л. Ракевич // Вода. – 1997. – № 7. – С. 4–7.
- 97 **Скирдов, И. В.** Направления развития пневматической аэрации (Обзор) / И. В. Скирдов, И. Л. Клячко // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – № 2. – С. 4–7.
- 98 **Спивак, В. М.** Аэраторы для очистки природных и сточных вод / В. М. Спивак. – Львов : Выща школа, 1984. – 124 с.
- 99 **Корелова, М. В.** Пневматические аэраторы из пористого полиэтилена (Финляндия) / М. В. Корелова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – № 2. – С. 28–29.
- 100 **Витязь, П. А.** Пористые порошковые материалы и изделия из них / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег. – Минск : Выш. школа, 1987. – 164 с.
- 101 **Тодоров, Р. П.** Сравнительные исследования пористых проницаемых материалов для аэрирующих перегородок / Р. П. Тодоров, В. П. Георгиев // Труды института металлокерамики. – София, 1986. – № 3. – С. 115–127.
- 102 Пористые элементы из спеченных порошков металлов для диспергации газа в воде / М. П. Анащенко, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич [и др.] // Водные ресурсы (информационные материалы). – Минск : ЦНИИ КИВР, 1998. – № 4. – С. 68–73.
- 103 Porous Ozone Disperser from sintered Powder of Technikally Pure Titanium / L. P. Pilinovich, V. V. Savich, S. A. Bedenko [et al.] // Proceedings of the 1998 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition. – Granada, Spain, 1998. – Vol. 5. – P. 253–258.
- 104 Пористые порошковые диспергаторы озона и воздуха в воде / М. П. Анащенко, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич [и др.] // Порошковая металлургия. – 1999. – № 5/6. – С. 117–125.
- 105 **Жерноклев, А. К.** Опыт применения мелкопузырчатых аэраторов в системе озонирования питьевой воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилиневич, В. В. Савич // Водоснабжение и санитарная техника. – 1994. – № 8. – С. 14–16.
- 106 Пористые мелкопузырчатые диспергаторы озono-воздушной смеси из спеченного порошка титана / А. К. Жерноклев, В. В. Савич, Л. П. Пилиневич, М. П. Анащенко // «Озон». Информационные материалы. – М. : М-во науки и технической политики РФ, 1995. – Вып. 5. – С. 54–61.
- 107 Применение пористых дисковых элементов из спеченного порошка титана для диспергации газа в воде / В. В. Савич, Л. П. Пилиневич, М. П. Анащенко [и др.] // Вода. – 1998. – № 6. – С. 6–7.

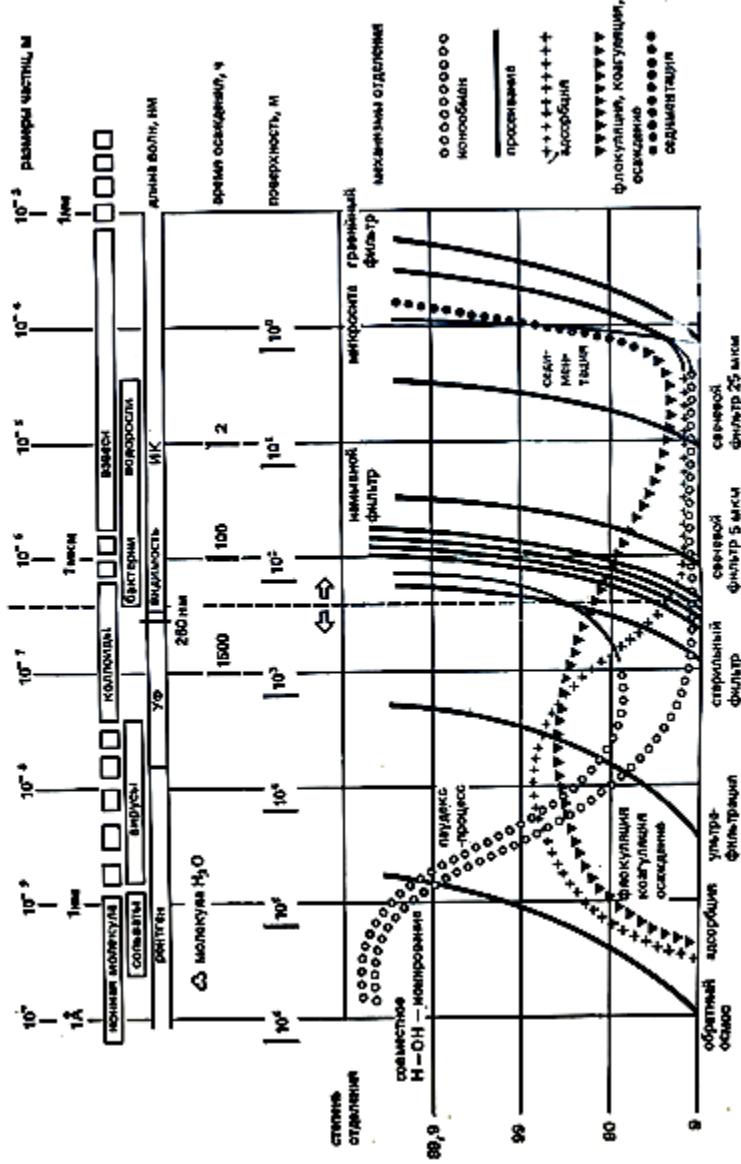
- 108 Озонаторы ООО Курганхиммаш : каталог / В. В. Букин, В. Ф. Хмара, А. В. Комарских, Е. В. Мехонин. – Курган : Курганхиммаш, 2014. – 40 с.
- 109 Методика испытаний и массообменные характеристики аэраторов АКВА-ПЛАСТ / Ю. М. Мешенгиссер, Ю. Г. Марченко, В. Ю. Лось, В. К. Михайлов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 5. – Ч. 1. – С. 26–28.
- 110 Системы аэрации большой мощности / Ю. М. Мешенгиссер, Р. А. Галич, А. И. Щетинин [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 11. – С. 55–59.
- 111 Полимерные волокнистые melt-blown материалы / В. А. Гольдаде, А. В. Маркевич, Л. С. Пинчук [и др.] ; под науч. ред. Л. С. Пинчука. – Гомель : ИММС НАНБ, 2000. – 260 с.
- 112 Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы / А. Г. Кравцов, С. А. Марченко, С. В. Зотов [и др.] ; под общ. ред. Ю. М. Плескачевского. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 319 с.
- 113 **Кудина, Е. Ф.** Применение волокнистых материалов в технологиях очистки воды / Е. Ф. Кудина // Водоснабжение, химия и прикладная экология : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 22 марта 2021 г. / редкол.: Е. Ф. Кудина [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 42–47.
- 114 **Кудина, Е. Ф.** Волокнистые материалы в технологиях очистки воды / Е. Ф. Кудина, С. Ю. Коновалов // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. трудов IV Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 7–8 окт. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: А. А. Волчек [и др.]; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мещик. – Брест : БрГГУ, 2021. – С. 195–202.
- 115 **Роденко, А. В.** Эффективная система аэрации как один из ключевых факторов снижения эксплуатационных затрат на канализационных очистных сооружениях / А. В. Роденко, И. В. Павлович // Новые методы и технологии в водоснабжении и водоотведении : сб. тр. / Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2024. – С.158–162.
- 116 Аэраторы из пористой проницаемой керамики НТЦ «Бакор» – характеристики и перспективы применения / Е. Н. Серпокрылов, Е. Н. Фесенко, М. Н. Саенко [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 1–2. – С. 73–81.
- 117 **Аверина, Ю. М.** Интенсификация процесса аэрации при удалении ионов железа из воды : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.01 / Аверина Юлия Михайловна; Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева. – М., 2015. – 157 с.
- 118 Titanium Alloy Ozone Diffuser. – URL : <https://www.khnwatertreatment.com/diffused-aeration/fine-bubble-diffuser/titanium-alloy-ozone-diffuser.html>. (date of access : 12.08.2024.)
- 119 Oxidation Technologies, LLC. – URL : <https://www.oxidationtech.com/ozone/ozone-system-design/ozone-dissolved-with-bubble-diffusers.html>. (date of access : 12.08.2024.)
- 120 Лазерная абляция политетрафторэтилена / П. Н. Гракович, Л. Ф. Иванов, Л. А. Калинин [и др.] // Российский химический журнал. – 2008. – № 3. – С. 97–105.
- 121 Пористые керамические материалы для очистки воды из минерального сырья Беларуси / А. И. Ратько, С. М. Азаров, Т. А. Азарова, Е. Е. Петюшик // Порошковая металлургия : сб. науч. трудов. – Минск, 2007. – Вып. 30. – С. 198–202.
- 122 Пористая алюмоシリкатная керамика / С. М. Азаров, Е. Е. Петюшик, Т. А. Азарова [и др.]. – Минск : Ковчег, 2009. – 258 с.
- 123 **Смирнова, К. А.** Пористая керамика для фильтрации и аэрации / К. А. Смирнова. – М. : Госстройиздат, 1968. – 171 с.

- 124 Свойства пористой проницаемой керамики на основе монофракционных порошков корунда и нанодисперсного связующего / Б. Л. Красный, В. П. Тарасовский, А. Б. Красный, А. Л. Кутейникова // Стекло и керамика. – 2009. – № 6. – С. 18–21.
- 125 Фильтрующие стеклокерамические пористые материалы для очистки воды / М. И. Рыщенко, Л. А. Михеенко, Е. Ю. Федоренко, Л. П. Щукина // Экология и промышленность. – 2009. – № 1. – С. 33–35.
- 126 Пористые элементы дисковых аэраторов, спеченные из губчатого порошка титана: изменение свойств после регенерации / Л. П. Пилиневич, В. В. Савич, С. А. Беденко [и др.] // Порошковая металлургия. – 2010. – № 33. – С. 306–309.
- 127 Shanahan, P. 1.85 Water and Wastewater Treatment Engineering / P. Shanahan // Spring 2006. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare. – URL : <https://ocw.mit.edu>. License: Creative Commons BY-NC-SA (date of access : 12.08.2024.)
- 128 Горелая, О. Н. Водоотводящие системы промышленных предприятий : учеб. пособие / О. Н. Горелая ; М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус гос. ун-т трансп.– Гомель : БелГУТ, 2024. – 207 с.
- 129 Современные методы очистки воды в воинской части / О. И. Сапходоева, М. И. Кучер, Д. А. Денисюк, В. А. Бондарева // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения. – 2022. – № 4. – С. 259–262.
- 130 Новикова, О. К. Водоснабжение промышленных предприятий : учеб. пособие / О. К. Новикова, А. М. Ратникова ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп.– Гомель : БелГУТ, 2021. – 223 с.
- 131 Новикова, О. К. Реконструкция систем водоснабжения и канализации : учеб. пособие / О. К. Новикова ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп.– Гомель : БелГУТ, 2023. – 212 с.
- 132 Гриднева, М. А. Исследование фильтрующей загрузки в ходе эксплуатации / М. А. Гриднева, Ю. Д. Агафонова, Д. В. Гайнулова // Вода Magazine. – URL : <https://watermagazine.ru/nauchnye-stati2/novye-stati/27651-issledovanie-filtruyushchej-zagruzki-v-khode-eksploatatsii.html>. (дата обращения : 12.10.2024.)
- 133 Стрелков, А. К. Фильтрующие материалы для очистки воды хозяйствственно-питьевого назначения / А. К. Стрелков, М. А. Гриднева, Э. В. Дремина // Водоснабжение и санитарная техника. – 2024. – № 9. – С. 5–9.
- 134 Лесович, Е. В. Изучение свойств активированного угля при удалении органических веществ из природных вод / Е. В. Лесович, Е. С. Велюго, В. Д. Ющенко // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : сб. ст. IV Междунар. науч. конф., Новополоцк, 20–21 апр. 2022 г / редкол. : Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк : Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2022.– С. 170–174.
- 135 Sustainable synthesis of carbon quantum dots from banana peel waste using hydrothermal process for in vivo bioimaging / A. Raji, J. I. Edison, T. Nesakumar [et al.] // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2021. – Vol. 126, article id. 114417.
- 136 Nguyen, T. N. Facile green synthesis of carbon quantum dots and biomass-derived activated carbon from banana peels: synthesis and investigation / T. N. Nguyen, P. A. Le, V. B. T. Phung // Biomass Conv. Bioref. – 2022. – № 12. – P. 2407–2416.
- 137 Ethan, G. A New Generation of Activated Carbon Adsorbent Microstructures / E. Grigor, J. Carver, E. Bulan [et al.] // Adv. Sci. – 2024. – № 11. – P. 2406551. – DOI: 10.1002/advs.202406551

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

МЕТОДЫ ВОДОПОДГОТОВКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЙ [55]



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
 (справочное)

**КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГРУППЫ ПРИМЕСЕЙ [127]**

326

| Процесс                                 | Технологический способ обработки воды                      | Удаляемые загрязнения  | Реагенты и их расход на 1000 м <sup>3</sup> воды                         | Очистные сооружения                    | Степень очистки  |
|---|--|--|--|--|--|
| <b>I группа</b>                         |  |  |  |  |  |
| Механическое безреагентное разделение   | Отстаивание  | Грубодисперсные примеси до 500 мг/г, цветность до 50 град          | —  | Водозaborные ковши, отстойники         | 60–70 %  |
|   | Фильтрование   | Взвешенные вещества до 50 мг/дм <sup>3</sup> , цветность 50 град   | —  | Медленные фильтры                      | 95–99 %<br>микроорганизмов,<br>мутность до нормативов,<br>установленных стандартом |
|   |  | Взвешенные вещества до 1000 мг/дм <sup>3</sup> , цветность 50 град | —  | Предварительные фильтры                | 60–80 %  |
|   | Микрофильтрование  | Планктон более 1000 кл/см и взвешенные вещества                    | —  | Микрофильтры                           | 70–95 %  |
| Адгезия на высокодисперсных и зернистых | Фильтрование через намывной слой вспомогательного вещества | Тонкодисперсные взвешенные вещества, соединения железа и марганца  | Диатомит, трепел, асбест-целлюлоза, активированный уголь и др. (1–60 кг) | Диатомитовые и другие намывные фильтры | Мутность до норм, установленных стандартом   |

|                                 |  |   |   |  |  |                                   |
|---------------------------------|--|---|---|--|--|-----------------------------------|
|                                 | материалах, а также на гидроксидах алюминия и железа   | Фильтрование с использованием явления контактной коагуляции                 | Взвешенные вещества до 150 мг/г, цветностью до 150 град | Коагулянты: сульфат алюминия, хлорид железа (10–120 кг)<br>Флокулянты: поликариламид (0,2–0,6 кг), активная кремниевая кислота (1–2,0 кг)      | Установки для приготовления и дозирования растворов реагентов, контактные осветлители или контактные фильтры | До норм, установленных стандартом |
|                                 | Обработка высоко-дисперсными глинистыми минералами с последующим отстаиванием и фильтрованием      | Патогенные бактерии, споры  |   | Минералы: пальгорскит, монтмориллонит и др. (100–500 кг)<br>Флокулянты: поликариламид (0,015–0,7 кг)   | Установки для приготовления и дозирования суспензий глинистых минералов, смесители, отстойники, фильтры      | 98,0–99,9 %                       |
|                                 | Обработка воды коагулянтами с последующим удалением взвешенных веществ отстаиванием, фильтрованием | Взвешенные вещества и цветность воды ограничены, патогенные бактерии, споры |   | Коагулянты: глинозем сернокислый (40–250 кг) и хлорид или сульфат железа (20–150 кг); реагенты для подщелачивания, известь, сода               | Установки для приготовления и дозирования реагентов, смесители, камеры хлопьобразования, отстойники, фильтры | До норм, установленных стандартом |
| Агрегация с помощью флокулянтов | Обработка воды коагулянтами с применением флокулянтов и последующим отстаиванием, фильтрованием    | То же   |   | То же и флокулянты; активная кремниевая кислота (2–20 % дозы безводного коагулянта) или поликариламид (0,01–0,3 количества взвешенных веществ) | То же и установки для приготовления и дозирования растворов флокулянтов                                      | До норм, установленных стандартом |
| Флотация                        | Безреагентная флотация   | Нефть и масла (50–150 г/м)  | Воздух (50–500 м)                                       | Флотаторы и устройства для диспергирования воздуха   | 90 %   |                                   |

*Продолжение приложения Б*

| Процесс  | Технологический способ обработки воды   | Удаляемые загрязнения  | Реагенты и их расход на 1000 м <sup>3</sup> воды   | Очистные сооружения  | Степень очистки                               |
|--|---|--|--|--|---|
| Флотация   | Флотация с применением реагентов  | Нефть и масла (50–150 г/м), при необходимости глубокой очистки | То же и добавка жирных спиртов (10 кг), сульфата алюминия или хлорида железа (20–50 кг), активной кремниевой кислоты (10 кг) | Флотаторы и устройства для диспергирования воздуха   | 95–99 %                                       |
| Бактерицидное воздействие на патогенные микроорганизмы | Обработка воды окислителями: хлорирование                                       | Бактериальное загрязнение                                      | Хлор (10–20 кг) или диоксид хлора (1–5 кг)<br><br>Поваренная соль (10–100 кг), электроэнергия (50–100 кВт·ч)                 | Склады хлора, хлораторы, смесители, контейнеры, установки для углерода. Склады соли, гипохлоридные установки, смесители, контактные резервуары | Получение воды стандартного качества<br>То же |
|  | Озонирование  | То же  | Озон (0,5–4 кг)  | Озонаторные установки с цехами подготовки воздуха и устройствами для введения озона в воду   | »   |
|  | Обеззараживание и консервирование воды ионами серебра и других тяжелых металлов | То же, при необходимости длительного хранения                  | Металлическое серебро (0,05–0,5 кг), медь (0,2–1 кг), электроэнергия (0,4–5 кВт·ч)   | Ионаторы типа ЛК, резервуары для хранения воды   | »   |

|   |   |   |  |   |                            |
|---|---|---|--|---|----------------------------|
|   | Обработка воды:<br>– ультразвуком<br>– ультрафиолетовыми лучами | Патогенные бактерии, споры и др.<br><br>То же, при небольшом содержании взвешенных веществ  | Электроэнергия (200–400 кВт·ч)<br><br>Электроэнергия (50–100 кВт·ч)            | Ультразвуковые установки<br><br>Бактерицидные установки с лампами: ПРК-7; РКС-2,5; БУВ-30 и др.                   | 95 %<br><br>98–99 %        |
| <b>II группа</b>                                |   |   |  |   |                            |
| Окисление хлором, озоном и др.                  | Хлорирование  | Повышенное содержание в воде коллоидных и высокомолекулярных соединений, обуславливающих окисляемость и цветность воды (35–200 град), загрязнение воды вирусами | Хлор (10–20 кг) или диоксид хлора (1–5 кг)                                     | Склады хлора, хлораторы, смесители, контактные резервуары, установки для получения диоксида хлора                 | Вода стандартного качества |
|   | Озонирование  | То же   | Озон (0,5–20 кг)   | Озонаторные установки с цехами подготовки воздуха и устройствами для введения озона в воду                        | То же                      |
| Агрегация с помощью флокулянтов катионного типа | Обработка воды катионными флокулянтами                          | »   | Высокомолекулярные полизэлектролиты катионного типа ВА-2, ВА-3 и др. (5–15 кг) | Устройства для приготовления растворов флокулянтов, их дозирования; камеры хлопьеобразования, отстойники, фильтры | »                          |

*Продолжение приложения Б*

| Процесс  | Технологический способ обработки воды   | Удаляемые загрязнения  | Реагенты и их расход на 1000 м <sup>3</sup> воды   | Очистные сооружения   | Степень очистки                      |
|--|---|--|--|---|--------------------------------------|
| 330<br>Адсорбция на гидроксидах алюминия или железа, а также на высокомолекулярных глинистых минералах | Коагуляция в свободном объеме: обработка воды коагулянтами с последующим удалением взвешенных веществ | Повышенное содержание в воде коллоидных и высокомолекулярных соединений, обуславливающих окисляемость и цветность воды (35–200 град) | Коагулянты: сернокислый глинозем (40–200 кг), хлорид или сульфат железа (30–200 кг). Флокулянты: активная кремниевая кислота (0,1–2 кг), полиакриламид (0,2–0,6 кг); для подщелачивания – известь, соли, щелочь натр | Устройства для приготовления растворов реагентов и их дозирование, смесители, камеры хлопьеобразования, отстойники или осветлители, фильтры | Получение воды стандартного качества |
|  | Обработка воды высокодисперсными замутнителями и коагулянтами   | То же, при низкой температуре и малой мутности воды; при высокой загрязненности воды вирусами  | То же, с добавлением бентонита, пальмогорскита (50–200 кг) и других глинистых минералов  | То же и устройства для обработки воды замутнителями   | То же                                |
|  | Контактная коагуляция   | Коллоидные и высокомолекулярные вещества, обуславливающие цветность воды (35–150 град) при малой мутности последней                  | Коагулянт – сернокислый глинозем. Флокулянты: полиакриламид (0,2–0,6 кг), активная кремниевая кислота (0,1–2,0 кг)   | Устройства для приготовления растворов реагентов и их дозирование, смесители и контактные осветлители                                       | »                                    |

|  |                           |  |   |  |   |           |
|--|---------------------------|--|---|--|---|-----------|
|  | Вируле-цидное воздействие | Обработка воды окислителями:<br>– хлорирование                                     | Загрязнение воды вирусами   | Хлор (10–20 кг), диоксид хлора (1–10 кг), поваренная соль (10–100 кг), электроэнергия (50–100 кВт·ч) | Склады хлора, хлораторы, смесители, контактные резервуары, установки для получения диоксида хлора. Контактные резервуары, склады соды, электролитические гипохлоритные установки, смесители | –         |
|  |                           | – озонирование   | То же   | Озон (0,5–4 кг)  | Озонаторные установки с цехами подготовки воздуха и устройствами для введения озона в воду  |           |
|  | Вируле-цидное воздействие | Обеззараживание и консервирование воды ионами серебра и другими тяжелыми металлами | То же, при небольшом содержании вирусов и необходимости длительного хранения воды | Серебро металлическое (0,05–0,5 кг), медь (0,2–1 кг), электроэнергия (0,4–5 кВт·ч)                   | –   | –         |
|  |                           | Обработка воды:<br>– ультразвуком  | Загрязнение воды вирусами   | Электроэнергия (200–400 кВт·ч)   | Ультразвуковые установки  | 95 %      |
|  |                           | Обработка воды:<br>– ультрофиолетовыми лучами                                      | То же, при небольшом содержании взвешенных веществ                                | Электроэнергия (50–100 кВт·ч)  | Бактерицидные установки с лампами: РКС-2,5; ПРК-7; БУВ-30 и др.   | 98–99,9 % |

*Продолжение приложения Б*

| Процесс   | Технологический способ обработки воды | Удаляемые загрязнения   | Реагенты и их расход на 1000 м <sup>3</sup> воды  | Очистные сооружения  | Степень очистки  |
|---|---------------------------------------|---|---|--|--|
| <b>III группа</b>   |                                       |   |   |  |  |
| Десорбция газов и летучих органических соединений при аэрировании | Аэрирование                           | Газы и летучие органические соединения, придающие неприятные привкусы и запахи  | 2 л воздуха на 1 г двухвалентного железа  | Брызгальные бассейны, аэраторы и дегазаторы различного типа                                | Углекислота 65–80 %, сероводород до 0,3–0,5 мг/дм <sup>3</sup>         |
| Окисление хлором, озоном, перманганатом и др.                     | Обработка воды перманганатом калия    | Удаление привкусов и запахов при незначительном загрязнении и отсутствии в воде марганца  | Перманганат калия (3–10 кг)   | Установки для приготовления и дозирования раствора перманганата калия                      | То же  |
|   | Хлорирование                          | Сероводород (0,3–0,5 мг), доочистка после аэрирования, летучие органические соединения, придающие воде неприятные привкусы и запахи | На 1 кг водорода при окислении до серы – 2,1 кг Cl <sub>2</sub> , до сульфатов – 8,4 кг Cl <sub>2</sub> .<br>На 1 кг фенола – 1,5–10 кг Cl <sub>2</sub> или 0,5–1,2 кг ClO <sub>2</sub> | Хлораторы, смесители, установки для получения и дозирования диоксида хлора                 | Отсутствие сероводорода; уменьшение содержания органических соединений |
|   | Озонирование                          | Для удаления привкусов и запахов не очень загрязненной воды и при малой эффективности хлорирования и углевания                      | Озон (2–4 кг)   | Озонаторные установки с цехами подготовки воздуха и устройствами для введения озона в воду | В зависимости от природы удаляемых загрязнений                         |

|  |   |   |  |  |         |
|--|---|---|--|--|---------|
| Адсорбция на активированном угле и других материалах | Углевание   | Неприятные запахи и привкусы естественного происхождения, а также вносимые со сточными водами | Уголь марок БАУ А, ОУ – сухой, КАД – пылевидный (5–20 кг)  | Установки для приготовления, дозирования и смешения с водой угольной суспензии   | 80–95 % |
|  | Очистка воды на угольных фильтрах и в адсорберах со взвешенным слоем угля | Привкус и запахи; присутствие в сточных водах ароматических веществ                           | Гранулированный уголь, для регенерации фильтров используют едкий натр либо осуществляют парогазовую регенерацию во взвешенном слое | Угольные фильтры, устройства для приготовления регенерационных растворов, адсорбераы со взвешенным слоем, печи для активирования и регенерации углей | 80–95 % |
| Экстракция органическими растворителями              | Обесфеноливание   | Наличие в сточных водах фенолов   | Бутилацетат, этилацетат, бензол и др.  | Экстракционные установки   | —       |
| Эвапорация (выпаривание)                             | Пароциркуляционный метод  | То же   | —  | Установки для возгонки   | —       |
|  | Азеотронная отгонка   | »   | —  | То же  | —       |
| Биохимический распад                                 | Разложение микроорганизмами:<br>– аэробное                                | Загрязнение сточных вод   | Активный ил, биопленка, воздух   | Аэротенки, биофильтры, отстойники  | 90–98 % |
|  | – анаэробное  | Кондиционированные осадки   | Биомасса   | Метантенки и др.   | 90–98 % |

*Продолжение приложения Б*

| Процесс   | Технологический способ обработки воды | Удаляемые загрязнения  | Реагенты и их расход на 1000 м <sup>3</sup> воды  | Очистные сооружения  | Степень очистки                                       |
|---|---------------------------------------|--|---|--|---|
| <b>IV группа</b>  |                                       |  |   |  |   |
| Образование комплексных соединений  | Стабилизация                          | –  | Один из реагентов; гексометафосфат натрия, тринатрий фосфат (2–4 кг)  | Метантенки и др.   | Предотвращение накипеобразования и коррозии           |
| Перевод ионов в малодиссоциированные соединения: нейтрализация                          | Подщелачивание или подкисление воды   | Повышенная кислотность или щелочность воды (pH = 6,5 или pH = 8,5)   | На 1 кг-экв удаляемой кислотности или щелочности воды один из реагентов: известь (28 кг), сода (53 кг), едкий натр (40 кг), серная кислота (49 кг), соляная кислота (36,5 кг) | Установки для приготовления и дозирования растворов реагентов, смесители | До необходимой величины                               |
| Перевод ионов в мало-диссоциированные соединения: – образование мало-растворимых солей; | Умягчение:<br>– термический способ    | Жесткость с преобладанием CaHCO <sub>3</sub> , не карбонатная только в виде гипса; мутность меньше 50 мг/дм <sup>3</sup> | Нагревание  | Термоумягчители (системы Копьева и др.)                                  | Карбонатная жесткость до 0,035 мг-экв/дм <sup>3</sup> |

|  |  |   |  |   |   |
|--|--|---|--|---|---|
|  | – содово-фосфатный способ  | Жесткость 5–30 мг-экв/дм <sup>3</sup>   | Сода (53 кг на 1 кг-экв карбонатной жесткости)                               | Смесители, вихревые реакторы установок специальных конструкций                                | До 0,7–1,0 мг-экв/дм <sup>3</sup>   |
| <i>– образование малорастворимых солей</i>                           | – фосфатный способ   | После проведения умягчения воды до 2 мг-экв/дм <sup>3</sup>   | Тринатрийфосфат, динатрийфосфат (до 126,5 кг на 1 кг-экв удаляемой жидкости) | Смесители, вихревые реакторы установок специальных конструкций                                | До 0,04–0,05 мг-экв/дм <sup>3</sup>   |
|  | Обескремнивание  | Повышенное для котловой воды количество   | Каустический магнезит, магнезиальный сорбент (10–15 кг на 4 кг)              | Осветлители, фильтры  | До 1,0–1,5 и до 0,05–0,1 мг/дм <sup>3</sup>                                   |
| <i>– образование малорастворимых гидроксидов</i>                     | Удаление цветных и тяжелых металлов, а также магниевой жесткости       | Содержание ионов металлов выше норм допустимых для сточных вод. Умягчение воды, содержащей значительное количество магния   | Известь (28 кг), едкий натр (40 кг) на 1 кг-экв ионов                        | Установки для приготовления и дозирования растворов, смесители или осветлители, фильтр-прессы | До пределов растворимости гидроксидов   |
| <i>– окисление закисных форм металлов с образованием гидроксидов</i> | Обезжелезивание и удаление марганца:<br>– аэрирование или хлорирование | Бикарбонат железа до 25 мг/дм <sup>3</sup> ; щелочность до 2 мг-экв/дм <sup>3</sup> ; окисляемость до 6 мг на 1 дм <sup>3</sup> кислорода; повышенное содержание марганца | Воздух, хлор (0,7Cl на 1 кг двухвалентного железа)                           | Брызгальные бассейны, градирни, контактные резервуары, осветлительные и контактные фильтры    | Железо до 0,1–0,3 мг/дм <sup>3</sup> , марганец до 0,1–0,2 мг/дм <sup>3</sup> |

## Продолжение приложения Б

| Процесс   | Технологический способ обработки воды | Удаляемые загрязнения   | Реагенты и их расход на 1000 м <sup>3</sup> воды   | Очистные сооружения  | Степень очистки  |
|---|---------------------------------------|---|--|--|--|
|   | – окисление на катализаторах          | То же   | –  | Фильтры с песком, покрытым оксидами марганца или продуктами окисления оксида железа (II)   | То же  |
| Фиксация ионов на твердой фазе:<br>– H-катионирование | Умягчение                             | Жесткость до 14 мг-экв/дм <sup>3</sup> , взвешенные вещества до 10–15 мг/дм <sup>3</sup> (при использовании неподвижного катионита) | Катионит: крупный сульфоуголь КУ-1, КУ-2, КБ-4 для регенерации используют хлорид натрия (150–220 кг), серную (72 кг) и соляную (56 кг) кислоты | Катионитовые фильтры, адсорбера со взвешенным слоем катиониты, установки для приготовления и дозирования регенерационных растворов | До 0,005–0,05 мг-экв/дм <sup>3</sup>                   |
|   | Извлечение ионов цветных металлов     | Содержание ионов металлов выше норм, допустимых для сточных вод   | То же, на 1 кг-экв удаляемого металла  | То же  | То же  |
| – OH-анионирование                                    | Опреснение                            | Общее содержание до 3–4 г/дм <sup>3</sup> ; содержание извести до 8 мг/дм <sup>3</sup> ; цветность до 30 град.                      | Катиониты Аниониты ЭДЭ 10П, АН-2ф, АБ-16, АВ-17, Для регенерации используют один из реагентов: бикарбонат натрия (140–170 кг) на               | Ионообменные фильтры, дегазаторы, установки для приготовления и дозирования регенерационных растворов                              | 17–90 %; солесодержание до 500–1000 мг/дм <sup>3</sup> |

|   |                |   |   |   |  |
|---|----------------|---|---|---|--|
|   |                |   | 1 кг-экв удаленных анионов, едкий натр (80 кг), соду (90–120 кг)  |   |  |
| – OH-анио-нирование   | Обессоливание  | Общее содержание до 3–4 г/дм <sup>3</sup> ; содержание извести до 8 мг/дм <sup>3</sup> ; цветность до 30 град | Катиониты Аниониты ЭДЭ 10П, АН-2ф, АВ-17, АБ-16. Для регенерации используют один из следующих реагентов: едкий натр (80 кг), соду (90–120 кг), бикарбонат натрия (140–170 кг) на 1 кг-экв удаленных анионов | Ионообменные фильтры, дегазаторы, установки для приготовления и дозирования регенерационных растворов     | 99,5–99,9 %; солесодержание до 1–15 мг/дм <sup>3</sup> |
| – удаление фтора  | Обесфторивание | Содержание ионов фтора более 1,5 мг/дм <sup>3</sup>   | Сульфат алюминия (10–50 кг) на 1 кг фтора   | Фильтры, загруженные активированным оксидом алюминия  | До норм стандарта                                      |
| Сепарация ионов при различном фазовом состоянии воды:<br>– перевод в газообразное состояние | Дистилляция    | Общее солесодержание 20–36 г/дм <sup>3</sup>  | Пар, топливо, солнечная и атомная энергия   | Испарители различных типов, термо-компрессорные агрегаты, гелиоопреснители, двухщелевые атомные установки | 99,9 % или до 20–50 мг/дм <sup>3</sup>                 |

*Продолжение приложения Б*

| Процесс   | Технологический способ обработки воды | Удаляемые загрязнения  | Реагенты и их расход на 1000 м <sup>3</sup> воды   | Очистные сооружения  | Степень очистки                |
|---|---------------------------------------|--|--|--|--------------------------------|
| – отделение ионов обратным осмосом                    | Гиперфильтрация                       | Общее солесодержание 20–36 г/дм <sup>3</sup>   | 5–10 кВт·ч на 1 м <sup>3</sup>   | Установки с полупроницаемыми мембранными   | 500–1000 мг/дм <sup>3</sup>    |
| – перераспределение ионов в несмешивающихся жидкостях | Экстракция                            | Солесодержание 2–10 г/дм <sup>3</sup> , отсутствие солей кальция и магния  | Вторичные и третичные амины (2,4 кг)   | Экстракционные и ректификационные колонны  | 95–99 %                        |
| – перевод воды в твердую фазу                         | Опреснение вымораживанием             | Солесодержание до 35 г/дм <sup>3</sup>   | Различные хладагенты, естественный холод   | Установки с использованием искусственного холода, площадки для вымораживания                         | 87–92 %                        |
|   | Газогидратное опреснение              | То же  | Углеводороды с числом атомов углерода 1–4, их галоидные дериваты-фреоны и др. (потери реагентов обусловлены утечкой) | Газогидратные установки, включающие реактор-гидрообразователь, отдельитель и узел плавления гидратов | До 99 %                        |
| Использование подвижности ионов в электрическом поле  | Электродиализ                         | Общее солесодержание 3–10 г/дм <sup>3</sup> , мутность до 2 мг/дм <sup>3</sup> содержание железа до 0,3 мг/дм <sup>3</sup> | Расход электроэнергии 5–20 кВт·ч на 1 м <sup>3</sup> опресненной воды  | Установки для электрохимического обессоливания воды  | До 500–1000 мг/дм <sup>3</sup> |

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**(справочное)**  
**МЕТОДЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД [127]**

| Тип загрязняющих веществ                 | Группа загрязнений  | Методы очистки сточных вод   |
|--|---|--|
| Грубодисперсные взвешенные вещества      | Взвешенные вещества с размером частиц 0,5 мм                                | Просеивание.<br>Первичное отстаивание без реагентов.<br>Фильтрация                       |
| Грубодисперсные эмульгированные частицы  | Капельные загрязнения, органические вещества, не смешивающиеся с водой      | Гравитационная сепарация.<br>Фильтрация.<br>Флотация (электрофлотация)                   |
| Микрочастицы                             | Взвешенные вещества с размером частиц более 0,01 мм                         | Фильтрация.<br>Коагуляция + флокуляция.<br>Напорная флотация                             |
| Стабильные эмульсии                      | Нефтепродукты в количестве > 5 мг/л, вещества, экстрагируемые серным эфиrom | Тонкослойная седиментация.<br>Напорная флотация.<br>Электрофлотация                      |
| Коллоидные частицы                       | Размер частиц от 0,1 до 10 мкм  | Микрофильтрация.<br>Электрофлотация  |
| Агрессивность среды                      | pH, общая щелочность, общая кислотность                                     | Нейтрализация  |
| Масла                                    | Концентрация масел более 10 мг/л  | Гравитационная сепарация.<br>Флотация (электрофлотация)                                  |
| Фенолы                                   | Концентрация фенолов 0,5–5 мг/л   | Биологическая очистка + озонирование.<br>Сорбция на активированном угле                  |
|  | Концентрация фенолов 5–500 мг/л   | Биологическая очистка.<br>Флотация + биологическая очистка.<br>Коагуляция + озонирование |
| Высокое содержание органических примесей | Органические соединения   | Биологическая очистка.<br>Химическое окисление (озон).<br>Сорбция на активированном угле |

*Окончание приложения B*

| Тип загрязняющих веществ       | Группа загрязнений  | Методы очистки сточных вод  |
|--------------------------------|---|---|
| Ионы тяжелых металлов          | Концентрации<br>$\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , $\text{Cd}^{2+}$ 5–100 мг/л | Электроагрегация, электрофлотация.<br>Отстаивание.<br>Электродиализ.                                  |
|                                | Концентрации<br>$\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , $\text{Cd}^{2+}$ 5–100 мг/л | Ультрафильтрация.<br>Ионный обмен   |
| Цианиды                        | Концентрация $\text{CN}^-$ 1–10 мг/л  | Химическое окисление.<br>Электрофлотация.<br>Электрохимическое окисление                              |
| Хром (VI)                      | Концентрация $\text{Cr}^{6+}$ 1–100 мг/л  | Химическое восстановление.<br>Электроагрегация, электрофлотация,<br>Электрохимическое восстановление. |
| Хром (III)                     | Концентрация $\text{Cr}^{3+}$ 5–100 мг/л  | Осаждение + фильтрация.<br>Электрофлотация  |
|                                | Концентрация $\text{Cr}^{3+}$ 0,5–5 мг/л  | Ионный обмен.<br>Ультрафильтрация   |
| Сульфаты                       | Концентрация $\text{SO}_4^{2-} > 2000$ мг/л   | Реагентный + отстаивание + фильтрация.<br>Вакуумное выпаривание                                       |
|                                | Концентрация $\text{SO}_4^{2-} < 2000$ мг/л   | Нанофильтрация.<br>Обратный осмос   |
| Хлориды                        | Концентрация $\text{Cl}^- > 300$ мг/л   | Обратный осмос, электродиализ<br>Вакуумное выпаривание  |
| Общее солесодержание           | Соли  | Нанофильтрация.<br>Обратный осмос.<br>Вакуумное выпаривание электродиализ                             |
| Поверхностно-активные вещества | Анионные и неионогенные ПАВ   | Флотация (электрофлотация).<br>Сорбция на активированном угле   |
|                                | Анионные, катионные и неионогенные ПАВ  | Ультрафильтрация (nanoфильтрация).<br>Озонирование  |

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**  
 (справочное)  
**ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ВОДЫ [127]**

| Показатель                                | Единицы измерения  | СанПиН 2.1.4.1074-01<br>Питьевая вода | ГОСТ 2874-82<br>Вода питьевая | Руководство<br>ВОЗ | Директива<br>ЕС 98/83/ЕС |
|---|--------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|
| <b>Органолептические показатели</b>       |                    |                                       |                               |                    |                          |
| Запах                                     | Баллы              | 2                                     | 2                             | отс.               | Приемлем.                |
| Привкус                                   | —                  | 2                                     | 2                             | отс.               | Приемлем.                |
| Цветность                                 | Градусы            | 20 (35)                               | 20                            | 15                 | Приемлем.                |
| Мутность                                  | ЕМФ                | 2,6 (3,5)                             |                               |                    | Приемлем.                |
| Мутность                                  | мг/л               | 1,5 (2)                               | 1,5                           | 0,5                |                          |
| <b>Обобщенные показатели</b>              |                    |                                       |                               |                    |                          |
| Водородный показатель,                    | Единицы рН         | 6,0–9,0                               | 6,0–9,0                       | 6,5–8,5            | 6,5–9,5                  |
| Общая минерализация (сухой остаток)       | мг/л               | 1000 (1500)                           | 1000                          |                    |                          |
| Проводимость при $t = 20^{\circ}\text{C}$ | мкСм/см            |                                       |                               |                    | 2500                     |
| Жесткость общая                           | мг-экв/л           | 7,0 (10)                              | 7,0                           |                    |                          |
| Окисляемость перманганатная               | мг $\text{O}_2$ /л | 5,0                                   |                               |                    | 5,0                      |
| Растворенный кислород                     | % от насыщения     |                                       |                               |                    | Не менее 75              |
| Нефтепродукты, суммарно                   | мг/л               | 0,1                                   | 0,3                           |                    |                          |
| Анионоактивные ПАВ                        | —                  | 0,5                                   |                               |                    |                          |
| Фенольный индекс                          | —                  | 0,25                                  |                               |                    |                          |
| <b>Неорганические вещества</b>            |                    |                                       |                               |                    |                          |
| Аммоний ( $\text{NH}_4^+$ ) по азоту      | мг/л               | 2,0                                   | 0,5                           |                    | 0,2                      |
| Алюминий ( $\text{Al}^{3+}$ )             | —                  | 0,5                                   | 0,5                           | 0,2                | 0,5                      |
| Барий ( $\text{Ba}^{2+}$ )                | —                  | 0,1                                   |                               | 0,7                |                          |
| Бериллий ( $\text{Be}^{2+}$ )             | —                  | 0,0002                                | 0,0002                        | н/а                |                          |
| Бор (B, суммарно)                         | —                  | 0,5                                   |                               | 0,3                | 1,0                      |

*Продолжение приложения Г*

|   |      |            |       |          |          |
|---|------|------------|-------|----------|----------|
| Бромиды (Br <sup>-</sup> )                  | –    | 0,2        |       |          |          |
| Гидросульфиды (HS <sup>-</sup> )            | –    | 3,0        |       |          |          |
| Железо (Fe, суммарно)                       | –    | 0,3 (1,0)  | 0,3   | 0,3      | 0,2      |
| Кадмий (Cd, суммарно)                       | –    | 0,001      |       | 0,003    | 0,005    |
| Кремний                                     | –    | 10         |       |          |          |
| Литий                                       | –    | 0,03       |       |          |          |
| Марганец (Mn, суммарно)                     | –    | 0,1 (0,5)  | 0,1   | 0,1      | 0,05     |
| Медь (Cu, суммарно)                         | –    | 1,0        | 1,0   | 1,0      | 2,0      |
| Молибден (Mo, суммарно)                     | –    | 0,25       | 0,25  | 0,07     |          |
| Мышьяк (As, суммарно)                       | –    | 0,05       | 0,05  | 0,01     | 0,01     |
| Натрий                                      | –    | 200        |       | 200      | 200      |
| Никель (Ni, суммарно)                       | –    | 0,1        |       | 0,02     | 0,02     |
| Нитраты (по NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )  | –    | 45         | 45    | 50       | 50       |
| Нитриты (по NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )  | –    | 3,0        | 0,1   | 3,0      | 0,5      |
| Ртуть (Hg, суммарно)                        | –    | 0,0005     |       | 0,001    | 0,001    |
| Свинец (Pb, суммарно)                       | –    | 0,03       | 0,03  | 0,01     | 0,01     |
| Селен (Se, суммарно)                        | –    | 0,01       | 0,001 | 0,01     | 0,01     |
| Серебро                                     | –    | 0,05       |       |          |          |
| Сероводород                                 | –    | 0,003      |       | 0,05     |          |
| Стронций (Sr <sup>2+</sup> )                | –    | 7,0        | 7,0   |          |          |
| Сульфаты (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )   | –    | 500        | 500   | 250      | 250      |
| Фториды (F):                                | мг/л | 1,5        | 1,5   | 1,5      | 1,5      |
| – для климатических районов I и II          |      | 1,2        | 1,5   | 1,2      |          |
| – для климатического района III             |      |            |       |          |          |
| Хлориды (Cl <sup>-</sup> )                  | –    | 350        | 350   | 250      | 250      |
| Хром (Cr <sup>3+</sup> / Cr <sup>6+</sup> ) | –    | 0,5 / 0,05 |       | – / 0,05 | – / 0,05 |

| Показатель  | Единицы измерения                       | СанПиН 2.1.4.1074-01<br>Питьевая вода | ГОСТ 2874-82<br>Вода питьевая | Руководство<br>ВОЗ | Директива<br>ЕС 98/83/ЕС |
|---|---|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|
| Цианиды (CN <sup>-</sup> )  | —                                       | 0,035                                 |                               | 0,07               | 0,05                     |
| Цинк (Zn <sup>2+</sup> )  | —                                       | 5,0                                   | 5,0                           | 3,0                |                          |
| <b>Содержание вредных химических веществ, поступающих и образующихся в воде в процессе ее обработки</b> |   |                                       |                               |                    |                          |
| Хлор остаточный свободный   | мг/л                                    | В пределах 0,3–0,5                    | 0,3–0,5                       | 0,2–0,5            |                          |
| Хлор остаточный связанный   | —                                       | 0,8–1,2                               | 0,8–1,2                       |                    |                          |
| Озон остаточный   | —                                       | 0,3                                   | 0,1–0,3                       |                    |                          |
| Формальдегид (при озонировании воды)  | —                                       | 0,05                                  |                               |                    |                          |
| Полиакриламид   | —                                       | 2,0                                   |                               |                    |                          |
| Активированная кремнекислота (по Si)  | —                                       | 10                                    |                               |                    |                          |
| Полифосфаты (по PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )   | —                                       | 3,5                                   |                               |                    |                          |
| Al- и Fe-содержащие коагулянты  | —                                       | Алюминий / Железо                     |                               |                    |                          |
| <b>Микробиологические и паразитологические показатели</b>   |   |                                       |                               |                    |                          |
| Гельминты   |   |                                       | Отс.                          | Отс.               |                          |
| Коли-индекс   |   | 0                                     | 3                             | 0                  |                          |
| Колифаги  | БОЕ/100 мл                              | 0                                     |                               | Отс.               |                          |
| Общие колiformные бактерии  | Число бактерий в 100 мл                 | Отс.                                  |                               |                    | 0                        |
| Общее микробное число   | Число образующих колонии бактерий в 1мл | 50                                    |                               |                    |                          |
| Простейшие  |   |                                       | Отс.                          | Отс.               |                          |
| Споры клоストридий  | Число спор в 20 мл                      | Отс.                                  |                               |                    |                          |
| Термотолерантные колiformные бактерии   | Число бактерий в 100 мл                 | Отс.                                  | 100                           |                    |                          |
| Условно патогенные  |   |                                       | Отс.                          | Отс.               |                          |
| Цисты лямблий   | Число цист в 50 л                       | Отс.                                  | Отс.                          | Отс.               |                          |

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**(справочное)**

**МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ  
 ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

| Показатель   | Единица измерения   | Норматив     |
|--|---|--------------|
| Термотолерантные колiformные бактерии (ТКБ)  | Число бактерий в 100 см <sup>3</sup> *                      | Отсутствие   |
| Общие колiformные бактерии (ОКБ)**   | Число бактерий в 100 см <sup>3</sup> *                      | Отсутствие   |
| Общее микробное число (ОМЧ)**  | Число образующих колонии бактерий (КОЕ) в 1 см <sup>3</sup> | Не более 50  |
| Колифаги ***   | Число бляшкообразующих единиц (БОЕ) в 100 см <sup>3</sup>   | Отсутствие   |
| Цисты лямблей ***  | Число цист в 50 дм <sup>3</sup>                             | Отсутствие   |
| Ооцисты криптоспоридий ***   | Число цист в 50 дм <sup>3</sup>                             | Отсутствие   |
| Споры сульфитредуцирующих клостридий ****  | Число спор в 20 см <sup>3</sup>                             | Отсутствие   |
| Энтеровирусы   | Число геномных эквивалентов в 1000 дм <sup>3</sup>          | Отсутствие   |
| Legionella pneumophila:<br>– в образцах воды из систем горячего и холодного водоснабжения в бассейнах, аквапарках, джакузи общественного пользования, SPA-салонах, организациях, оказывающих банные услуги, гостиницах | Число образующих колонии бактерий в 1 дм <sup>3</sup>       | Не более 100 |

|   |  |             |
|---|--|-------------|
| <p>– в образцах воды из систем горячего и холодного водоснабжения в отделениях реанимации и интенсивной терапии больничных организаций здравоохранения</p>  |  | Не более 50 |
| <b>Примечания</b>   |  |             |
| * Проводится трехкратное исследование в 100 см <sup>3</sup> отобранный пробы воды.  |  |             |
| ** Превышение норматива не допускается в 95 % проб, отбираемых в точках водозабора наружной и внутренней водопроводной сети в течение 12 месяцев, при количестве исследуемых проб не менее 100 за год. Превышение допускается в единичных, но не в двух последовательно отобранных в одной и той же точке пробах. Уровень загрязнения при этом по показателю ОКБ – не более 2 КОЕ (колоний образующих единиц) бактерий семейства Enterobacteriaceae в 100 см <sup>3</sup> . |  |             |
| *** Определение проводится в системах питьевого водоснабжения с водозабором из поверхностных водных объектов или из подземных водных объектов с влиянием поверхностных вод.   |  |             |
| **** Определение проводится при оценке эффективности технологии обработки воды в централизованных системах питьевого водоснабжения с водозабором из поверхностных водных объектов или из подземных водных объектов с влиянием поверхностных вод.  |  |             |

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е**

(справочное)

**ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ  
ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ, СВЯЗАННЫЕ С ПОСТУПЛЕНИЕМ И ОБРАЗОВАНИЕМ ВЕЩЕСТВ В  
ПИТЬЕВОЙ ВОДЕ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ОБРАБОТКИ И В СИСТЕМЕ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

| Показатель  | Единица измерения  | Норматив (ПДК), не более            | Лимитирующий показатель вредности | Класс опасности |
|---|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| 1 Диоксид хлора   | мг/дм <sup>3</sup> | 0,2                                 | С.-т., орг. (запах)               | 3               |
| 2 Хлор остаточный связанный                                       | мг/дм <sup>3</sup> | В пределах 0,8–1,2                  | Орг.                              | 3               |
| 3 Хлор остаточный свободный                                       | мг/дм <sup>3</sup> | В пределах 0,3–0,5                  | Орг.                              | 3               |
| 4 Озон остаточный   | мг/дм <sup>3</sup> | 0,3                                 | Орг.                              |                 |
| 5 Бромдихлорметан   | мг/дм <sup>3</sup> | 0,03                                | С.-т., к                          | 1               |
| 6 Бромоформ   | мг/дм <sup>3</sup> | 0,1                                 | С.-т.                             | 2               |
| 7 Дибромхлорметан   | мг/дм <sup>3</sup> | 0,03                                | С.-т.                             | 2               |
| 8 Формальдегид (при озонировании воды)                            | мг/дм <sup>3</sup> | 0,05                                | С.-т.                             | 2               |
| 9 Хлороформ (при хлорировании воды)                               | мг/дм <sup>3</sup> | 0,2                                 | С.-т., к                          | 2               |
| 10 Акриламид  | мг/дм <sup>3</sup> | 0,0001                              | С.-т.                             | 1               |
| 11 Активированная кремнекислота (по Si)                           | мг/дм <sup>3</sup> | 10                                  | С.-т.                             | 2               |
| 12 Винилхлорид  | мг/дм <sup>3</sup> | 0,0003                              | С.-т., к                          | 1               |
| 13 Остаточное количество алюминий- и железосодержащих коагулянтов | мг/дм <sup>3</sup> | По показателям «алюминий», «железо» | —                                 | —               |
| 14 Полифосфаты (по PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )                | мг/дм <sup>3</sup> | 3,5                                 | Орг.                              | 3               |
| 15 Эпихлоргидрин  | мг/дм <sup>3</sup> | 0,0001                              | С.-т., к                          | 1               |
| 16 По сумме тригалометанов  | Единица            | 1                                   | —                                 | —               |

**Примечания**

1 Перечень контролируемых показателей безопасности, связанных с поступлением и образованием веществ в питьевой воде в процессе ее обработки и в системе водоснабжения, определяется исходя из используемых для водоподготовки методов, материалов и реагентов.

2 При указании лимитирующего показателя вредности вещества используются следующие сокращения: «с.-т.» – санитарно-токсикологический, «орг.» – органолептический, «к» – канцероген.

3 При обеззараживании воды свободным хлором время его контакта с водой должно составлять не менее 30 минут, связанным – не менее 60 минут.

Контроль за содержанием остаточного хлора производится перед подачей воды в распределительную сеть.

При одновременном присутствии в воде свободного и связанного хлора их общая концентрация не должна превышать 1,2 мг/дм<sup>3</sup>.

4 Контроль за содержанием остаточного озона производится после камеры смешения при обеспечении времени контакта не менее 12 минут.

5 Расчет показателей, включенных в раздел «Комплексные показатели токсичности», проводится путем суммирования отношений фактически обнаруженных концентраций каждого из веществ в питьевой воде ( $C_1, C_2 \dots C_n$ ) к соответствующей ПДК ( $\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2 \dots \text{ПДК}_n$ ) по формуле

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n}.$$

6 При расчете показателей, включенных в раздел «Комплексные показатели токсичности», учитывается содержание веществ, предусмотренных в пунктах 5–7 и 9 настоящей таблицы.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж**

*(справочное)*

**ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ  
ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ**

| Показатель   | Единица измерения   | Норматив (ПДК), не более | Лимитирующий показатель вредности | Класс опасности |
|--|---|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Запах  | Баллы   | 2                        | Орг.                              | —               |
| Мутность   | ЕМФ (единицы мутности по формазину) или мг/дм <sup>3</sup> (по коалину) | 2,6 (3,5)<br>1,5 (2)     | Орг.                              | —               |
| Привкус  | Баллы   | 2                        | Орг.                              | —               |
| Цветность  | Градусы   | 20 (35)                  | Орг.                              | —               |
| Водородный показатель                                | Единицы pH  | В пределах 6–9           | —                                 | —               |
| Жесткость общая                                      | Градус жесткости (°Ж)   | 7,0 (10)                 | —                                 | —               |
| Нефтепродукты (суммарно)                             | мг/дм <sup>3</sup>  | 0,1                      | —                                 | —               |
| Окисляемость перманганатная                          | мг/дм <sup>3</sup>  | 5,0                      | —                                 | —               |
| Поверхностно-активные вещества (ПАВ), анионоактивные | мг/дм <sup>3</sup>  | 0,05                     | —                                 | —               |
| Сухой остаток  | мг/дм <sup>3</sup>  | 1000                     | —                                 | —               |
| Фенольный индекс                                     | мг/дм <sup>3</sup>  | 0,25                     | —                                 | —               |
| Алюминий (Al)*                                       | мг/дм <sup>3</sup>  | 0,5                      | С.-т.                             | 2               |
| Барий (Ba)*  | мг/дм <sup>3</sup>  | 0,7                      | С.-т.                             | 2               |
| Бор (B)*   | мг/дм <sup>3</sup>  | 1,0                      | С.-т.                             | 2               |
| Железо (Fe)*   | мг/дм <sup>3</sup>  | 0,3 (1,0)                | Орг.                              | 3               |

|  |                    |           |          |   |
|--|--------------------|-----------|----------|---|
| Кадмий (Cd)*                                 | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,001     | С.-т.    | 2 |
| Марганец (Mn)*                               | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,1 (0,5) | Орг.     | 3 |
| Медь (Cu)*                                   | Мг/дм <sup>3</sup> | 1,0       | С.-т.    | 3 |
| Мышьяк (As)*                                 | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,01      | С.-т., к | 1 |
| Никель (Ni)*                                 | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,02      | С.-т.    | 2 |
| Нитраты (по NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )   | Мг/дм <sup>3</sup> | 45        | Орг.     | 3 |
| Ртуть (Hg)*                                  | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,0005    | С.-т.    | 1 |
| Свинец (Pb)*                                 | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,01      | С.-т.    | 2 |
| Селен (Se)*                                  | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,01      | С.-т.    | 2 |
| Сульфаты (по SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) | Мг/дм <sup>3</sup> | 500       | Орг.     | 4 |
| Сурьма (Sb)*                                 | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,005     | С.-т.    | 2 |
| Фтор (F)*                                    | Мг/дм <sup>3</sup> | 1,5       | С.-т.    | 2 |
| Хлориды (Cl <sup>-</sup> )                   | Мг/дм <sup>3</sup> | 350       | Орг.     | 4 |
| Хром (Cr)*                                   | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,05      | С.-т.    | 2 |
| Цианиды (CN <sup>-</sup> )                   | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,035     | С.-т.    | 2 |
| Цинк (Zn)*                                   | Мг/дм <sup>3</sup> | 5,0       | Орг.     | 3 |
| γ-ГХЦГ (линдан)                              | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,002**   | С.-т.    | 1 |
| ДДТ (сумма изомеров)                         | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,001**   | С.-т.    | 2 |
| 2,4-Д  | Мг/дм <sup>3</sup> | 0,03**    | С.-т.    | 2 |
| Пестициды                                    | Мг/дм <sup>3</sup> |           |          |   |
| По сумме нитратов и нитритов                 | Единица            | 1         | -        | - |
| По сумме пестицидов                          | Единица            | 1         | -        | - |

\* Для неорганических соединений, в том числе переходных элементов, с учетом валового содержания форм.

\*\* Нормативы приняты в соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения.

## *Продолжение приложения Ж*

### *Примечания*

1 При указании лимитирующего показателя вредности вещества используются следующие сокращения: «с.-т.» – санитарно-токсикологический, «орг.» – органолептический, «к» – канцероген.

2 Отбор проб питьевой воды из внутренней распределительной сети для оценки соответствия по химическим показателям безопасности, характеризующим влияние материалов системы водоснабжения на ее состав (медь, свинец, никель и др.), должен осуществляться в точках водоразбора без предварительных промывки и спуска воды.

3 При отсутствии линдана и ДДТ в пробах воды из источников по результатам лабораторных исследований, проведенных на этапах выбора источника централизованного питьевого водоснабжения и (или) расширенных исследований, в дальнейшем допускается проведение их контроля с кратностью 1 раз в 5 лет. В районах влияния захоронений пестицидов линдан и ДДТ подлежат контролю вне зависимости от результатов исследований.

Для контроля выбираются пестициды, которые потенциально могут присутствовать в источнике водозабора.

4 Расчет показателей, включенных в раздел «Комплексные показатели токсичности», проводится путем суммирования отношений фактически обнаруженных концентраций каждого из веществ в питьевой воде ( $C_1$ ,  $C_2 \dots C_n$ ) к соответствующей ПДК ( $\text{ПДК}_1$ ,  $\text{ПДК}_2 \dots \text{ПДК}_n$ ):

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n}$$

5 Пестициды включают органические инсектициды, гербициды, фунгициды, нематоциды, акарициды, альгициды, родентициды, слимициды и родственные продукты (их метаболиты).

Научное издание

*КУДИНА Елена Федоровна  
САВИЧ Вадим Викторович  
ТАРАЙКОВИЧ Александр Михайлович*

**ВОДА – ПРОДУКТ ПОТРЕБЛЕНИЯ  
И ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

Редактор *Е. Г. Привалова*  
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 12.09.2025 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 20,46. Уч.-изд. л. 20,98. Тираж 200 экз.  
Зак. № 1599. Изд. № 25.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/361 от 13.06.2014.  
№ 2/104 от 01.04.2014.  
№ 3/1583 от 14.11.2017.  
Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель