

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Н. С. РУЧАЙ, Р. М. МАРКЕВИЧ**

# **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ**

*Допущено  
Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия для студентов специальности  
«Биоэкология» учреждений, обеспечивающих получение  
высшего образования*

Минск 2006

УДК 663.18+628.543(075.8)

ББК 28.0+30.0я73

Р 92

Рецензенты:

кафедра общей экологии и методики преподавания биологии  
Белорусского государственного университета  
(профессор кафедры, доктор биологических наук *Л. В. Камлюк*);  
директор научно-производственного республиканского  
унитарного предприятия «ЛЮТИОС» кандидат химических наук  
*А. В. Якимова*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части  
не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования  
«Белорусский государственный технологический университет»*

**Ручай, Н. С.**

Р 92 Экологическая биотехнология : учеб. пособие для студентов  
специальности «Биоэкология» / Н. С. Ручай, Р. М. Маркевич. –  
Минск : БГТУ, 2006. – 312 с. : цв. ил.

ISBN 985-434-657-9.

Учебное пособие посвящено специфическому применению биотехнологии для решения проблем окружающей среды: биологической очистке стоков, газовоздушных выбросов, переработке твердых промышленных, растительных и бытовых отходов, а также технологиям, альтернативным химическим, по производству и использованию бактериальных удобрений, средств защиты растений. Рассмотрены технологии, применяемые в республике, а также получившие распространение в развитых странах, но еще не нашедшие должного развития в Республике Беларусь (производство биогаза, анаэробная очистка сточных вод, очистка сточных вод от биогенных элементов, производство биопестицидов).

УДК 663.18+628.543(075.8)

ББК 28.0+30.0я73

ISBN 985-434-657-9

© УО «Белорусский государственный  
технологический университет», 2006

© Ручай Н. С., Маркевич Р. М., 2006

## ВВЕДЕНИЕ

Деятельность человека все глубже проникает в биосферу – область активной жизни в оболочке Земли. Загрязнение биосферы обусловлено поступлением в окружающую среду побочных продуктов и отходов от промышленных и сельскохозяйственных производств, очистных сооружений, транспортных средств, полигонов для депонирования отходов.

Ежегодно от промышленных предприятий в атмосферу поступает 250 млн. т пыли, 220 млн. т золы. Газовоздушные выбросы содержат углеводороды, кислоты, альдегиды, кетоны, оксиды серы, азота и углерода, восстановленные соединения серы, аммиак, галогенсодержащие вещества. В воздухе крупных промышленных городов можно идентифицировать до 150 различных соединений.

Объем сточных вод, сбрасываемых в водостоки и водоемы, достигает 700 млрд. м<sup>3</sup> в год. В моря и океаны поступает около 10 млн. т нефти.

Большую нагрузку в результате антропогенной деятельности испытывают почвенные и подпочвенные горизонты (применение пестицидов, создание поверхностных накопителей и захоронение промышленных и бытовых отходов, осадков сточных вод). Высока опасность загрязнения подземных вод, самоочищение которых идет значительно медленнее, чем поверхностных.

Ситуация усугубляется тем, что в окружающую среду поступают синтетические вещества, не существующие в природе и не деградируемые в окружающей среде, многие из которых обладают биологической (в том числе канцерогенной) активностью. Происходит их аккумуляция в небиологических и биологических объектах.

Загрязнения оказывают различное *воздействие* на окружающую среду:

- 1) механическое – засорение веществами, не оказывающими физико-химического воздействия;
- 2) химическое – изменение химических свойств среды, влияющее на экосистемы;
- 3) физическое – трансформация физических параметров среды (повышение температуры вследствие выбросов нагретых газов и паров; нарушение естественной освещенности; увеличение интенсивности шума сверх природного уровня; изменение электромагнитных

свойств среды; повышение уровня содержания радиоактивных веществ);

4) биологическое – подавление развития и гибель отдельных видов, нарушение функционирования естественных биоценозов; распространение в экосистемах чуждых для них видов микроорганизмов, размножаемых в больших количествах в промышленных условиях; приобретение микроорганизмами патогенных свойств.

В сложившейся ситуации человечество вынуждено принимать меры по снижению отрицательного влияния своей деятельности на окружающую среду. Разрабатываются новые методы очистки сточных вод и газовоздушных выбросов, экономичные способы утилизации промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов.

В решении экологических проблем все большее значение приобретают возможности биотехнологии. К настоящему времени сформировалось новое направление – экологическая биотехнология как специфическое использование биотехнологии в решении вопросов охраны окружающей среды.

Применение биотехнологических методов в экологии имеет ряд существенных *преимуществ*:

- высокие катаболические возможности микроорганизмов и, соответственно, широкий спектр удаляемых загрязнений. Методы генетического конструирования позволяют получать штаммы микроорганизмов с гораздо более широкими биосинтетическими и биодеструктивными возможностями, чем у природных культур;

- осуществление процессов в нормальных (природных) условиях. В отличие от других методов нет необходимости использовать высокие температуры и давление;

- отсутствие вторичного загрязнения окружающей среды. В большинстве случаев происходит деструкция загрязнений до простых соединений.

Однако детоксикация отходов – это только первый, самый низкий, уровень применения методов биотехнологии. Более высокий уровень заключается в получении из отходов ценных продуктов. Перерабатывая отходы биотехнологическими методами, получают этанол, белок одноклеточных, биогаз, кормовые препараты витаминов и ряд других продуктов.

Альтернативные химическим технологиям современные биотехнологические процессы позволяют получать коммерческие препараты

(биопестициды, бактериальные удобрения, пробиотики), не причиняющие ущерба окружающей среде.

Настоящее учебное пособие посвящено возможностям биотехнологии, позволяющим улучшать экологическую обстановку. Рассмотрена биологическая очистка сточных вод, переработка промышленных, растительных и твердых бытовых отходов с получением ценных продуктов, биологическая очистка газовоздушных выбросов. А также уделено внимание биодegradации ксенобиотиков и поллютантов в окружающей среде, бактериальным удобрениям, биологической защите растений.

# Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СТОЧНЫХ ВОД И МЕТОДОВ ИХ ОЧИСТКИ

## 1.1. Характеристика сточных вод

**1.1.1. Объем и санитарно-химические показатели загрязнения сточных вод.** Сточные воды – воды, отводимые после использования в бытовой и производственной деятельности человека. Объем промышленных и бытовых стоков, образующихся в мире ежегодно, достигает 700 млрд. м<sup>3</sup>.

В Республике Беларусь Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды совместно с Министерством здравоохранения ежегодно издается «Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод», который готовит РУП ЦНИИКИВР (Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов). В кадастре приводятся и анализируются данные о состоянии природных (поверхностных и подземных) вод, об использовании водных ресурсов, о количестве и составе загрязнений, поступающих в природные источники со сточными водами, сведения об очистных сооружениях городов.

Согласно водному кадастру, в нашей республике образуется более 1300 млн. м<sup>3</sup> сточных вод в год.

Сложность состава сточных вод и невозможность установления каждого из загрязняющих веществ приводит к необходимости применять групповые (суммарные) показатели свойств воды, без идентификации отдельных веществ.

Полный санитарно-химический анализ сточной воды предполагает определение следующих показателей: температуры, окраски, запаха, прозрачности, величины рН, сухого остатка, плотного остатка и потерь при прокаливании, взвешенных веществ, оседающих веществ по объему и по массе, перманганатной окисляемости, химической потребности в кислороде (ХПК), биохимической потребности в кислороде (БПК), азота (общего, аммонийного, нитритного, нитратного), фосфатов, хлоридов, сульфатов, тяжелых металлов и других токсичных элементов, поверхностно-активных веществ, нефтепродуктов, растворенного кислорода, микробного числа, бактерий группы кишечной палочки (БГКП), яиц гельминтов.

Кроме перечисленных, в число обязательных показателей на городских очистных станциях может быть включено определение специфических примесей, поступающих в водоотводящую сеть от конкретных промышленных предприятий.

*Температура* – важный показатель, от которого зависит вязкость жидкости, а значит, скорость седиментации частиц, растворимость кислорода и скорость биохимических реакций при биологической очистке.

*Окраска* – один из органолептических показателей качества сточных вод. Как правило, наличие интенсивной окраски различных оттенков характерно для производственных сточных вод. Интенсивность окраски оценивают по разведению до бесцветной, например 1 : 400, 1 : 250 и т. д.

*Запах* – органолептический показатель, характеризующий наличие пахнущих веществ. Определяют качественно при температуре пробы 20°C, при неясно выраженном запахе пробу подогревают до 65°C.

*Значение pH* – показатель, чрезвычайно важный для биохимических процессов, скорость которых может значительно меняться при изменении величины pH. Кислые или щелочные производственные сточные воды должны быть нейтрализованы перед сбросом в водоотводящую сеть, чтобы предотвратить ее разрушение.

*Прозрачность* – показатель, который определяет общую загрязненность сточной воды нерастворенными и коллоидными примесями, не идентифицируя вид загрязнений.

*Сухой остаток* характеризует общую загрязненность сточной воды органическими и минеральными примесями в различных агрегатных состояниях (мг/дм<sup>3</sup>). Этот показатель устанавливают после выпаривания и дальнейшего высушивания при температуре 105°C пробы сточной воды. После прокаливания при 600°C определяют зольность сухого остатка, находят соотношение органической и минеральной частей загрязнений в сухом остатке.

*Плотный остаток* – это суммарное количество органических и минеральных веществ в профильтрованной пробе сточных вод (мг/дм<sup>3</sup>). Определяют при таких же условиях, как и сухой остаток. После прокаливания плотного остатка при 600°C оценивают соотношение органической и минеральной частей растворимых загрязнений сточных вод.

*Взвешенные вещества* – один из важнейших технологических показателей качества воды, позволяющий оценить количество осадков,

образующихся при очистке сточных вод. Потери при прокаливании взвешенных веществ устанавливают так же, как для сухого и плотного остатков, и выражают в виде процентного отношения минеральной части взвешенных веществ к их общему количеству по сухому веществу.

*Оседающие вещества* – часть взвешенных веществ, оседающих на дно отстойного цилиндра за 2 ч отстаивания в покое. Этот показатель характеризует способность взвешенных веществ к оседанию и позволяет оценить максимальный эффект отстаивания.

*Окисляемость* – групповой показатель. В зависимости от природы используемого окислителя различают химическую окисляемость, если используют химический окислитель, и биохимическую, когда роль окислительного агента выполняют аэробные бактерии. Результаты определения окисляемости независимо от вида окислителя выражают в мг  $O_2/дм^3$ .

В свою очередь, химическая окисляемость может быть перманганатной (окислитель  $KMnO_4$ ), бихроматной (окислитель  $K_2Cr_2O_7$ ) и иодатной (окислитель  $KIO_3$ ). Бихроматную и иодатную окисляемость называют химической потребностью в кислороде. Перманганатную окисляемость используют для установления содержания легкоокисляемых примесей, часто – с целью получения сравнительных данных.

Показатель БПК определяет количество кислорода, необходимое для жизнедеятельности микроорганизмов, участвующих в окислении органических соединений. Этот показатель характеризует биохимически окисляемую часть органических соединений сточной воды, находящихся в первую очередь в растворенном и коллоидном состояниях, а также в виде взвеси. Показатели БПК<sub>5</sub>, БПК<sub>20</sub>, БПК<sub>полн</sub> обозначают количество кислорода, потребляемое микроорганизмами при окислении загрязнений сточной воды на протяжении 5, 20 и 25 сут соответственно.

Отношение БПК<sub>полн</sub>/ХПК характеризует способность загрязнений сточных вод к биохимическому окислению. Для бытовых сточных вод это соотношение составляет 0,86, для производственных – изменяется в широких пределах, но, как правило, ниже, чем для бытовых.

*Азот* находится в сточных водах в виде органических (в основном вещества белковой природы) и неорганических соединений. Последние могут быть представлены восстановленными и окисленными формами. В городских сточных водах, как правило, окисленные соединения азота появляются после биологической очистки.

Соединения *фосфора* поступают в городские сточные воды с физиологическими выделениями людей, моющими средствами, содержатся в некоторых видах производственных вод.

Содержание азота и фосфора как биогенных элементов имеет значение для биологической очистки сточных вод.

Концентрация *хлоридов* и *сульфатов* влияет на общее солесодержание.

*Тяжелые металлы* (железо, никель, медь, свинец, цинк, кобальт, кадмий, хром, ртуть) и *другие токсичные элементы* (мышьяк, сурьма, бор, алюминий и др.) содержатся в сточных водах машиностроительных заводов, предприятий электронной, приборостроительной и других отраслей промышленности. Металлы находятся в виде ионов и комплексов с неорганическими и органическими веществами.

*Синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ)*, присутствующие в городских сточных водах, чаще являются анионоактивными или неионогенными соединениями. Эти два типа СПАВ определяют в городских сточных водах.

Концентрация *нефтепродуктов* в водоемах строго нормируется. Поскольку на городских очистных сооружениях степень их задержания не превышает 85%, в сточных водах, поступающих на очистку, содержание нефтепродуктов ограничивается.

*Растворенный кислород* в поступающих на очистные сооружения сточных водах отсутствует. Для протекания процесса аэробной очистки концентрация кислорода должна быть не менее 2 мг/дм<sup>3</sup>.

*Микробное число* оценивает общую обсемененность сточных вод микроорганизмами и косвенно характеризует степень загрязненности воды органическими веществами.

Содержание *бактерий группы кишечной палочки* и *яиц гельминтов* является важным санитарно-бактериологическим показателем.

**1.1.2. Классификация сточных вод.** В зависимости от *источника загрязнений* сточные воды классифицируются как бытовые (хозяйственно-фекальные), производственные и атмосферные.

*Бытовые* сточные воды образуются в жилых зданиях, учреждениях и предприятиях общественного назначения, а также в бытовых помещениях промышленных предприятий. Нормы удельного среднесуточного водоотведения на одного жителя колеблются от 150 л в сельских населенных пунктах до 550 л в крупных городах. Особенностью бытовых сточных вод является относительное постоянство их состава. Количество

загрязнений, поступающее в канализацию от одного жителя в сутки, – величина довольно постоянная (табл. 1).

Таблица 1

**Нормы загрязнений, поступающих в сточные воды от одного человека в сутки**

Показатель загрязнений в сточной воде	Норма, г/(чел. · сут)
Взвешенные вещества	65
БПК <sub>полн</sub> неосветленной жидкости	75
Аммонийный азот	8
Фосфаты (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	3,3
Фосфаты от моющих средств	1,6
Хлориды (Cl)	9
СПАВ	2,5

Из общей массы загрязнений 45–58% приходится на долю органических веществ, которые представлены белками, жирами, углеводами и продуктами их разложения. Неорганические примеси составляют частицы кварцевого песка, глины, соли (фосфаты, гидрокарбонаты, аммонийные соли). Уровень загрязненности бытовых сточных вод по ХПК составляет 150–600 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, по БПК – 100–400 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, содержание взвешенных веществ равно 100–300 мг/дм<sup>3</sup>.

Объем, состав и свойства *производственных* сточных вод зависят от профиля производства, выпускаемой продукции, применяемого сырья, режимов технологического процесса. Количество загрязнений в них колеблется в очень широких пределах и зависит от расхода воды на единицу продукции, производственного оборудования, совершенства технологического процесса (табл. 2). Производственные воды характеризуются неравномерностью притока и непостоянством состава, что отрицательно сказывается на работе очистных сооружений.

*Атмосферные* сточные воды образуются в результате выпадения осадков. К этой категории относят талые сточные воды и воды от поливки улиц. В атмосферных водах велика концентрация кварцевого песка, глинистых частиц, нефтепродуктов. В ливневых водах с территории промышленных предприятий содержатся загрязнения, характерные для данного производства. Особенность ливневого стока – это его эпизодичность и резко выраженная неравномерность по объему и составу загрязнений.

Таблица 2

## Общая характеристика и расходы сточных вод некоторых производств

Вид предприятия (выпускаемая продукция)	Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	Общий азот, мг/дм <sup>3</sup>	Фосфор, мг/дм <sup>3</sup>	БПК <sub>5полн</sub> , мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	ХПК, мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	рН	Удельное количество на единицу продукции, м <sup>3</sup> /т
Лакокрасочное (фенолформальдегидные смолы)	–	–	–	140	180	4	10
Биотехнологическое (аминокислоты)	1400	300	100	2200	3000	6–7	700
Фармацевтическое (витамины А, В <sub>1</sub> , В <sub>2</sub> , С)	1500	33	–	1500	2200	5–11	50
Молокоперерабатывающее	350	60	8	1200	1400	5–7	4
Сыродельное	600	90	16	2400	3000	5–7	5
Маргариновое	1800	2,5	1	3200	3800	6	4
Спиртовое (спирт из зерна)	450	–	–	500	600	6,5	190

Широко используется понятие *городские (коммунальные)* стоки, включающее, кроме бытовых, сточные воды предприятий, которые не имеют очистных сооружений и направляют стоки в городскую водоотводящую сеть.

В зависимости от *природы загрязнений* сточные воды делят на три группы:

1. Содержащие преимущественно минеральные загрязнения – сточные воды металлургического, машиностроительного, рудодобывающего производства, предприятий по производству минеральных удобрений, кислот, строительных изделий и материалов.

2. Содержащие преимущественно органические загрязнения – сточные воды предприятий пищевой, биотехнологической, целлюлозно-бумажной промышленности, производства пластмасс, каучука и др.

3. Содержащие и минеральные, и органические загрязнения – сточные воды предприятий нефтедобывающей, перерабатывающей и нефтехимической промышленности, легкой, фармацевтической, консервной и других отраслей промышленности.

В зависимости от *уровня загрязнения* производственные сточные воды делят на четыре категории:

1. Слабозагрязненные – сточные воды, которые могут быть переданы в систему канализации предприятия или города без предварительной обработки и при этом не окажут отрицательного воздействия на работу очистных сооружений. Эти стоки характеризуются следующими показателями: рН 6,5–8,5; БПК<sub>полн</sub> ≤ 500 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>; ХПК : БПК<sub>полн</sub> ≤ 1,5; общее содержание солей ≤ 1 г/дм<sup>3</sup>.

2. Загрязненные – сточные воды, которые могут быть переданы в систему канализации предприятия без предварительной обработки в цехах, но при этом для общего стока предприятия может потребоваться специальная локальная очистка перед подачей в городскую систему канализации. Показатели загрязненных сточных вод: рН 6,5–8,5; БПК<sub>полн</sub> > 500 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>; ХПК : БПК<sub>полн</sub> > 1,5.

3. Сильнозагрязненные (концентрированные) – стоки отдельных стадий технологического процесса, требующие специальной предварительной обработки перед сбросом в систему канализации предприятия. Эти стоки могут содержать специфические загрязнения в количествах, которые делают возможным и экономически целесообразным их извлечение, регенерацию или обезвреживание.

4. Токсичные – сточные воды, локальная очистка которых технически невозможна или экономически нецелесообразна, они содержат токсичные, неокисляемые или трудноокисляемые вещества. Такие воды запрещается сбрасывать в канализацию, они должны быть локализованы и переработаны либо уничтожены.

**1.1.3. Условия сброса сточных вод в городскую водоотводящую сеть.** Условия сброса сточных вод в городскую водоотводящую сеть определяются «Инструкцией об условиях приема сточных вод в коммунальную хозяйственно-фекальную канализацию».

Основные *требования* инструкции:

– производственные сточные воды не должны быть агрессивными по отношению к материалам водоотводящих сетей и сооружений, не должны содержать примеси такой крупности и такого удельного веса, которые могли бы засорять водоотводящую сеть города;

– в производственных сточных водах не должно быть горючих примесей – бензина, нефтепродуктов, эфиров, а также растворенных газообразных веществ, которые могли бы образовывать взрывоопасные

смеси. При биологической очистке городских стоков концентрация нефтепродуктов не должна превышать допустимого предела для биологической очистки;

- температура смеси хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод не должна превышать 40°C;

- сбрасываемые в городскую водоотводящую сеть сточные воды не должны содержать бактерий, попадающих с продуктами выработки вакцин и сывороток;

- средние значения рН должны находиться в пределах 6,5–8,5;

- производственные сточные воды, не отвечающие предъявляемым требованиям, подвергаются предварительной очистке на соответствующих локальных установках. Кроме того, предусматривается устройство гидравлических затворов в местах выпуска в городскую водоотводящую сеть.

Помимо инструкции, в каждом городе условия могут быть уточнены или дополнительно расширены местными властями с учетом состояния городских канализационных сетей, очистных сооружений, водоема – приемника очищенных сточных вод.

Например, требования к производственным сточным водам предприятий биотехнологического профиля, поступающим в водоотводящую сеть г. Минска, представлены в табл. 3.

**1.1.4. Воздействие сточных вод на водоемы.** В зависимости от характера загрязнений сточные воды могут оказывать на водоемы различное воздействие.

1. *Токсичное воздействие.* В зависимости от концентрации токсичных соединений оно проявляется по-разному. Летальные концентрации могут привести к гибели гидробионтов, меньшие концентрации вызывают у них изменение обмена веществ, поражение органов размножения, что приводит к сокращению количества особей данного вида. Кроме того, может проявляться мутагенный эффект.

Разные виды гидробионтов обладают различной устойчивостью к токсичным веществам. Например, мышьяк для планктонных рачков, дафний и циклопов смертелен в концентрации 0,25–2,5 мг/дм<sup>3</sup>, а для рыб – 10–20 мг/дм<sup>3</sup>. Соединения свинца вызывают гибель рачков при концентрации 0,5 мг/дм<sup>3</sup>, а рыб – 10–150 мг/дм<sup>3</sup>. Антисептик пентахлорфенол в нефтяном растворителе в концентрации 10 мг/дм<sup>3</sup> полностью подавляет развитие простейших, не влияя на количество бактерий.

Более того, снижение числа простейших, которыми питаются бактерии, приводит к массовому развитию последних.

Таблица 3

**Общие требования к производственным сточным водам предприятий биотехнологического профиля, поступающим в водоотводящую сеть г. Минска**

Показатель состава и свойств сточных вод	Предельно допустимая концентрация
Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>	400
БПК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	400
ХПК, мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	1000
рН	6,0–9,0
Азот аммонийный, мг/дм <sup>3</sup>	30
Фосфаты, мг/дм <sup>3</sup>	10
Хлориды, мг/дм <sup>3</sup>	350
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	500
Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	1000
Нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>	0,9
Сероводород (сульфиды), мг/дм <sup>3</sup>	1,0
Железо, мг/дм <sup>3</sup>	2,0

Чувствительность бактерий к токсичным веществам также не одинакова. Фенол применяется для дезинфекции, но в то же время некоторые специфические виды бактерий используют фенол в концентрации 3000 мг/дм<sup>3</sup> в качестве источника питания.

Таким образом, поступление токсичных веществ в водоем приводит к диспропорции в развитии отдельных видов гидробионтов, к нарушению взаимоотношений в экосистеме водоема.

**2. Изменение газового режима водоема.** Поступление в водоем органических веществ вызывает вспышку развития микроорганизмов. В процессе роста и окисления этих веществ они активно потребляют кислород, концентрация его в воде снижается и изменяется окислительно-восстановительный потенциал среды. Преобладают реакции восстановления, активно протекают денитрификация, сульфатредукция.

Изменение газового режима приводит к изменению состава биоценоза, развиваются формы, адаптированные к недостатку кислорода, органические вещества окисляются менее интенсивно, накапливаются продукты неполного окисления.

3. **Эвтрофикация водоемов.** Она заключается в обогащении воды биогенными элементами, особенно азотом и фосфором. В результате возрастает первичная продукция органического вещества благодаря интенсификации фотосинтеза водорослей и высших водных растений. Вода обогащается кислородом. Вначале это положительно сказывается на функционировании водных экосистем, увеличивается численность и биомасса гетеротрофов. Однако со временем наступает дисбаланс между наращиванием биомассы фитопланктона, образованием органического вещества и количеством кислорода, расходуемым на биологическую деструкцию и химическое окисление органического вещества. Органического вещества образуется больше, чем его могут разложить микроорганизмы. Накопление органического вещества стимулирует дальнейшее возрастание биомассы фитопланктона, усугубляется эвтрофикация.

В результате массового развития планктонных водорослей вода приобретает окраску (сине-зеленую, зеленую, красную, буро-желтую) в зависимости от пигментации возбудителей. Это явление называют «цветением» воды.

В условиях климата Беларуси основными возбудителями «цветения» являются цианобактерии (*Cyanophyta*), или сине-зеленые водоросли: *Microcystis aeruginosa*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Anabaena flos-aquae* и др.

В эвтрофицированных водоемах изменяются физико-химические свойства среды: повышается содержание органических веществ, снижается уровень насыщения воды кислородом, в придонных слоях появляются анаэробные зоны, возрастает мутность. Анаэробное разложение органических веществ сопровождается образованием метана, водорода, сероводорода, аммиака, газы выделяются в виде пузырьков. При растворении в воде эти вещества придают ей неприятный запах, создаются неблагоприятные условия для большинства водных животных.

Кроме того, разложение биомассы цианобактерий сопровождается образованием большого количества токсичных продуктов: фенола, индола, альготоксинов, пигментов.

4. **Механическое воздействие.** В городских и производственных сточных водах, поступающих в водоем, строго лимитируется содержание взвешенных веществ, поскольку при попадании в реку скорость потока, содержащего взвеси, снижается, и они выпадают на дно. В результате меняется рельеф дна, образуются отмели и плесы, изменяются форватеры рек.

Сверх того, твердые органические вещества становятся объектом воздействия микроорганизмов, что приводит к изменению газового режима, накоплению полурасложившихся остатков, заиливанию дна.

**1.1.5. Условия выпуска сточных вод в водоем.** Условия спуска сточных вод в водоемы регламентированы «Правилами охраны поверхностных вод от загрязнений сточными водами». Эти правила устанавливают нормативы качества воды водоемов по категориям водопользования: к первой категории относятся участки водоемов, применяемые в качестве источника для питьевого водоснабжения и водоснабжения предприятий пищевой промышленности. Ко второй – участки водоемов, используемые для спорта и отдыха населения.

Требования к составу и свойствам воды в водоемах и водотоках соответствующих категорий после выпуска в них сточных вод приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Допустимые изменения состава воды в водоемах и водотоках после выпуска в них сточных вод**

Показатели состава и свойств воды в водоеме после выпуска сточных вод	Требования к составу и свойствам воды в водоеме			
	хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения		рыбохозяйственного назначения	
	I категории	II категории	I категории	II категории
1	2	3	4	5
Содержание взвешенных веществ	Допускается увеличение не более чем на			
	0,25 мг/дм <sup>3</sup>	0,75 мг/дм <sup>3</sup>	0,25 мг/дм <sup>3</sup>	0,75 мг/дм <sup>3</sup>
Пленки нефтепродуктов, масел, жиров и других плавающих примесей	Не допускаются			
Запахи, привкусы и окраска	Допускаются запахи и привкусы интенсивностью не более 2-х баллов (непосредственно или после хлорирования воды). Окраска не должна обнаруживаться в столбике воды высотой		Посторонние запахи, привкусы и окраска воды, влияющие на мясо рыб, не допускаются	
	20 см	10 см		

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5
Температура воды	Допускается повышение не более чем на 3°C по отношению к среднемесячной температуре самого жаркого месяца		Допускается повышение не более чем на 5°C по отношению к естественной температуре воды	
Водородный показатель	Не должен выходить за пределы 6,5–8,5			
Минеральный состав воды	Сухой остаток должен быть не более 1000 мг/дм <sup>3</sup> (в том числе хлориды до 300 и сульфаты до 100 мг/дм <sup>3</sup> )		Не нормируется	
Наличие растворенного кислорода	Должно быть не менее 4 мг/дм <sup>3</sup>		Должно быть не менее 6 мг/дм <sup>3</sup>	Зимой должно быть не менее 4 мг/дм <sup>3</sup> , летом – не менее 6 мг/дм <sup>3</sup>
Биохимическая потребность в кислороде – БПК <sub>полн</sub> при температуре 20°C	Не должна превышать			
	3 мг/дм <sup>3</sup>	6 мг/дм <sup>3</sup>	3 мг/дм <sup>3</sup> (если в зимний период содержание кислорода в воде снижается для водоемов I категории до 6 мг/дм <sup>3</sup> , II категории до 4 мг/дм <sup>3</sup> , то разрешается только сброс воды, не влияющий на БПК)	
Возбудители заболеваний	Не допускаются (после обеззараживания биологически очищенных вод, коли-индекс не должен превышать 1000 при содержании остаточного хлора 1,5 мг/дм <sup>3</sup> )		–	
Токсичные вещества	Не допускаются в концентрациях, которые могут оказать прямо или косвенно вредное воздействие на живые организмы			

## 1.2. Методы очистки сточных вод

Выбор методов очистки сточных вод представляет собой довольно сложную задачу и зависит от целого ряда факторов: расхода сточных вод, уровня загрязненности воды, вида загрязнений, необходимой степени очистки, энергетических затрат и других технико-экономических показателей. Для городских сточных вод наибольшее распространение получила механобиологическая очистка, при очистке производственных сточных вод используются механические, химические, физико-химические и биологические методы. На рис. 1 представлены наиболее широко применяемые методы очистки сточных вод.



Рис. 1. Наиболее распространенные методы очистки сточных вод

**1.2.1. Механическая очистка сточных вод.** Механическая очистка применяется для выделения из сточных вод нерастворенных минеральных и органических примесей.

Как правило, механическая очистка – предварительный этап перед другими видами очистки, реже – окончательный. Механическая очистка позволяет выделить до 90–95% взвешенных веществ и снизить значение БПК<sub>полн</sub> сточной воды на 20–25%.

На современных *городских* очистных сооружениях механическая очистка включает: пропускание через решетки, пескоулавливание, отстаивание.

В городских сточных водах содержатся крупноразмерные (более 1 см) отходы, которые в процессе транспортирования по водотокающим сетям адсорбируют органические соединения, жиры. Образовавшийся адгезионный слой способствует налипанию песка, шлаков и других минеральных частиц. Таким образом, формируют-

ся многокомпонентные крупноразмерные органоминеральные составляющие отбросов, на которых песок проносится через песколовки, что затрудняет в дальнейшем работу отстойников и сооружений биохимической очистки. Крупноразмерные загрязнения удаляются из сточных вод при их прохождении через решетки, которые являются первым элементом технологических схем очистки городских сточных вод.

В городских сточных водах содержится значительное количество нерастворенных минеральных примесей (песка, шлака, боя стекла и др.). При совместном выделении минеральных и органических примесей в отстойниках затрудняется удаление осадка, уменьшается его текучесть, существует вероятность расслоения осадка на тяжелую и легкую части и накопления песка в отстойниках. Возможны затруднения в работе последующих сооружений при попадании в них песка. Поэтому в составе очистных сооружений за решетками проектируются песколовки, в которых под действием силы тяжести происходит выделение нерастворенных минеральных примесей.

Отстаивание является самым простым и наименее энергоемким методом выделения из сточных вод грубодиспергированных примесей с плотностью, отличной от плотности воды. Под действием силы тяжести частицы загрязнений оседают на дно сооружения либо всплывают на его поверхность.

Выбор метода очистки от взвешенных частиц *производственных* сточных вод определяется размерами частиц и кинетикой их осаждения. Диаметры частиц могут колебаться от 0,005 до 500 мкм.

Если частицы достаточно велики ( $d > 50$  мкм), они могут быть выделены отстаиванием (при большой концентрации) или фильтрацией через микрофильтры (при малой концентрации).

Мелкодисперсные частицы (диаметром от 0,1 до 1,0 мкм) могут удаляться фильтрованием через слой зернистых материалов с использованием сетчатых барабанных фильтров, микрофильтров, фильтров с плавающей загрузкой. Достоинством фильтрования является отсутствие химических реагентов, однако из-за ограниченной емкости фильтрующего слоя этот метод не годится для очистки значительных объемов воды. Большее распространение получило отстаивание, причем для повышения интенсивности отстаивания применяют преаэрацию, коагулирование (в том числе биокоагулирование), осветление во взвешенном или тонком слое.

При создании замкнутых систем водопользования предъявляются особенно высокие требования к эффективности функционирования сооружений механической очистки. Этим требованиям удовлетворяют новые конструкции многополочных отстойников, напорных, многоярусных гидрофильтров и др.

**1.2.2. Химическая очистка сточных вод.** Может применяться как самостоятельный метод перед подачей воды в систему оборотного водоснабжения либо перед спуском в городскую водоотводящую сеть или водоем.

В ряде случаев используется перед биологической или физико-химической очисткой.

Кроме того, химическая обработка находит применение как метод глубокой очистки городских сточных вод с целью их обеззараживания и производственных сточных вод – с целью обесцвечивания либо удаления различных компонентов.

**Нейтрализация.** Сточные воды некоторых технологических процессов содержат щелочи или кислоты, в кислых водах могут находиться соли тяжелых металлов. Чтобы предупредить коррозию материалов канализационных сооружений, нарушение биохимических процессов в сооружениях биологической очистки, а также для осаждения тяжелых металлов, проводят нейтрализацию сточных вод.

Подвергать нейтрализации нужно воды, имеющие значение  $pH < 6,5$  и  $pH > 8,5$ . При условии объединения бытовых и производственных сточных вод необходимо учитывать щелочной резерв бытовых.

Чаще в производстве образуются кислые сточные воды, загрязненные минеральными кислотами  $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ,  $HNO_3$ , реже –  $HNO_2$ ,  $H_3PO_4$ ,  $H_2SO_3$ ,  $H_2S$ , органическими кислотами.

Применяют следующие *способы* нейтрализации:

- 1) взаимная нейтрализация кислых и щелочных сточных вод;
- 2) нейтрализация реагентами (негашеная ( $CaO$ ) и гашеная ( $Ca(OH)_2$ ) известь, кальцинированная ( $Na_2CO_3$ ) и каустическая ( $NaOH$ ) сода, аммиачная вода);
- 3) фильтрация через нейтрализующие материалы (известь, известняк ( $CaO_3$ ), доломит ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ), магнезит ( $MgCO_3$ ), мел);
- 4) нейтрализация щелочных сточных вод дымовыми газами, содержащими диоксиды углерода, серы, азота и др. Одновременно производят очистку газов.

**Окисление.** Применяется для обезвреживания производственных сточных вод, содержащих токсичные примеси (например, цианиды окисляются до нетоксичных цианатов), соединения, которые невозможно или нецелесообразно извлекать другими методами (сероводород, сульфиды). Такие загрязнения содержатся в сточных водах машиностроительной, горнодобывающей, нефтехимической, целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности.

В качестве окислителей используют хлор, гипохлориты Ca и Na, хлорную известь (содержит 28–38% активного хлора), диоксид хлора, озон, технический кислород и кислород воздуха. В ряде случаев (для окисления фенолов, крезолов, цианидсодержащих примесей) могут применяться пероксид водорода, перманганат и бихромат K.

Кроме того, окисление (хлорирование, озонирование) используется для обеззараживания городских сточных вод перед выпуском их в водоём и природных сточных вод – в системе водоподготовки.

По сравнению с хлором озон имеет ряд преимуществ. Благодаря высокой окислительной способности он способствует не только обеззараживанию воды, но и деструкции трудноокисляемых органических и неорганических загрязнений. При этом не происходит вторичного загрязнения воды, процесс легко поддается автоматизации.

**1.2.3. Физико-химическая очистка сточных вод.** Физико-химические методы применяют как самостоятельные методы очистки, так и в сочетании с механическими, химическими, биохимическими. Эти методы используют для очистки сточных вод предприятий химической, нефтехимической, целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей, легкой, текстильной и других отраслей промышленности. Коагулирование находит применение при очистке городских сточных вод.

**Коагулирование.** Производственные и бытовые сточные воды содержат коллоидные частицы, размер которых составляет 0,001–0,1 мкм. Доля загрязнений, относящихся по физико-химическим свойствам к коллоидным, в городских сточных водах достигает 50–60%. Характерной особенностью коллоидных частиц является образование двойного электрического слоя, одна часть которого – неподвижная – соприкасается с поверхностью дисперсной частицы, а другая – диффузная – образована ионным облаком. Разность потенциалов между подвижной и неподвижной частями двойного электрического слоя – электрокинетический потенциал – определяет величину электроста-

тических сил отталкивания частиц, которые обеспечивают устойчивость коллоидной системы.

В качестве коагулянтов используют сульфат алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), алюминат натрия ( $\text{NaAlO}_2$ ), гидроксохлорид алюминия ( $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$ ), железосодержащие коагулянты – сульфаты двух- и трехвалентного железа:  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , а также хлорид железа ( $\text{FeCl}_3$ ). В результате гидролиза солей образуются малорастворимые гидроксиды, которые формируют в воде дисперсную систему с противоположным зарядом, что способствует сближению дисперсных частиц загрязнений и коагулянта. В итоге нейтрализуется диффузный слой и снижается величина электрокинетического потенциала. Следовательно, коагуляция – это нарушение агрегативной устойчивости коллоидной системы вследствие уменьшения заряда частиц. В результате коагуляции дисперсная система сточных вод может утратить седиментационную устойчивость и становится доступной для разделительных процессов.

Кроме того, образующиеся флоккулы гидроксидов металлов обладают развитой поверхностью и сорбируют многие дисперсные загрязнения сточных вод. При этом могут извлекаться вещества, не участвовавшие в процессе коагуляции.

Таким образом, процесс коагулирования загрязнений сточных вод многостадийный. На первом этапе в смесителе раствор коагулянта распределяется в объеме воды. Далее в камере хлопьеобразования вследствие медленного и продолжительного перемешивания происходит столкновение дисперсных частиц. С повышением интенсивности перемешивания сначала наблюдается увеличение размеров хлопьев в связи с ускорением коагуляции, а затем – разрушение рыхлых и образование более компактных агрегатов. На последней стадии при отстаивании или флотации происходит отделение сформировавшихся хлопьев.

Следует отметить, что в результате коагулирования и последующего отделения осадков из сточных вод могут быть удалены не только взвешенные вещества и коллоидные соединения, но и некоторая часть растворенных загрязнений.

Во-первых, как отмечалось выше, они сорбируются на поверхности флокул гидроксидов.

Во-вторых, соединения фосфора, например, находящиеся в растворенном состоянии, в процессе коагулирования образуют слаборастворимые фосфаты алюминия, железа или кальция и выпадают в осадок.

В-третьих, в результате сорбции и соосаждения гидроксидов удаляются тяжелые металлы. Полнота их удаления зависит от свойств металлов и значения рН сточной воды.

Для интенсификации процессов отделения скоагулированных загрязнений применяют флокулянты. Это, как правило, высокомолекулярные соединения неионогенной (крахмал, поливиниловый спирт, полиакрилонитрил), анионной (лигносульфонаты, полиакрилат и альгинат натрия), катионной (полиэтиленимин) либо амфотерной (полиакриламид, белки) природы.

Механизм действия флокулянтов заключается в адсорбции молекул флокулянта одновременно на нескольких частицах с образованием между ними полимерных мостиков, в результате чего образуются трехмерные структуры. Они способствуют более быстрому формированию флокул, обладающих хорошими седиментационными свойствами.

В технологии коагулирования используют разные схемы, обеспечивающие наилучшие результаты очистки сточных вод в конкретных условиях:

- 1) раствор коагулянта подают в очищаемую воду в начале смесителя;
- 2) часть ранее скоагулированных и отделенных примесей возвращают в место подачи коагулянта. Рециркуляция способствует ускорению процесса и образованию более плотных хлопьев;
- 3) реагенты вводят в небольшой объем очищаемой воды, которую затем быстро смешивают с остальной водой. Это способствует более быстрому началу формирования хлопьев при повышенных концентрациях коагулянта в отдельной части потока сточных вод. В результате такой обработки образуются крупные и плотные хлопья, что повышает степень осветления воды;
- 4) реагенты добавляют к очищаемой воде несколькими порциями или последовательно вводят различные коагулянты. В этом случае получают полидисперсные агрегаты коагулянта, увеличивается период существования положительно заряженных комплексов, в результате чего интенсифицируется процесс коагуляции;
- 5) периоды подачи увеличенных доз коагулянта чередуют с периодами полного прекращения коагулирования. В результате такой обработки происходят колебания рН, что в ряде случаев благоприятно влияет на зарождение центров коагуляции в сточных водах со сложной структурой загрязнений.

**Сорбция.** В технологии очистки сточных вод в основном используют адсорбционный процесс на развитой твердой поверхности сорбентов. Сорбция растворенного вещества из раствора на поверхность сорбента происходит в том случае, если силы взаимодействия молекул растворенного вещества с молекулами поверхности сорбента превосходят силы межмолекулярного взаимодействия растворенного вещества и растворителя.

Сорбционная очистка может применяться самостоятельно или совместно с другими методами предварительной и глубокой очистки сточных вод. Достоинствами сорбционной очистки является возможность выделения ценных растворенных веществ из многокомпонентных смесей и высокая эффективность при малых концентрациях загрязнений сточных вод.

В качестве адсорбентов используют природные материалы (торф, активные глины), отходы некоторых производств (зола, силикагели, коксовая мелочь), активные угли и синтетические сорбенты.

Эффективными сорбентами являются активные угли различных марок. Пористость этих углей составляет 60–75%, а удельная поверхность – 400–900 м<sup>2</sup>/г. Адсорбционные свойства активных углей зависят от структуры пор, их величины. Макропоры (0,1–2,0 мкм) и переходные (0,004–0,1 мкм) поры играют, как правило, роль транспортирующих каналов. Сорбционную же активность углей определяют микропоры (размером менее 0,004 мкм).

В настоящее время достаточно широко применяются синтетические пористые материалы на основе стирола и дивинилбензола – полисорбы. От активных углей они отличаются несколько меньшей энергией связи извлекаемых загрязнений с поверхностью, однако легче поддаются регенерации растворителями. Это особенно важно для последующей утилизации ценных веществ.

Процесс сорбции может проходить в статических, динамических условиях либо в псевдооживленном слое.

1. Сорбция в статических условиях осуществляется путем интенсивного перемешивания сточной воды с сорбентом и последующего отделения сорбента отстаиванием, фильтрованием или другими методами. Уменьшить расход сорбента вследствие более полного использования его сорбционной емкости можно, применяя противоточные сорбционные установки. В противоточной схеме сорбент вводят только на последней ступени, а затем после отделения

его от очищаемой воды сорбент последовательно подают на предыдущие ступени.

2. Процесс сорбции в динамических условиях осуществляют путем фильтрования сточных вод через слой плотно уложенного сорбента. Скорость фильтрования в зависимости от концентрации загрязнений составляет 1–12 м/ч, крупность зерен сорбента – 0,8–5,0 мм. При движении жидкости снизу вверх происходит равномерное заполнение всего сечения аппарата, вытесняются пузырьки воздуха или газов, попадающие в слой сорбента вместе с водой.

3. Процесс с псевдоожиженным слоем сорбента целесообразно использовать при относительно высоком содержании в сточной воде мелкодисперсных частиц. Псевдоожижение слоя наступает при повышении скорости потока сточной воды, проходящей снизу вверх через поперечное сечение сооружения, до величины, равной гидравлической крупности зерен сорбента.

Сорбенты, применяемые для очистки сточных вод, могут быть нерегенерируемыми и регенерируемыми. В последнем случае, если извлеченные вещества утилизируют, то для регенерации сорбента используют экстрагирование органическими растворителями, отгонку с водяным паром, испарение и др. Если сорбционная очистка деструктивная, то извлеченные сорбцией вещества уничтожаются термическими или окислительными методами.

**Флотация.** При очистке сточных вод методом флотации образуются комплексы «частицы – пузырьки», которые всплывают, и образовавшийся пенный слой удаляется с поверхности жидкости. Такое явление наблюдается для частиц, которые не смачиваются или плохо смачиваются жидкостью, следовательно, методом флотации могут очищаться сточные воды, содержащие ПАВ, нефть, нефтепродукты, масла, волокнистые материалы.

В зависимости от способа получения диспергированной газовой фазы различают флотацию с подачей воздуха через пористые материалы (барботаж), с выделением воздуха из раствора, с механическим диспергированием воздуха.

1. Барботаж является одним из наиболее распространенных методов получения диспергированной газовой фазы в очистных сооружениях. Газ, проходя через поры фильтросного устройства, погруженного в воду, образует поток пузырьков, диаметр которых определяется диаметром пор и поверхностным натяжением на границе раздела фаз «вода – газ».

2. Флотация с выделением воздуха из пересыщенного раствора позволяет получить самые мелкие пузырьки, поэтому ее применяют для очистки сточных вод, содержащих очень мелкие частицы загрязнений. Пересыщенный раствор газа в воде может быть получен или предварительным насыщением, или в результате протекания химических, электрохимических, микробиологических и других процессов, сопровождающихся образованием газообразных продуктов.

3. Для механического диспергирования газовой фазы используют различные устройства, движущиеся части которых попеременно то погружаются в жидкость, то выходят из нее. Размер частиц газовой дисперсии зависит от интенсивности перемешивания, продолжительности, температуры, межфазного поверхностного натяжения.

**1.2.4. Биологическая очистка сточных вод.** Биологическая очистка сточных вод основана на способности микроорганизмов использовать в качестве питательных веществ многие органические и неорганические соединения, содержащиеся в сточных водах.

Биологическая очистка может осуществляться в естественных условиях (в биопрудах, на полях фильтрации и орошения) и в искусственных очистных сооружениях. В этих сооружениях могут создаваться аэробные условия, в том числе с использованием технического кислорода, анаэробные условия, либо процесс проходит в несколько стадий с чередованием аэробных, анаэробных и аноксичных условий, когда кислород содержится только в связанном состоянии (например, в виде нитратов). Микроорганизмы в таких сооружениях находятся либо в свободном, либо в иммобилизованном (прикрепленном) состоянии.

Биологическая очистка имеет следующие *преимущества*, обусловленные особенностями жизнедеятельности микроорганизмов:

- широкий спектр удаляемых органических и неорганических соединений, в том числе токсичных;
- образование простых конечных продуктов, основные из которых диоксид углерода, нитраты, сульфаты – в аэробных условиях и метан, аммиак, сероводород – в анаэробных условиях. В обоих случаях, кроме того, накапливается биомасса микроорганизмов;
- отсутствие вторичного загрязнения воды.

Вместе с тем для эффективного функционирования сооружений биологической очистки необходимо строгое соблюдение технологических параметров (температура, значение pH сточной воды, отсутствие

токсичных соединений в концентрациях, ингибирующих жизнедеятельность микроорганизмов, наличие биогенных элементов, концентрация растворенного кислорода в сооружениях аэробной очистки и т. д.).

Кроме того, большие проблемы при эксплуатации аэробных очистных сооружений создает высокий прирост биомассы активного ила. Затраты на обезвоживание и утилизацию избыточного активного ила составляют до 40% общих затрат на очистку воды.

Несмотря на отмеченные недостатки, биологическая очистка городских сточных вод и стоков многих производств нашла очень широкое распространение. Только в Республике Беларусь функционирует более 140 сооружений биологической очистки, в том числе 72 сооружения производительностью более 1 млн. м<sup>3</sup> очищаемой воды в год, на которых проходит очистку 90% общего стока по республике.

### **1.3. Биологическая очистка сточных вод в естественных условиях**

Очистка сточных вод в естественных условиях имеет более длительную историю, чем в искусственно созданных сооружениях. Первые поля орошения появились под Одессой, Киевом и Москвой в конце XIX в.

Основное достоинство естественных способов очистки – дешевизна строительства и эксплуатации таких сооружений. Однако интенсивность окислительных процессов в них более низкая, чем в искусственных сооружениях.

Очистка сточных вод в естественных условиях осуществляется:

- по принципу самоочищения воды (в биологических прудах);
- по принципу самоочищения почвы (на полях орошения и фильтрации).

**1.3.1. Биологические пруды (биопруды).** В настоящее время биопруды применяют как самостоятельные сооружения биологической очистки либо для глубокой очистки сточных вод после сооружений искусственной биологической очистки. Биологические пруды могут быть с естественной и искусственной аэрацией или анаэробные, могут быть контактные, проточные либо серийные (состоящие из каскада прудов).

Биопруды располагают на слабофильтрующих грунтах, они представляют собой котлованы глубиной 0,5–1,0 м при естественной аэрации и до 3,0–4,5 м при искусственной. Биопруды имеют прямоугольную форму и должны быть вытянуты по ходу движения воды, при этом жидкость должна двигаться перпендикулярно направлению господствующих ветров. Ширина санитарно-защитной зоны должна быть не менее 200 м.

**Окислительные (с естественной аэрацией) биопруды.** В таких прудах происходит анаэробное разложение загрязнений в придонных слоях, окисление растворенных органических веществ в средней зоне и развитие водорослей у поверхности. Водоросли потребляют продукты жизнедеятельности микроорганизмов (диоксид углерода, нитраты, фосфаты) и вырабатывают кислород. Такие биопруды эффективны при ясной и теплой погоде, а в холодное время года работают как емкостные сооружения для сбора оседающих примесей.

**Аэрируемые биопруды.** Применяются более широко, чем окислительные, эффективность очистки в них может достигать 80–95%.

**Анаэробные биопруды.** Предназначены для очистки сточных вод и полужидких отходов при высоких нагрузках по органическим загрязнениям. Применяются в условиях теплого климата для переработки отходов производства мяса, отходов переработки овощей, навоза и пр. Для получения стока, пригодного для сброса в водоем, за анаэробным биопрудом предусматривают аэробное сооружение.

**Биопруды с высшей водной растительностью.** Получили распространение в последнее время. В этих прудах по определенной схеме высаживают такие водные культуры, как камыш, тростник, рогоз, водный гиацинт, телорез и др. Растения интенсифицируют процесс очистки, удаляют биогенные элементы, аккумулируют тяжелые металлы, радиоактивные изотопы и другие специфические загрязнения. Высшие растения легче удалить из биопруда, чем мелкие водоросли, что предотвращает вторичное загрязнение водоема продуктами разложения отмирающей растительной биомассы.

**1.3.2. Поля орошения и фильтрации.** Поля фильтрации предназначены только для очистки сточных вод, поля орошения – для очистки сточных вод и выращивания сельскохозяйственных (в основном, технических) культур. Для орошения наиболее пригодными являются сточные воды пищевой, химической, легкой промышленности.

ти, а также предприятий по производству минеральных удобрений, азотной кислоты и др.

Поля орошения и фильтрации представляют собой специально спланированные и подготовленные участки для полива их сточными водами напуском, по бороздам или методом дождевания. Оптимальные грунты для устройства полей орошения песчаные и супесчаные. По отношению к населенным пунктам поля орошения и фильтрации рекомендуется располагать с подветренной стороны, ширина санитарно-защитной зоны должна быть не менее 300 м для полей фильтрации и 200 м для полей орошения.

Очистка сточных вод на полях орошения и фильтрации осуществляется за счет протекания ряда *процессов*:

- биологическое окисление загрязнений в аэробных условиях на глубине до 0,4 м, где обеспечивается удовлетворительная аэрация;
- анаэробное разложение загрязнений, поступивших на более глубокие уровни;
- сорбция, ионный обмен, комплексообразование с частицами почвы;
- ассимиляция растениями, почвенными животными.

К отрицательным последствиям применения почвенного метода очистки сточных вод на полях относятся возможность накопления в почве биологически не окисляемых загрязнений и компонентов, губительно влияющих на почвенную флору и фауну. Кроме того, применение полей фильтрации сдерживается ростом цен и дефицитом земель вблизи населенных пунктов.

## Глава 2. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ

### 2.1. Очистка сточных вод в аэротенках

**2.1.1. Классификация аэротенков.** *Аэротенк* – это резервуар прямоугольного сечения глубиной 3–6 м, выполненный из металла, монолитного или сборного железобетона или пластмассы. В зависимости от условий аэротенки заглубляются или устанавливаются на поверхности земли, на открытом воздухе либо в шатрах-утеплителях.

Воздух, вводимый с помощью пневматических или механических устройств, перемешивает обрабатываемую жидкость с активным илом и насыщает ее кислородом, необходимым для жизнедеятельности бактерий, простейших и многоклеточных животных. Аэротенки применяются для очистки многих видов сточных вод в широком диапазоне их расходов и концентраций загрязнений.

Число конструктивных модификаций аэротенков (рис. 2) постоянно увеличивается. По способу подачи сточных вод и гидродинамическому режиму конструкции используемых аэротенков подразделяются на три основных типа: вытеснители (рис. 2, *а*) с «поршневым» потоком сточных вод, смесители с рассредоточенной (рис. 2, *б*) или центральной подачей и выпуском сточных вод, аэротенки промежуточного типа (рис. 2, *в*).

*Аэротенки-вытеснители* разделены продольными направляющими перегородками, каждая из которых не доходит до одной из торцевых стен, на коридоры. Число коридоров от 1 до 4, соотношение общей длины коридоров к ширине  $>30-40$ . В торцах аэротенков расположены каналы для впуска и отведения сточных вод. В зависимости от геометрических размеров аэротенков гидродинамический режим в них в той или иной степени приближается к режиму вытеснения. Особенностью процесса, протекающего в аэротенках-вытеснителях, является изменение концентрации загрязняющих веществ в сточных водах и скорости очистки по длине аэротенка. Окислительный процесс в аэротенках-вытеснителях происходит неравномерно: в начале аэротенка – быстрее, а по мере приближения к концу и уменьшения количества субстрата – медленнее. Аэрация также должна осуществляться неравномерно.

В таких аэротенках можно достичь высокой глубины очистки, однако при залповом поступлении загрязняющих веществ, что обычно характерно для производственных стоков, активный ил оказывается перегруженным, теряет свою активность, вспухает и выносится из вторичных отстойников.

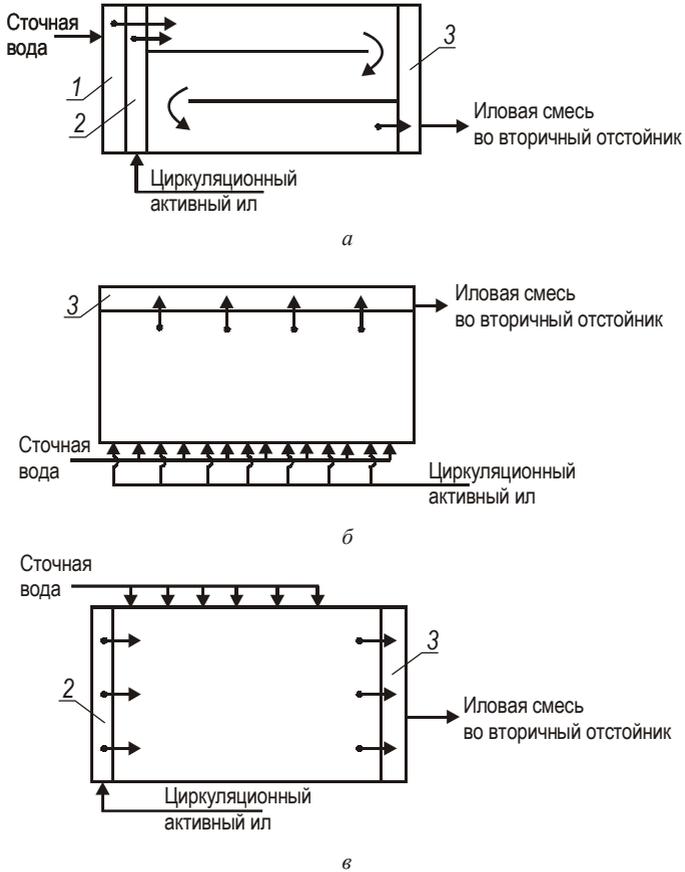


Рис. 2. Аэротенки:

*a* – аэротенк-вытеснитель; *б* – аэротенк-смеситель; *в* – аэротенк промежуточного типа;  
 1 – канал сточной воды; 2 – канал циркуляционного активного ила;  
 3 – канал иловой смеси

В *аэротенках-смесителях* создаются условия для полного и быстрого смешения сточных вод с массой активного ила, обеспечивается равномерное распределение органических загрязнений и растворенного кислорода. Быстрое разбавление поступающих сточных вод очищенной водой позволяет подавать сточные воды с относительно высокой концентрацией загрязнений, в установившемся режиме они работают с равномерными скоростями процесса очистки. Недостатками аэротенков-смесителей являются более сложная система впуска и выпуска жидкости и сравнительно низкая средняя удельная скорость окисления, поскольку концентрация загрязнений в иловой смеси находится на уровне значений, предъявляемых к очищенной воде. Следовательно, окислительная мощность этих сооружений ниже, чем аэротенков-вытеснителей.

К *аэротенкам промежуточного типа* относятся, например, коридорные аэротенки с рассредоточенной по длине подачей сточных вод и с впуском активного ила в начало коридора. В этом случае концентрация активного ила на входе максимальна и постепенно уменьшается по мере приближения к выходу. Для стабильной работы таких сооружений сточные воды целесообразно подавать неравномерно по длине сооружений для поддержания одинакового соотношения между количеством загрязнений и массой беззольного вещества активного ила.

Аэротенки подразделяются также по виду применяемой аэрации – аэротенки с механической или (наиболее распространенной) пневматической аэрацией; по способу регенерации активного ила – с отдельно стоящими регенераторами ила и совмещенные с регенераторами.

Окисление органических загрязняющих веществ в аэротенках происходит за счет жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, образующих хлопьевидные скопления – активный ил. Часть органических веществ, непрерывно поступающих со сточными водами, окисляется, а другая часть расходуется на конструктивный обмен, т. е. обеспечивает прирост бактериальной массы активного ила.

В зависимости от требуемой степени снижения содержания органических загрязняющих веществ аэротенки проектируются на полную биологическую очистку (значение  $BPK_{полн}$  очищенных вод до  $15 \text{ мг/дм}^3$ ) и частичную ( $BPK_{полн} > 15 \text{ мг/дм}^3$ ).

### **2.1.2. Характеристика активного ила.**

**Состав и структура ила.** По внешнему виду активный ил представляет собой мелкие хлопья (флокулы, зооглеи) от едва различимых

глазом до 2–3 мм и более. Зооглеи различаются по форме: они могут быть шарообразной, гроздевидной, древовидной (с широкими лопастями) формы или представляют собой узкие плотные тяжи. Развитие и характер зооглей зависит от состава поступающих сточных вод и параметров процесса очистки. Цвет хлопьев от буро-желтого до темно-коричневого. Вероятно, из-за присутствия актиномицетов активный ил обладает землистым запахом. Благодаря аэрации хлопья активного ила поддерживаются во взвешенном состоянии. Хлопья состоят из большого числа многослойно расположенных бактериальных клеток, заключенных в слизь. Слизь представляет собой внеклеточные полимеры, представленные полисахаридами, протеинами, нуклеиновыми кислотами. Благодаря реакционноспособным группам этих соединений (гидроксильным, карбоксильным, сульфгидрильным и др.) происходит химическое и физико-химическое взаимодействие хлопьев ила с растворенными и нерастворенными загрязнениями и быстрое изъятие загрязнений из сточной воды. Биохимическое окисление изъятых загрязнений протекает более медленно. Суммарная поверхность хлопьев активного ила достигает  $100 \text{ м}^2$  на 1 г сухого вещества, что объясняет его очень высокую сорбционную способность.

Сухое вещество активного ила на 70–90% состоит из органических веществ и на 10–30% – из минеральных. Основную массу органических веществ составляют белки, содержание которых может достигать 70%. Количество белковых веществ зависит от возраста ила, от вида культур микроорганизмов, образующих активный ил, что в свою очередь определяется составом загрязнений сточных вод. Кроме белков, органическая часть содержит липиды, углеводы, аминокислоты.

**Биоценоз активного ила аэротенков.** Все организмы, обитающие в аэротенке, попадают в него из внешних источников: вместе со сточной водой, в которой их численность достигает  $10^6$  клеток на 1 мл, из почвы и воздуха, заносятся насекомыми. В условиях аэротенка происходит селекция микроорганизмов, т. е. преимущественное развитие одних видов, которые находят для себя благоприятные условия, и подавление других. Факторами, определяющими направление селекции, являются аэрация, состав загрязнений, температура, скорость роста, седиментационные и флокуляционные характеристики и др. Кроме того, идет адаптация ряда организмов к условиям в аэротенке.

Таким образом, в аэротенке формируется экосистема, включающая сложный комплекс микроорганизмов различных классов, простейших,

червей, членистоногих. Численность микроорганизмов составляет  $10^{10}$ – $10^{11}$  клеток на 1 мл.

Исследование количественного и качественного (родового и видо-вого) состава активного ила представляет собой очень сложную задачу по нескольким *причинам*:

1) ни одна среда не может обеспечить рост всех обитателей активного ила. Наибольшее число микроорганизмов выделяется на агаризованной среде с экстрактом активного ила;

2) удерживание клеток в составе хлопка. Важное значение для количественного учета микроорганизмов имеет гомогенизация активного ила перед посевом. Использование ультразвука для разрушения хлопьев приводит к увеличению числа клеток в 20 и более раз;

3) в процессе длительного развития в составе активного ила изменяются фенотипические признаки микроорганизмов, появляются мутантные формы. Это делает задачу идентификации микроорганизмов еще более сложной.

Вместе с тем знание основных групп микроорганизмов, участвующих в разложении загрязнений сточных вод, необходимо для управления процессом очистки. Изменение условий в очистном сооружении может привести к увеличению числа желательных форм и уменьшению содержания нежелательных.

Преобладающими микроорганизмами биоценоза активного ила аэротенков являются *гетеротрофные флокулообразующие бактерии*. Бактерии легче адаптируются к использованию новых источников питания, способны в большей степени, чем другие организмы приспосабливаться к неблагоприятным условиям. При поступлении токсичных веществ бактерии часто остаются единственными обитателями очистных сооружений.

Бактерии являются первым пищевым звеном на очистных сооружениях. Потребляя растворенные вещества и синтезируя на их основе вещества своей биомассы, бактерии делают их доступными для тех организмов, которые не способны к усвоению растворенных веществ. Основная масса бактерий в хлопьях (84,0 – 98,5% общей численности) имеет палочковидную форму (см. вклейку, рис. I). Кокки, в основном, представлены клетками с диаметром менее 0,6 мкм, единично могут быть очень крупные (диаметром до 1,5 мкм) (см. вклейку, рис. II), спириллы встречаются достаточно часто, но в небольших количествах.

Уже в самых ранних исследованиях (1935–1939 гг.) как доминирующие в активном иле описывались капсульные бактерии *Zoogloea*

*ramigera* (см. вклейку, рис. III). Это грамотрицательные неспорообразующие палочковидные монотрихи, формирующие капсулы. Штаммы *Zoogloea ramigera* растут в широком диапазоне температур от 9 до 37°C, оптимальными являются температура 28°C и значение pH 7,0. *Zoogloea ramigera* – аэробы, но практика показывает, что они довольно длительно могут переносить анаэробные условия.

Важное значение для очистки воды и последующего выделения активного ила имеет способность этих бактерий к образованию хлопьев (зооглей). На питательных средах с глюкозой, фруктозой, галактозой, лактозой, сахарозой, растворимым крахмалом эти бактерии формируют такое количество внеклеточного полимера, что культуральная жидкость превращается в гель. Структура этого полисахарида окончательно не установлена, в его составе обнаружено два аминоксахара: N-ацетилглюкозамин и N-ацетилфукозамин в соотношении 1 : 2. Капсульное вещество играет значительную роль в очистке, поскольку обуславливает сорбцию органических и неорганических соединений, а также клеток, которые сами не способны к хлопьеобразованию, но участвуют в разложении загрязнений. Клетки *Zoogloea ramigera* могут накапливать в большом количестве гранулы волютина, состоящие из длинноцепочечных полифосфатов. Эта способность бактерий играет важную роль в очистке воды, загрязненной фосфорсодержащими веществами.

Кроме *Zoogloea ramigera*, в составе активного ила обнаружены представители родов *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Alcaligenes*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Corynebacterium*, *Flavobacterium* и др. Большинство бактерий, принимающих участие в очистке, – гетеротрофы, это преимущественно представители водной биоты и незначительная доля обитателей кишечного тракта человека и животных. При этом патогенные микроорганизмы не находят для себя благоприятных условий, не выдерживают конкуренции и в основном погибают.

Из активного ила изолированы **нитчатые формы бактерий**, массовое развитие которых связывают с явлением вспухания активного ила. На рис. IV, V (см. вклейку) представлены хлопья активного ила, окрашенные флуоресцирующими красителями. В удовлетворительных условиях функционирования основная масса бактерий находится в флокулированном состоянии (см. вклейку, рис. IV). Хлопья вспухшего активного ила (см. вклейку, рис. V) теряют компактность, в нем прослеживается повышение морфологического разнообразия бактерий, увеличивается численность свободноживущих (не связанных с хлопьями) форм.

Одной из причин вспухания активного ила является действие токсикантов. В их присутствии нарушается система образования биополимерного геля клетками флокулообразующих бактерий, происходит диспергирование хлопьев. В этих условиях могут выживать хламидобактерии, которые представляют собой скопления клеток в виде длинных нитей (трихомов), окруженных трубчатым чехлом, состоящим из полисахарида, который хорошо предохраняет клетки от воздействия токсикантов. Клетки трихомов находятся в тесном контакте друг с другом и редко индивидуализируются как самостоятельные организмы. Нитчатые бактерии представлены тонкими нитями (диаметром 1–60 мкм), поэтому они хорошо снабжаются растворенным кислородом, что позволяет им успешно выживать в условиях его дефицита.

К хламидобактериям относят *Sphaerotilus*, которые наиболее часто встречаются в активном иле. Нити *Sphaerotilus* (см. вклейку, рис. VI) одеты слизистым чехлом, имеют ложное ветвление.

Способностью формировать длинные нити обладают также бесцветные серные бактерии (родов *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Leucothrix* и др.) (см. вклейку, рис. VII). Они относятся к группе скользящих бактерий. При движении наблюдается характерный изгиб клетки в форме дуги и движение вперед изогнутой частью. Массовое развитие серобактерий наблюдается в активном иле аэротенков, работающих с высокими нагрузками по загрязнению, при недостатке кислорода в иловой смеси, при наличии в сточных водах токсичных веществ (медь, цинк и т. д.), при очистке сточных вод, содержащих восстановленные соединения серы.

При высоком содержании в сточных водах восстановленных соединений серы серобактерии могут накапливать в клетках гранулы серы, что является показателем неглубокой очистки (см. вклейку, рис. VIII).

В активном иле присутствуют также **фототрофные прокариоты** – цианобактерии (*Cyanobacterium*), которые переходят к гетеротрофному питанию. Это приводит к утрате ими пигментов, и клетки цианобактерий становятся бесцветными. Во вторичных отстойниках клетки цианобактерий могут приобретать зеленую окраску, а в местах сильного освещения – типичную сине-зеленую.

Наиболее часто в активном иле встречаются цианобактерии родов *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Nostoc*, *Oscillatoria*. В связи с высокой устойчивостью цианобактерий к воздействию неблагоприятных факторов (температура, щелочность среды), а также токсикантов, они могут достигать значительной численности в активном иле аэро-

тенков и вызывать вспухание. Они же, как правило, становятся причиной «цветения» водоемов.

При микроскопировании сложно различать цианобактерии и нитчатые хламидобактерии, так как они имеют много общих морфологических признаков: нитчатое строение тела, способность к скользящему движению, отсутствие настоящих ядер, хлоропластов и вакуолей и т. д.

Цианобактерии и хламидобактерии – важные индикаторные организмы активного ила, поскольку их чрезмерное развитие вызывает его вспухание. При этом нарушаются седиментационные характеристики ила, что сопровождается резким ухудшением качества очищенных сточных вод по причине избыточного выноса ила из вторичных отстойников, где он неудовлетворительно отделяется от очищенных вод.

Сообщения об обнаружении в активном иле **грибов** немногочисленны. Развитию грибов благоприятствует кислая среда. Обнаружены представители дрожжеподобных грибов родов *Trichosporon*, *Rhodotorula*, *Candida*. Из мицелиальных грибов в большем количестве попадают *Trichoderma*, *Geotrichum*, *Cladosporium*, которые участвуют в разложении загрязнений. Содержание *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Fusarium* обычно невелико, и их считают случайно попавшими.

Массовое развитие грибов в аэротенках нежелательно, так как при этом ухудшаются седиментационные свойства активного ила. Вместе с тем грибы способны усваивать некоторые трудноокисляемые и токсичные вещества, и в отдельных случаях развитие грибов оказывается положительным.

Основными формами грибов активного ила являются сапрофитные и хищные.

Сапрофитные грибы – это более обычные обитатели аэротенков, они устойчивы к изменению рН в кислую сторону и в этих условиях могут вызывать вспухание активного ила. От хищных грибов их отличает более толстый септированный мицелий (см. вклейку, рис. IX).

Хищные грибы на вегетативном мицелии толщиной не более 5–8 мкм имеют ловчие приспособления (см. вклейку, рис. X) для улавливания и использования в пищу нематод, колероваток, простейших, часто значительно превосходящих их по размерам. Хищные грибы развиваются в биоценозе ила при высоком качестве очистки с нитрификацией, при низких нагрузках на активный ил.

Роль **актиномицетов** в активном иле окончательно не установлена, хотя при очистке некоторых сточных вод они обнаружены в значительном

количестве, особенно представители рода *Gordonia* (ранее назывались *Nocardia*). При утилизации углеводов и других гидрофобных веществ они выделяют поверхностно-активные вещества и вызывают образование густой пены в аэротенках и вторичных отстойниках.

Биоценоз активного ила аэротенков почти полностью гетеротрофен. Однако условия обитания во вторичных отстойниках (отсутствие перемешивания и присутствие света) дают возможность развиваться автотрофным **водорослям**, где они принимают активное участие в очистке сточных вод, постоянно присутствуют и достигают массового развития в обрастаниях стенок отстойников. Вследствие того, что часть активного ила непрерывно перекачивается из вторичных отстойников в аэротенки, водоросли с потоком циркулирующего ила привносятся в аэротенки. Однако в аэротенках они не находят удовлетворительных условий для своего существования и, следовательно, не принимают активного участия в очистке сточных вод. Тем не менее водоросли в активном иле аэротенков встречаются постоянно, но численность их низкая, а в зимний период сокращается до единичных экземпляров либо полного отсутствия.

Кроме бактерий, водорослей, грибов и актиномицетов, в активном иле встречаются следующие типы (подтипы) организмов: саркодовые (*Sarcodina*), жгутиковые (*Flagellata*), ресничные инфузории (*Ciliata*), сосущие инфузории (*Suctorina*), коловратки (*Rotifera*), первичнополостные (*Nematoda*) и вторичнополостные черви (*Oligochaeta*), водные клещи класса паукообразных (*Arachnida*), тихоходки (*Tardigrada*), брюхоресничные черви (*Gastrotricha*).

**Саркодовые** представлены голыми амебами (см. вклейку, рис. XI), которые характеризуются мягкой изменчивой формой тела и способностью образовывать ложноножки (псевдоподии), используемые и как органы движения, и для захвата пищи, и раковинными амебами, которые несут раковину из органического вещества и различных минеральных включений (см. вклейку, рис. XII, XIII).

Вид голых амеб идентифицировать очень сложно. Это могут сделать очень опытные специалисты только по цистообразованию или на стадии митоза ядра. Практическое значение имеет размер амеб. Мелкие амебы – показатели нарушения очистки, высокой нагрузки по загрязнениям, неудовлетворительной аэрации, диспергирования хлопьев и высокого содержания в иловой смеси бактерий, не связанных с хлопьями. Крупные амебы – обычные обитатели нормально функционирующего ила. Для оценки состояния активного ила достаточно определить соотношение крупных и мелких амеб, не идентифицируя их до вида.

Раковинные амёбы легко идентифицируются в активном иле благодаря наличию плотной раковины с отверстием, из которого иногда выходят псевдоподии.

Раковинные амёбы в активном иле разделяются на две экологические группы: парящие и приуроченные к хлопьям активного ила. Парящие, или планктонные, корненожки при отстаивании иловой смеси оседают значительно медленнее основной иловой массы. Они долгое время остаются во взвешенном состоянии за счет большой удельной поверхности. Питаются они диспергированными бактериями, мелкими простейшими, поэтому развиваются при нарушении процесса очистки и дефлокуляции хлопьев активного ила. Увеличение численности бентосных (связанных с хлопьями активного ила) корненожек происходит при возрастании содержания в воде растворенной легкоусвояемой органики. При этом улучшается диффузное питание раковинных амёб, и создаются благоприятные условия для их интенсивного размножения.

Практически постоянно находятся в активном иле представители родов *Arcella*, *Centropyxis*, *Pamphagus*, *Euglypha*, *Diffugia* и др. *Centropyxis* (до 200 мкм) имеет круглую раковину (см. вклейку, рис. XII) с шипами, устье расположено эксцентрично (смещено от центра). *Arcella vulgaris* (диаметр от 30 до 100 мкм) имеет круглую темноватую раковину с устьем в центре раковинки (см. вклейку, рис. XIII). У *Pamphagus hyalinum* (см. вклейку, рис. XIV) раковина тонкая, прозрачная, филоподии тонкие, а у амёб рода *Euglypha* (см. вклейку, рис. XV) сквозь тонкую раковину хорошо различим зернистый слой эндоплазмы.

Цвет раковинок может быть различен на разных очистных сооружениях в зависимости от состава сточных вод, т. е. «строительного материала», который используется амёбами для создания своих раковин.

Класс **солнечников** наиболее часто представлен в активном иле родом *Actinophrys*. Это корненожки шарообразной формы небольшого размера, без раковинки. Они имеют многочисленные аскоподии, расходящиеся от центра, как лучи солнца. Солнечники – хищники, которые питаются жгутиковыми, коловратками, инфузориями. Могут достигать массового развития в период неблагоприятного воздействия каких-либо факторов на хлопья активного ила, что приводит к их разрушению и чрезмерному развитию мелких жгутиконосцев – излюбленной пищи солнечныхников.

**Бесцветные жгутиконосцы** имеют тонкую плазматическую оболочку, довольно постоянную форму тела с одним или несколькими

жгутиками. Это непрерывно мельтешащие организмы, трудноопределяемые. Размер жгутиконосцев обычно составляет от 10 до 20 мкм, не превышая 50 мкм, встречаются как одиночные, так и колониальные формы. Основную их пищу составляют бактерии, мелкие органические частицы ила, растворенные органические вещества. Жгутиконосцы развиваются при высоких нагрузках, в пусковой период, в условиях низкого содержания кислорода, в момент аварийных сбросов и перегрузок. По эффективности и скорости осмотрофного потребления субстрата жгутиконосцы уступают бактериям (вследствие меньшей удельной поверхности тела), однако в периоды повреждения бактериальных популяций они способны бурно размножаться. В стабильном иле эта группа развивается слабо.

Индикаторное значение *ресничных инфузорий* (цилиатов) (подтип *Ciliata*) определяется их способом питания и ассоциацией с хлопьями активного ила. Степень ассоциированности инфузорий с хлопьями зависит от зрелости последних.

В активном иле с мелкими диспергированными хлопьями преобладают крупные свободноплавающие инфузории, поедающие свободноживущих бактерий. В периоды разрушения хлопьев ила свободноплавающим инфузориям нет равных в процветании, поскольку они устойчивы к повышенной мутности среды обитания, недостатку кислорода и повышенным нагрузкам по органическим веществам на ил, а обилие пищи способствует их развитию и размножению.

В процессе формирования хлопьев количественное доминирование получают хищные свободноплавающие и брюхоресничные инфузории, ползающие по поверхности хлопьев и выедающие бактерий. Появление брюхоресничных инфузорий в активном иле при его первичном наращивании (во время пуска в работу вновь построенных аэротенков) свидетельствует о том, что хлопья сформировались и могут быть использованы в качестве опоры для передвижения. Перитрихи прикрепляются непосредственно к хлопьям своими стебельками, и их появление связано с завершением процесса развития и формирования хлопьев. Функция прикрепленных инфузорий – снижать мутность воды, завершая процесс очистки и выедавая бактерий, утративших связь с хлопьями.

Цилиаты в активном иле подвержены значительным количественным популяционным, а также видовым и родовым изменениям под влиянием различных условий в процессе биологической очистки. Поэтому при оценке состояния очистки им уделяется первоочередное внимание.

Многие индивидуальные виды перитрих являются индикаторами принципиально различных состояний процесса очистки. Присутствие большого числа *Vorticella campanula* и *Vorticella nebulifera* указывает на недогрузку ила, в то время как *Vorticella microstoma* характеризует противоположные условия.

При классификации технологического процесса очистки существенное значение имеет физиологическое состояние ресничных инфузорий. Инфузории, как и большинство простейших, обладают способностью при наступлении неблагоприятных условий формировать вокруг своего тела особую оболочку, т. е. инцистироваться, и таким способом временно избегать неблагоприятного влияния окружающей среды или, по крайней мере, уменьшать его. Цисты простейших могут иметь разнообразную форму и строение, большей частью они шаровидные (см. вклейку, рис. XVI). Во время инцистирования все жизненные процессы в клетке замедляются, и организм переходит в состояние анабиоза. Многие инфузории выдерживают полное высыхание и сохраняют при этом жизнеспособность в течение нескольких лет.

Колебания нагрузки на активный ил по органическим загрязняющим веществам приводят к морфологическим и физиологическим изменениям у прикрепленных инфузорий. С возрастанием нагрузки форма тела от вытянутой изменяется в бочкообразную и до округлой, возрастает численность пищеварительных вакуолей (см. вклейку, рис. XVII). При воздействии токсичных сточных вод зооиды отрываются от стебельков, измельчаются, ресничный диск закрывается (см. вклейку, рис. XVIII).

Инфузории с расположением небольшого количества ресничек на брюшной стороне тела, которыми они пользуются как ножками, быстро передвигаясь по хлопьям активного ила, называются брюхоресничными (см. вклейку, рис. XIX). *Aspidisca costata*, имеющая на спине 6 ребер, наиболее распространена в активном иле нормально работающих аэротенков. Вместе с тем вследствие широкого диапазона толерантности к разнообразным факторам среды она часто встречается в иле различных условий очистки. *Aspidisca lynceus* (без ребер на спинной стороне) и *Aspidisca turrita* (3 ребра) – брюхоресничные инфузории, встречающиеся при снижении нагрузок, с хорошо протекающими процессами нитрификации.

Кругоресничные инфузории (перитрихи) (род *Peritricha*) прикрепляются ножкой к хлопьям активного ила. Прикрепленных перитрих более 1000 видов и среди них встречаются как одиночные (см. вклейку, рис. XX), так и колониальные формы (см. вклейку, рис. XXI, XXII). Среди представителей данного класса имеются и подвижные виды. Прикрепленные

инфузории в случае ухудшения аэробных условий или при наступлении других неблагоприятных факторов переходят в плавающее состояние. Для этого они отбрасывают ножку и образуют нижний венчик ресничек. Одинокый род *Vorticella* имеет наиболее развитую сократительную мионему, при ее сокращении стебель сворачивается в плотную спираль. Род *Vorticella*, преобладающий в аэротенках, отличается высокой пластичностью приспособления к условиям среды, встречается в широком диапазоне органических нагрузок. Питается бактериями и мелким детритом.

Но отдельные виды и экоформы являются хорошими показателями различных степеней загрязнения органическими веществами. *Vorticella microstoma var. typica* (30 мкм) – грушевидное тело, часто встречается в очистных сооружениях бытовых и смешанных вод. *Vorticella microstoma var. putrina* (70 мкм) – тело воронкообразное, вытянутое в длину, характерна для активного ила с большой нагрузкой. *Vorticella microstoma var. hyans* (40–60 мкм) – тело раздутое, типична при залеживании ила и нарушении аэрации. *Vorticella convallaria* (60 мкм) – тело колоколообразное, перистом равняется или шире тела, господствует в нормально работающих аэротенках, на недостаток растворенного кислорода реагирует отрывом от стебелька и образованием «бродяжек» – свободноплавающих особей. Род *Vorticella* дает несколько переходных вариантов, при этом перистом перитрих оказывается тем шире, чем ниже концентрация органических веществ (и численность бактерий) в окружающей их среде, в то время как в перегруженном иле перистом узкий. При избытке пищи можно обойтись и небольшим ртом.

Представители рода *Opercularia* имеют несократимые стебли, веретенообразное тело зооидов без перистомального валика и укрепленный на ножке диск, который выдвигается или втягивается в перистом (см. вклейку, рис. XXIII). Эти колониальные инфузории широко распространены в активном иле.

Вид *Opercularia coarctata* считается постоянным обитателем «хорошего» созревшего ила, особенно, если колонии находятся в активном состоянии с работающими раскрытыми ресничными дисками. *Opercularia minima*, редко встречаемый вид, развивается в высоконагружаемом иле при неполной биологической очистке.

Наличие в активном иле представителей рода *Zoothamnium* свидетельствует о полном окислении загрязняющих веществ и нитрификации. Роды *Vaginicola* и *Cothurnia* (см. вклейку, рис. XXIV) характеризуют недогруженный активный ил, большой период аэрации в аэротенках и высокое качество очищенной воды.

**Сосущие инфузории** (подтип *Suctoria*) также являются индикаторами высокого качества очистки. Суктории в активном иле представлены прикрепленными с помощью несокращающегося стебелька формами (см. вклейку, рис. XXV).

У сосущих инфузорий на поверхности тела во все стороны направлены сосательные щупальца, на концах которых выделяется фермент или группа ферментов, с помощью которых они прикрепляют жертвы, растворяют оболочку и засасывают их содержимое (см. вклейку, рис. XXVI).

**Коловратки** (*Rotifera*) (от лат. *rota* – колесо, *fere* – нести) – многоклеточные организмы (от 40 мкм до 2,5 мм). Тело коловраток не сегментировано, но делится на голову, туловище и ногу, иногда эти отделы не выражены. Некоторые виды коловраток покрыты панцирем (см. вклейку, рис. XXVII), они развиваются обычно в низконагружаемом активном иле, формирующем высокое качество очистки. Беспанцирные коловратки, такие как *Rotaria rotatoria* (см. вклейку, рис. XXVIII), *Philodina roseola*, – обитатели ила обычных аэротенков, обеспечивающих полное окисление загрязняющих веществ.

Для коловраток характерно самостоятельное плавание при помощи коловращательного аппарата, расположенного на переднем конце тела, реснички которого постоянно мерцают, привлекая пищу в виде мелкой взвеси к ротовому отверстию. При сокращении передняя часть (голова) втягивается в туловище, которое чаще всего сужается в более или менее ясно выраженную ногу, часто кольчатую снаружи (псевдосегментированную), заканчивающуюся присоской, либо одним или несколькими пальцами. Коловратки – сложноорганизованные животные, имеющие мускулатуру и органы пищеварительной системы. Есть нервные узлы и головной мозг.

Размножаются коловратки как партеногенетическим (девственным), так и половым путем. При хорошем питании и нормальных физико-химических условиях размножение происходит партеногенетически, с ухудшением условий самки откладывают яйца, из которых выводятся не только самки, но и самцы (часто карликовые). После спаривания самок с самцами откладываются уже покоящиеся яйца, способные переносить самые неблагоприятные условия. Наконец, существует еще одна адаптационная приспособленность к условиям среды, изменяющимся в худшую сторону, – коловратки могут впадать в анабиоз, не инцистируясь, а просто сморщиваясь и высыхая. В таком высохшем состоянии они сохраняют жизнеспособность многие годы при значительных колебаниях температуры.

Из **первичнополостных червей** в активном иле встречаются круглые черви – нематоды (*Nematoda*) (см. вклейку, рис. XXIX). Отличить от остальных червей их можно по движению, они лишены поперечной мускулатуры и поэтому двигаются, изгибая тело и не меняя своей толщины. В биоценоз активного ила может входить несколько видов нематод, которые в незначительных количествах развиваются в хорошо работающем иле. Большое количество может указывать на залеживание, плохое перемешивание ила, недостаточную аэрацию, поскольку нематоды предпочитают застойные зоны. Нематоды пропускают часть иловой массы через свой кишечник, часто не успевая переваривать ее, что приводит иногда к их гибели. Хлопья от пищеварительной деятельности нематод хорошо минерализуются, укрупняются и в то же время разрыхляются.

В состав активного ила входит множество **вторичнополостных червей** – микроскопических малощетинковых червей *Oligochaeta* (см. вклейку, рис. XXX). Это сегментированные черви, передний отдел сильно специализирован, особенно строение пищеварительной и половой систем. Половая система гермафродитная. Питаются олигохеты, как и нематоды, активным илом, пропуская его через кишечник. Среди малощетинковых червей встречаются хищники.

В биоценозах активного ила чаще всего развиваются черви аэлозомы, несущие жировые включения, окрашенные каротиноидами. Аэлозомы очень быстро размножаются в активном иле за счет паротомии, т. е. отделения особей от заднего конца тела, который быстро дорастает до нужных размеров. При очень хорошем питании паротомией может отделяться целая цепочка червей: три и даже четыре особи.

**Водные клещи** в активном иле встречаются редко и в небольшом количестве. Клещи активного ила очень мелки, но хорошо заметны в микроскоп вследствие темной окраски хитина. На брюшной стороне отчетливо различимы восемь пар ног, на голове есть глаза и две пары жвал. Клещи развиваются в минерализованном, иногда в голодающем активном иле. Более часто они встречаются в биофильтрах.

**Тихоходки** (*Tardigrada*) считаются родственными членистоногим, от которых отличаются отсутствием их основных признаков – наружного скелета и членистых конечностей. Тело не сегментировано, хотя четыре пары мясистых, заканчивающихся коготками ножек расположены вдоль всего тела (см. вклейку, рис. XXXI). Из-за специфического медленного шагающего движения тихоходок называют водным медведем. Они не имеют жесткого наружного скелета, тело покрыто нехитинизированной

кутикулой, которая сбрасывается при линьке или при откладывании яиц (см. вклейку, рис. XXXII). Питание хищное, прокалывают жертву двумя стилетами, расположенными в ротовой полости, и высасывают клеточное содержимое из водорослей, простейших, нематод и колероваток. Тихоходки – показатели высокого качества очистки, удовлетворительной нитрификации.

**Ветвистоусые рачки** иногда в массовом количестве развиваются в аэротенках-отстойниках или во вторичных отстойниках недогруженных станций с длительным периодом аэрации и глубокой нитрификацией при условии хорошего качества очистки. В состав активного ила не входят и индикаторного значения не имеют.

### **2.1.3. Факторы, влияющие на функционирование активного ила.**

**Доза ила.** Обычно поддерживается на уровне 2–3 г/см<sup>3</sup>. Увеличение дозы ила способствовало бы ускорению окислительных процессов, однако возникают проблемы при отделении ила во вторичных отстойниках. При дозе ила в аэротенках >3 г/см<sup>3</sup> происходит его излишнее накопление в иловой зоне вторичных отстойников, загнивание, увеличивается вынос с очищенной водой.

На величину дозы активного ила в аэротенке влияет величина илового индекса, который характеризует способность активного ила к осаждению во вторичных отстойниках. Иловый индекс – это объем, который занимает 1 г активного ила (по сухой массе) после 30-минутного отстаивания в мерном цилиндре на 1000 см<sup>3</sup>. Оптимальное значение илового индекса 80–120 см<sup>3</sup>/г. При значении илового индекса <120 мл/г ил оседает очень хорошо, в интервале 120–150 см<sup>3</sup>/г – удовлетворительно, при значении >150 см<sup>3</sup>/г – плохо. Одно из основных требований к иловому индексу – стабильность его значений, которая указывает на удовлетворительные условия эксплуатации сооружений и жизнедеятельности ила.

При прочих равных условиях чем меньше иловый индекс, тем большую дозу ила можно поддерживать в аэротенке. В табл. 5 приведены значения илового индекса и рекомендуемые в зависимости от его величины дозы активного ила при очистке сточных вод некоторых производств.

Следует отметить, что с увеличением дозы ила не сохраняется пропорциональная зависимость между дозой и скоростью потребления загрязнений. Это связывают с ухудшением массообмена вследствие увеличения вязкости.

Таблица 5

**Рекомендуемые дозы активного ила в зависимости от величины илового индекса при очистке сточных вод некоторых производств и городских сточных вод**

Вид производства и сточных вод	Иловый индекс, см <sup>3</sup> /г	Рекомендуемая доза активного ила, г/дм <sup>3</sup>
Нефтеперерабатывающее	70–100	5,0–3,0
Синтетического каучука	40–70	6,0–5,0
Искусственного волокна	200–250	2,0–1,5
Целлюлозно-бумажное	150–200	2,5–2,0
Городские сточные воды	80–120	4,5–3,0

**Турбулентность потока в аэротенке.** Для улучшения условий питания микроорганизмов необходимо обеспечить интенсивную турбулентность потока. Перемешивание приводит к распаду хлопьев активного ила на более мелкие, увеличивается поверхность их контакта с окружающей средой, интенсивнее потребляются загрязнения и кислород, отводятся продукты метаболизма. Скорость очистки повышается. Лабораторные исследования показывают, что с усилением турбулентности потока меняется состав активного ила: меньше становится свободноплавающих простейших, нитчатых форм бактерий, увеличивается содержание бактериальных зооглейных скоплений.

**Подача воздуха.** Подача воздуха должна обеспечивать постоянное наличие в очищаемой воде растворенного кислорода не менее 2 мг/дм<sup>3</sup>. Уменьшение содержания кислорода до 1 мг/дм<sup>3</sup> не приводит к заметному снижению скорости утилизации загрязнений. Однако во вторичных отстойниках при отделении ила от воды теряется от 1 до 2 мг/дм<sup>3</sup> кислорода, что может привести к продолжительному пребыванию ила в анаэробных условиях.

Кроме обеспечения аэробных организмов кислородом, подача воздуха необходима для перемешивания иловой смеси, удаления продуктов метаболизма, химического окисления загрязняющих веществ.

Расход воздуха на очистку 1 м<sup>3</sup> сточных вод составляет от 3,5 до 15 м<sup>3</sup>. На окисление 1 кг органических соединений, содержание которых характеризуется значением БПК, в среднем требуется 30–55 м<sup>3</sup> воздуха.

**Температура.** Оптимальная температура для аэробных процессов 20–30°С. При этом биоценоз очистных сооружений при прочих благо-

приятных условиях представлен наиболее разнообразными и хорошо развитыми микроорганизмами.

Если температурный режим не соответствует оптимальному, то скорость обменных процессов в клетке и рост культуры ниже максимальных для данной культуры значений. При этом наиболее неблагоприятное воздействие на развитие культуры оказывает резкое изменение температуры. Влияние повышения температуры усугубляется соответствующим снижением растворимости кислорода.

**Значение рН.** Значительная часть бактерий лучше размножается в среде с нейтральным значением рН или близким к нему (рН 6,5–7,5). В кислой среде (рН 4,0–6,0) могут развиваться грибы и дрожжи, в слабощелочной – актиномицеты.

В ходе разложения загрязнений среда может подкисляться (кислоты) либо подщелачиваться (аммиак) продуктами разложения.

**Биогенные элементы, макро- и микроэлементы.** Для нормального процесса синтеза клеточного вещества и, следовательно, для эффективного процесса очистки сточной воды в среде должна быть достаточная концентрация биогенных элементов, макро- и микроэлементов.

Потребность в основных биогенных элементах обычно оценивается соотношением БПК : N : P, которое должно составлять 100 : 5 : 1. Учитывается азот в аммонийных солях или белковый азот, фосфор – в виде растворимых фосфатов. В бытовых сточных водах, прошедших механическую очистку и поступающих на биологическую, это соотношение составляет примерно 100 : 20 : 2,5. Такие воды целесообразно очищать совместно с производственными, в которых содержание соединений азота и фосфора невелико.

**Нагрузка по загрязнениям.** Чаще значение нагрузки считают по БПК, иногда – по индивидуальным загрязнениям в пересчете на 1 м<sup>3</sup> очистных сооружений, на 1 г сухой биомассы активного ила или на 1 г беззольной его части в единицу времени (чаще в сутки).

В зависимости от величины нагрузки различают аэрационные системы высоконагружаемые, классические и низконагружаемые.

Высокой считается нагрузка >400 мг БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества активного ила в сутки. В таких сооружениях наибольший прирост ила, наименьшая степень очистки.

Перегруженный активный ил не справляется с окислением поступающих загрязнений. В таком иле число видов простейших невелико, количественно преобладают 2–3 вида. Обычно наблюдается большое

количество бесцветных жгутиковых, мелких амёб или инфузорий. Хлопья ила темные, содержат разнообразные твердые включения.

В этих условиях могут развиваться нитчатые формы бактерий, хлопья ила распадаются, в большом количестве присутствуют бактерии во взвешенном состоянии, вода над илом мутная.

Сооружения с классической нагрузкой (150–400 мг БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества активного ила в сутки) обеспечивают высокую степень очистки по БПК, иногда – частичную нитрификацию. Они заселены большим числом организмов различных групп, бактерии в основном находятся в зооглейных скоплениях, хлопья плотные, компактные, ил быстро оседает, вода над ним прозрачная.

Прирост ила меньше максимального в связи с достаточно глубоко проходящими процессами эндогенного окисления ила.

Если нагрузка низкая (<150 мг БПК<sub>полн</sub> на 1 г беззольного вещества активного ила в сутки), то степень очистки в сооружениях колеблется, но чаще бывает высокая. Прирост ила минимальный, глубоко развит процесс нитрификации, биоценоз ила характеризуется разнообразием видов. При этом наблюдается постепенное уменьшение размеров простейших, они становятся прозрачными, теряют пищеварительные вакуоли. Инфузории постепенно превращаются в цисты. Хлопья ила также становятся прозрачными, вода над илом опалесцирует.

Однако это справедливо только в том случае, если низкие нагрузки сопровождаются допустимой нагрузкой по токсикантам, присутствующим в сточных водах и накапливающимся в активном иле в результате биосорбции.

**Токсичные вещества.** Чтобы предупредить подавление жизнедеятельности активного ила токсичными веществами, устанавливают предельно допустимые концентрации (ПДК) индивидуальных токсичных веществ, а также выявляют возможное действие смеси веществ, одновременно присутствующих в очищаемой воде.

Существуют такие загрязнения, которые, не оказывая влияния на процессы биоокисления, отрицательно влияют на функционирование очистных сооружений: вызывают пенообразование, изменяют растворимость кислорода и т. д. Для таких соединений (ПАВ, красители и др.) также устанавливается ПДК.

Не существует какой-либо определенной зависимости между величинами ПДК и собственной биохимической окисляемостью вещества, которая определяется соотношением БПК/ХПК.

Встречаются случаи, когда при относительно высоком значении ПДК само вещество биохимически не окисляется. Например, для фреона-253 (трифторхлорпропана) ПДК составляет  $100 \text{ мг/дм}^3$ , а отношение БПК/ХПК = 0. Это соединение транзитом проходит через очистные сооружения, не оказывая вредного влияния на микробиоту активного ила.

С другой стороны, некоторые вещества при очень низком значении ПДК характеризуются средней величиной отношения БПК/ХПК. Например, метилфенилкетон имеет ПДК  $0,1 \text{ мг/дм}^3$ , а отношение БПК/ХПК для него составляет 0,425, т. е. при низком содержании в сточной воде он может быть биологически окислен.

**Прирост ила.** Интенсивность прироста активного ила зависит от многих *факторов*:

- природы окисляемого субстрата;
- самоокисляющей способности активного ила, которая определяется величиной нагрузки на ил и длительностью аэрации;
- седиментационных характеристик ила и выноса взвешенных веществ из вторичных отстойников;
- наличия токсикантов, снижающих прирост, или мутагенов – стимуляторов прироста.

Таким образом, при очистке сточных вод, содержащих высокие концентрации легкоокисляемых загрязнений (городские, сточные воды пищевой промышленности), прирост ила повышенный, а при очистке промышленных сточных вод сложного состава – пониженный. Сокращение прироста наблюдается на тех сооружениях, где в очищаемых сточных водах присутствуют токсические или бактерицидные вещества (фармацевтические заводы, предприятия по производству химических реактивов, пестицидов и т. п.). В то же время некоторые поллютанты могут стимулировать прирост ила. Например, фенол является довольно токсичным веществом. Его ПДК для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение, составляет  $0,001 \text{ мг/дм}^3$ , однако при очистке сточных вод, в которых фенол присутствует в гораздо больших концентрациях (например, при изготовлении железобетонных конструкций – до  $0,05 \text{ мг/дм}^3$ ), он вызывает избыточный прирост активного ила.

**Регенерация активного ила.** Основная масса активного ила, отстаивающегося во вторичном отстойнике, должна перекачиваться снова в аэротенк. Это циркуляционный активный ил. Как правило, во вторичном

отстойнике собирается ила больше, чем нужно для циркуляции, и избыточный ил направляется на утилизацию.

Циркуляционный активный ил должен проходить регенерацию, т. е. дополнительную интенсивную аэрацию при отсутствии вновь поступающих загрязнений (сточная вода в регенератор не подается).

Сущность системы регенерации заключается в окислении сложноокисляемых органических соединений, сорбированных на иле, и восстановлении его окислительных свойств и сорбционной способности. Кроме того, биологически инертные токсиканты депонируются в полимерном геле ила, восстанавливаются блокированные токсикантами ферменты. В системах с регенератором уменьшается прирост ила и улучшаются его влагоотдающие свойства.

Регенерация требует увеличения времени пребывания ила в системе до 8–18 и более ч, в то время как время пребывания в аэротенке составляет 2–6 ч.

Регенерацию активного ила предусматривают, если БПК<sub>полн</sub> сточных вод, поступающих на очистку, превышает 150 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, а также при наличии в сточных водах трудноокисляемых производственных примесей.

**Возраст активного ила.** Возраст активного ила – это среднее время пребывания хлопьев ила в системе «аэротенк – вторичный отстойник». Его величина обратно пропорциональна скорости прироста ила. Чем больше нагрузка на ил, тем больше его прирост и больше объем образующегося избыточного ила, который удаляется, и, следовательно, возраст ила уменьшается.

Молодые, активно растущие хлопья способны быстро извлекать загрязняющие вещества, но могут иметь недостаточную способность к седиментации. Вместе с тем хорошо оседающий ил может иметь низкую активность окисления загрязняющих веществ.

В пусковой период работы очистных сооружений бактерии находятся во взвешенном состоянии, затем слипаются в хлопья, которые развиваются с возрастом ила. По мере того как хлопья растут и стареют, они в большей степени состоят из мертвых клеток и аккумулярованных инертных частиц (мертвые клетки тоже чистят воду своими ферментами, но хуже и непродолжительно). Таким образом, по мере старения хлопья увеличиваются в размере, лучше сорбируют загрязнения, больше защищены биополимерным гелем от токсикантов, легче отделяются от очищенной воды при отстаивании. Однако в старею-

щих хлопьях снижается относительная численность активных живых клеток, при увеличении размера хлопьев ила ухудшается доступ кислорода к отдельным бактериальным клеткам и затрудняется отведение метаболитов, т. е. ухудшается режим массообмена клеток с окружающей средой и, соответственно, уменьшается скорость окисления загрязнений.

Очистные сооружения должны работать на максимально возможной концентрации ила, при которой обеспечивается как достаточное снабжение хлопьев ила растворенным кислородом, так и удовлетворительная работа вторичных отстойников.

Высоконагружаемые сооружения работают на неполную очистку с возрастом ила не более 2–3 сут. С низкими нагрузками на ил связана нитрификация и большой возраст ила (6–12 сут). Возраст ила более 8 сут обеспечивает глубокую минерализацию органических веществ с последующей нитрификацией.

Чем сложнее состав сточных вод, тем больший возраст ила требуется поддерживать для обеспечения удовлетворительного окисления загрязняющих веществ. Так, для биохимической очистки сточных вод при производстве синтетического каучука требуемый возраст ила составляет 20–30 сут, а поливинилового спирта – более 50 сут.

**Степень рециркуляции ила.** Для поддержания в аэротенках необходимого количества биомассы активного ила оптимального возраста требуется частичная рециркуляция – возврат биомассы из отстойника в аэротенк. Объем возвратного ила, удаляемого из вторичных отстойников и направляемого в регенератор, составляет от 30 до 70% от объема очищаемых сточных вод. Для каждого очистного сооружения этот показатель индивидуален и определяется расчетом как степень рециркуляции.

Чем ниже средняя доза ила и выше иловый индекс, тем больший объем ила требуется возвращать в регенераторы. Так, если повышаются удельные нагрузки на ил и ухудшаются его седиментационные свойства, вплоть до вспухания ила, вынос ила из вторичных отстойников возрастает, т. е. увеличиваются потери ила, поэтому необходимо возвращать в систему максимальное количество ила.

Если на сооружениях поддерживается меньший процент рециркуляции, чем расчетный, то ил во вторичных отстойниках переуплотняется и будет загнивать, а в аэротенках возрастут удельные нагрузки за счет низкой концентрации ила. Если поддерживается больший процент

рециркуляции – повысится расход энергии на перекачку ила, а ил во вторичных отстойниках будет недоуплотнен. В том и в другом случае увеличится вынос взвешенных веществ из вторичных отстойников и ухудшится качество очистки.

**Окислительная мощность аэротенков.** Окислительная мощность аэротенков – это количество органических загрязнений, снимаемых в единицу времени массой активного ила, находящейся в единице объема аэротенка. Таким образом, окислительная мощность является как показателем нагрузки на активный ил, так и показателем удельной скорости окисления, т. е. потенциальной эффективности разложения органических загрязняющих веществ для данных условий.

Окислительная мощность на городских сооружениях биологической очистки может изменяться от 0,1 до 1,5 кг БПК/(м<sup>3</sup> · сут).

#### 2.1.4. Теоретические основы процесса биологической очистки сточных вод.

**Влияние концентрации органических загрязнений на скорость биохимического окисления.** Скорость роста биомассы микроорганизмов описывается уравнением Моно:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S},$$

где  $\mu$  – удельная скорость роста биомассы, ч<sup>-1</sup>;  $\mu_{\max}$  – максимальная удельная скорость роста биомассы, ч<sup>-1</sup>;  $S$  – концентрация субстрата, мг/дм<sup>3</sup>;  $K_s$  – константа насыщения по субстрату, численно равная такой концентрации субстрата, когда  $\mu = 0,5 \mu_{\max}$ , мг/дм<sup>3</sup>.

Удельная скорость роста биомассы находится по следующей формуле:

$$\mu = \frac{dX}{d\tau} \frac{1}{X},$$

где  $X$  – концентрация биомассы, мг/дм<sup>3</sup>.

Взаимосвязь между скоростью потребления субстрата и скоростью роста биомассы выражается зависимостью:

$$\frac{dX}{d\tau} = -Y \frac{dS}{d\tau},$$

где  $Y$  – экономический коэффициент, характеризующий выход биомассы на единицу потребленного субстрата, мг/мг.

С учетом уравнения Моно скорость потребления субстрата записывается в виде:

$$-\frac{dS}{d\tau} = \frac{1}{Y} \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} X.$$

Это уравнение используется в математических моделях систем биологической очистки сточных вод.

Применительно к сточным водам оно выглядит следующим образом:

$$-\frac{dL}{d\tau} = \alpha \frac{\mu_{\max} L}{K_m + L} a,$$

где  $L$  – величина БПК<sub>полн</sub>, которая характеризует концентрацию потребляемого субстрата  $S$ , мг/дм<sup>3</sup>;  $\alpha$  – величина, обратная экономическому коэффициенту, характеризующая количество БПК, из которого образуется 1 г ила, мг/г;  $K_m$  – константа насыщения по загрязнению, мг/дм<sup>3</sup>;  $a$  – концентрация беззольного вещества активного ила, г/дм<sup>3</sup>.

Прирост ила небольшой, и значение  $a$  принимается постоянным.

После разделения переменных и интегрирования получается:

$$-\frac{dL(K_m + L)}{L} = \mu_{\max} a \alpha d\tau,$$

$$-(K_m \ln L_\tau + L_\tau) = \mu_{\max} a \alpha \tau + c,$$

где  $L_\tau$  – значение БПК<sub>полн</sub> в момент времени  $\tau$ , мг/дм<sup>3</sup>.

В начальный момент времени, когда  $\tau = 0$ ,

$$c = -(K_m \ln L_0 + L_0),$$

где  $L_0$  – исходное значение БПК<sub>полн</sub>.

Тогда

$$-(K_m \ln L_\tau + L_\tau) = \mu_{\max} a \alpha \tau - (K_m \ln L_0 + L_0),$$

откуда

$$\tau = \frac{K_m (\ln L_0 - \ln L_\tau) + (L_0 - L_\tau)}{\alpha \mu_{\max} a} = \frac{L_0 - L_\tau}{\alpha \mu_{\max} a} + \frac{K_m \ln \frac{L_0}{L_\tau}}{\alpha \mu_{\max} a}.$$

Это уравнение положено в основу формул для расчета периода аэрации в аэротенках различных конструкций. Дополнительно вводятся коэффициенты, учитывающие влияние концентрации растворенного кислорода, свойства органических загрязняющих веществ, зольность ила, ингибирование продуктами распада и т. д.

**Влияние токсикантов.** Процесс окисления загрязнений представляет собой совокупность ферментативных реакций. Токсичные вещества, присутствующие в сточной воде, могут ингибировать ферментативные реакции вследствие взаимодействия с ферментом.

По своему механизму это взаимодействие может быть конкурентным или неконкурентным.

В первом случае токсикант конкурирует с субстратом за взаимодействие с активным центром фермента, и это приводит к изменению константы насыщения. Уравнение, описывающее кинетику процесса, в этом случае выглядит следующим образом:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} L}{K_m \left(1 + \frac{I}{K_i}\right) + L},$$

где  $I$  – концентрация ингибитора, мг/дм<sup>3</sup>;  $K_i$  – константа насыщения при ингибировании, мг/дм<sup>3</sup>.

Такое ингибирование менее ощутимо при достаточно высокой концентрации субстрата.

При неконкурентном ингибировании токсикант реагирует не с активным центром, а с другим участком фермента. При этом он не мешает взаимодействию субстрата с ферментом, но может препятствовать распаду фермент-субстратного комплекса. В этом случае степень торможения определяется концентрацией ингибитора, уменьшается максимальная скорость, и процесс описывается следующим уравнением:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} K_i}{K_i + I} \frac{L}{K_m + L},$$

где  $\mu_{\max}$  – максимально возможная скорость в отсутствии ингибирования, ч<sup>-1</sup>;  $\frac{\mu_{\max} K_i}{K_i + I}$  – максимально возможная скорость в присутствии ингибитора, ч<sup>-1</sup>.

При очистке концентрированных сточных вод может наблюдаться так называемое субстратное ингибирование. В условиях высокой концентрации субстрата может осуществляться взаимодействие промежуточных продуктов ферментативной реакции с еще одной (или несколькими) молекулами субстрата. В результате образуется комплекс, не дающий конечных продуктов реакции.

Степень ингибирования субстратом можно уменьшить различными способами:

- снижением концентрации субстрата, т. е. концентрации загрязнений в случае очистки сточных вод;
- увеличением концентрации фермента, т. е. дозы активного ила;
- снижением величины константы скорости реакции за счет длительной адаптации активного ила.

**Влияние концентрации кислорода.** Зависимость скорости аэробного процесса от концентрации растворенного кислорода можно описать следующим уравнением:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} C_k}{K_k + C_k},$$

где  $C_k$  – концентрация растворенного кислорода, мг/дм<sup>3</sup>;  $K_k$  – константа насыщения по кислороду, мг/дм<sup>3</sup>.

Двойное уравнение Моно учитывает влияние на скорость аэробного окисления и субстрата, и кислорода:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} L}{K_m + L} \frac{\mu_{\max} C_k}{K_k + C_k}.$$

Из этого уравнения следует, что влияние концентрации растворенного кислорода на скорость процесса наиболее ощутимо при отсутствии лимитирования субстратом. Поэтому максимальное повышение скорости окисления загрязнений за счет увеличения концентрации растворенного кислорода возможно при неполной очистке концентрированных сточных вод либо на начальных стадиях многоступенчатых схем.

**Влияние дозы ила.** Выше отмечалось, что увеличение дозы ила в аэротенке сдерживается ухудшением его осаждения во вторичных отстойниках и увеличением энергетических затрат на аэрацию. С другой стороны, исследования показывают, что скорость окисления прямо пропорциональна концентрации беззольного вещества активного ила только в небольшом диапазоне его концентраций (1–7 г/дм<sup>3</sup>). Одной

из причин снижения активности окисления загрязнений активным илом при увеличении его концентрации считают ингибирующее влияние продуктов метаболизма. Кинетика процесса в этом случае описывается уравнением для неконкурентного ингибирования, где ингибитором выступают продукты метаболизма ила:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} K_p}{K_p + P} \frac{L}{K_m + L},$$

где  $K_p$  – константа насыщения по продуктам метаболизма, мг/дм<sup>3</sup>;  $P$  – концентрация продуктов метаболизма ила, мг/дм<sup>3</sup>.

**2.1.5. Биодegradация загрязнений в аэробных условиях.** Процесс изъятия загрязнений, поступающих со сточной водой в аэротенк, можно разделить на три *стадии*:

1. Диффузия загрязнений из жидкой фазы и сорбция их на поверхности хлопьев активного ила. Скорость этого процесса определяется законами диффузии и зависит от гидродинамической обстановки в аэротенке. Сорбция загрязнений осуществляется очень быстро. Через несколько минут контакта сточной воды с иловой смесью концентрация загрязнений в воде существенно снижается.

2. Поступление веществ внутрь клеток. В зависимости от вида организмов и загрязнений перенос веществ осуществляется диффузией, активным транспортом либо фагоцитозом. Макромолекулы расщепляются на более мелкие фрагменты экзоферментами, секретлируемыми клетками. Твердые частицы загрязнений также сорбируются на поверхности хлопьев ила, а далее либо потребляются простейшими, либо, если это органические вещества, могут расщепляться экзоферментами.

3. Катаболизм (расщепление) загрязняющих веществ до простых соединений. Он сопровождается выделением энергии и образованием восстановительных эквивалентов (атомов водорода, электронов, гидрид-ионов). И энергия, и восстановительные эквиваленты используются в процессах биосинтеза (анаболизме), т. е. происходит прирост активного ила.

**Катаболизм углеводов.** В сточных водах могут содержаться и моно-, и полисахариды.

Утилизовать моносахариды способно большинство микроорганизмов, причем гексозы усваиваются легче, чем пентозы. Из гексоз

легче всего утилизируется глюкоза, галактозу усваивают не все микроорганизмы. Из пентоз лучше усваивается ксилоза.

Основные пути превращения моносахаридов: гликолиз, пентозофосфатные пути и путь Энтнера – Дудорова.

Олиго- и полисахариды расщепляются теми микроорганизмами, которые имеют для этого соответствующие гидролитические ферменты.

Амилазу, катализирующую расщепление крахмала, синтезируют многие грибы и бактерии.

Целлюлоза и гемицеллюлозы в аэробных условиях расщепляются бактериями и грибами. Среди бактерий основная роль принадлежит скользящим бактериям, которые передвигаются вследствие неравномерного выделения слизи поверхностью клеток. Это представители родов *Cytophaga*, *Sporocytophaga*, *Sorangium*, *Cellulomonas*, миксобактерии и др. Одни из них продуцируют целлюлазы в окружающую среду, другие осуществляют расщепление целлюлозы только в непосредственном контакте с ней. Интенсивно разлагают клетчатку грибы *Trichoderma viride*, *Aspergillus niger*, *Fusarium spp.*, выделяя ферменты в окружающую среду.

Гемицеллюлозы расщепляются более активно, чем целлюлоза. Целлюлозоразрушающие микроорганизмы имеют значение на очистных сооружениях целлюлозно-бумажных, деревообрабатывающих предприятий.

Пектиновые вещества расщепляются бактериями, способными образовывать пектиназу: *Bacillus polymyxa*, *Clostridium felsineum* и др.

**Катаболизм жиров.** Способностью расщеплять жиры обладают многие микроорганизмы. Под действием липаз жиры гидролизуются до глицерола и жирных кислот. Глицерол далее окисляется до пировиноградной кислоты и вовлекается в цикл Кребса. Жирные кислоты подвергаются  $\beta$ -окислению с последовательным отщеплением двухуглеродного фрагмента – ацетил-СоА. Активный минерализатор жиров *Pseudomonas fluorescens* постоянно присутствует в активном иле. Кроме того, в разложении жиров участвуют *Bacillus fluorescens*, *Pseudomonas liguefaciens*, *Achromobacter lipolyticum*, а также другие бактерии и грибы.

**Катаболизм углеводов.** В большинстве случаев разложение алифатических углеводов начинается с окисления концевой метильной группы в первичную спиртовую и протекает только в присутствии молекулярного кислорода. Для осуществления этой стадии

микроорганизмы должны иметь ферменты оксигеназы. Спирты далее окисляются до жирных кислот.

Метан окисляется специфической группой микроорганизмов, которые не используют другие органические соединения, за исключением метанола. Это представители родов *Methylomonas*, *Methylobacter*, *Methylococcus*.

Этан, пропан, бутан окисляются легче метана, труднее всего окисляются алканы с числом углеродных атомов от 5 до 10. По мере удлинения цепи возрастает число микроорганизмов, способных усваивать соответствующее соединение: это бактерии *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Arthrobacter*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*, дрожжи рода *Candida*. Разветвленные производные алифатических углеводородов в ряде случаев также доступны микроорганизмам. При замещении атомов водорода метильными группами имеет значение число этих групп и их расположение в цепи. Алканы с четным числом заместителей разлагаются хуже, чем с нечетным. Замещение водорода группой более длинной, чем метильная повышает устойчивость к микробиологическому воздействию.

Большинство ароматических соединений превращается на первом этапе в катехол или протокатеховую кислоту, которая служит субстратом для последующих реакций окислительного расщепления. Ферменты, катализирующие расщепление ароматического кольца, являются индуцибельными, т. е. синтезируются клеткой только во время роста на средах с ароматическими соединениями. При этом полициклические ароматические соединения (нафталин, фенантрен, антрацен) менее токсичны и подвержены воздействию большего количества микроорганизмов, чем моноароматические. Окислять ароматические углеводороды способны представители родов *Pseudomonas*, *Mycobacterium*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Aspergillus*, *Penicillium* и др.

К группе фенилзамещенных алифатических углеводородов относятся многие детергенты и пестициды. Некоторые из них могут использоваться штаммами микобактерий, псевдомонад, микрококков, другие – чрезвычайно устойчивы к микробиологическому воздействию, в воде и почве сохраняются в течение многих лет. Также трудно поддаются биологическому окислению ароматические соединения, содержащие в кольце галогены и нитрогруппы.

Лигнин – наиболее устойчивая часть растительной ткани. Чистыми культурами микроорганизмов он разлагается крайне медленно, на

протяжении нескольких месяцев и даже лет. Консорциумы микроорганизмов потребляют лигнин значительно быстрее. Есть сообщения, что в аэротенках, очищающих сточные воды производства древесно-волоконистых плит, распад лигнина заканчивается через 3–5 сут.

#### **Превращение соединений азота.**

**Аммонификация.** Белки расщепляются протеазами на пептидные цепочки различной длины и отдельные аминокислоты. Низкомолекулярные пептиды и аминокислоты легко подвергаются окислительному или гидролитическому дезаминированию под действием окси- или дегидрогеназ соответственно. Наиболее активными аммонификаторами являются *Proteus vulgaris*, различные виды *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*.

Нуклеиновые кислоты используются значительно меньшим числом видов бактерий, чем белки (*Mycobacterium*, *Corynebacterium*, *Nocardia*). Окисление начинается с их расщепления под действием нуклеаз на отдельные нуклеотиды, которые затем через промежуточное образование мочевины и органических кислот минерализуются до аммиака, диоксида углерода и воды.

Мочевина разлагается бактериями и грибами, обладающими ферментом уреазой. Специфические уробактерии *Micrococcus urea* и *Sarcina urea* переносят высокую щелочность среды и перерабатывают большие количества мочевины. Мочевая кислота гидролизуется до мочевины и дальше полностью минерализуется.

**Потребление восстановленных соединений азота.** Большинство микроорганизмов способны усваивать восстановленные формы азота: аммиак и соли аммония.

При ассимиляционном процессе такой азот включается в состав аминокрупп аминокислот и далее – в другие азотсодержащие соединения клетки.

К диссимиляционному процессу (нитрификации) способны только некоторые микроорганизмы – нитрификаторы. Первая группа нитрификаторов (*Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosococcus*, *Nitrosolobus*) окисляет аммиак до нитритов, вторая группа (*Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrococcus*) окисляет нитриты до нитратов. Общую скорость реакции лимитирует первая стадия, т. е. окисление аммиака.

Большинство нитрифицирующих бактерий являются облигатными автотрофами, и в присутствии органических веществ их рост угнетается. Некоторые нитрификаторы способны усваивать органические

соединения, однако вследствие очень низкой скорости роста они не могут конкурировать с гетеротрофами за субстрат и кислород. Таким образом, до тех пор пока в сточной воде присутствуют органические вещества, аммиак ассимилируется гетеротрофами в процессах конструктивного обмена. После того как органические вещества минерализуются, создаются благоприятные условия для деятельности первой группы нитрификаторов. В то же время избыток аммиака препятствует развитию представителей второй группы, которое начинается только после окисления избытка аммиака.

Это обстоятельство позволяет использовать нитрифицирующие бактерии в качестве индикаторов процесса очистки. Их появление в очищаемой воде свидетельствует о минерализации основной части органических веществ.

Нитрификаторы весьма чувствительны к условиям окружающей среды: температуре, значению рН, концентрации кислорода, наличию токсичных веществ. Как и другие виды, нитрифицирующие бактерии плохо переносят резкие перепады температуры. Оптимальное значение рН находится в узком интервале: 8–9. Возможно, влияние рН связано с ингибирующим воздействием субстратов, поскольку недиссоциированные аммиак и азотистая кислота подавляют окисление и аммиака, и нитрита. К недостатку кислорода нитрификаторы более чувствительны, чем гетеротрофные микроорганизмы. Высокими концентрациями кислорода процесс не ингибируется и может протекать даже при использовании чистого кислорода. Как правило, нитрифицирующие бактерии не более чувствительны к действию токсичных веществ, чем другие микроорганизмы активного ила, хотя довольно распространено мнение об их повышенной чувствительности.

**Нитратредукция.** При ассимиляционной нитратредукции нитриты и нитраты восстанавливаются до аммонийного азота, который включается в состав аминокислот. Такой процесс способны осуществлять многие бактерии, некоторые грибы, водоросли.

При диссимиляционном восстановлении (денитрификации) нитрат последовательно превращается в нитрит, оксид азота (II), оксид азота (I) и молекулярный азот. Большинство денитрифицирующих бактерий – факультативные анаэробы. Это бактерии родов *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Spirillum*, *Alcaligenes*, *Paracoccus*, *Thiobacillus*. При достаточном количестве кислорода в среде они окисляют органические соединения как обычные аэробы, при недостатке кислорода в качестве акцепторов элек-

тронов используют нитриты и нитраты. Окисляться при этом могут углеводы, органические кислоты, аминокислоты, спирты и т. д. Если доступных денитрификаторам соединений мало, они минерализуются до диоксида углерода и воды, в противном случае – накапливаются продукты неполного окисления. В аэротенках даже при активной аэрации всегда есть зоны с недостаточным содержанием кислорода, где имеет место денитрификация. Вместе с тем в очищенной воде нитриты и нитраты могут содержаться в концентрациях, препятствующих выпуску воды в водоем. В настоящее время все более широкое распространение получает восстановление нитритов и нитратов в специальных сооружениях, в которых создаются условия для денитрификации.

**Фиксация молекулярного азота.** Молекулярный азот способны усваивать симбиотические бактерии родов *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* и свободноживущие: *Clostridium*, *Azotobacter*, цианобактерии и некоторые другие. *Azotobacter* присутствуют в водоемах, способны усваивать трудноокисляемые соединения, при этом обогащают среду азотом и витаминами. Предпринимались попытки использовать их для очистки сточных вод нефтеперерабатывающего и гидролизного производства, однако из-за невысокой скорости роста они вытесняются из очистных сооружений другими микроорганизмами.

#### **Преобразование соединений серы.**

В сточных водах некоторых предприятий, в частности целлюлозно-бумажных, содержатся восстановленные соединения серы: сероводород, меркаптаны, диметилсульфид и др. Окислять такие соединения в условиях аэротенка способны тионовые и серобактерии.

Большинство тионовых бактерий окисляют восстановленные соединения серы до сульфатов, используя молекулярный кислород. Это бактерии родов *Thiobacillus*, *Thiomicrospira*, *Sulfolobus*. Факультативные анаэробы *Thiobacillus denitrificans* в аэробных условиях используют кислород, а при его отсутствии – кислород нитратов, восстанавливая их до молекулярного азота. Одни тионовые бактерии являются облигатными хемоавтотрофами (*Thiobacillus denitrificans*, *T. thioparus*), другие (*Sulfolobus*) могут использовать органические соединения в качестве источников углерода и энергии.

Группу серобактерий (*Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Leucothrix*) объединяет свойство откладывать капли серы внутри клеток или на их поверхности (см. вклейку, рис. VI, VII), что является показателем степени очистки воды. Серобактерии являются постоянными обитателями очистных сооружений.

**2.1.6. Технологическая схема механобиологической очистки городских сточных вод.** Разработка технологической схемы очистки сточных вод представляет собой сложную технико-экономическую задачу.

На выбор методов очистки и определение состава сооружений оказывают влияние ряд *факторов*:

- расход и состав загрязнений сточных вод;
- необходимая степень очистки, которая определяется объемом сбрасываемой воды и мощностью водоема;
- рельеф местности, характер грунтов, энергетические затраты и др.

При формировании технологической схемы должны быть решены следующие *задачи*:

- 1) максимальное изъятие загрязняющих веществ по возможности до уровня, удовлетворяющего условиям повторного использования воды для технологических нужд;
- 2) сведение к минимуму отрицательного воздействия очистных сооружений на окружающую среду;
- 3) обеспечение максимальной эффективности использования основных фондов сооружений очистки.

В поселках городского типа, расположенных на многоводных реках, при расходе сточных вод до 10 тыс. м<sup>3</sup>/сут необходимый эффект может быть достигнут только сооружениями механической очистки.

При расходах сточных вод 10–20 тыс. м<sup>3</sup>/сут после сооружений механической очистки используют биофильтры, при расходах от 50 тыс. до 2–3 млн. м<sup>3</sup>/сут – аэротенки.

Если эти сооружения биологической очистки не позволяют обеспечить необходимую степень очистки сточных вод, то применяют доочистку (глубокую очистку) (см. гл. 4).

После механобиологической очистки городских сточных вод проводят их обеззараживание.

На рис. 3 приведена общая схема городской очистной станции с биологической очисткой сточных вод в аэротенках.

Сточные воды поступают в приемную камеру 1, которая предназначена для гашения скорости потока жидкости и сопряжения трубопроводов с открытым лотком. Механическая очистка сточных вод производится на решетках 2, в песколовках 3 и первичных отстойниках 4.

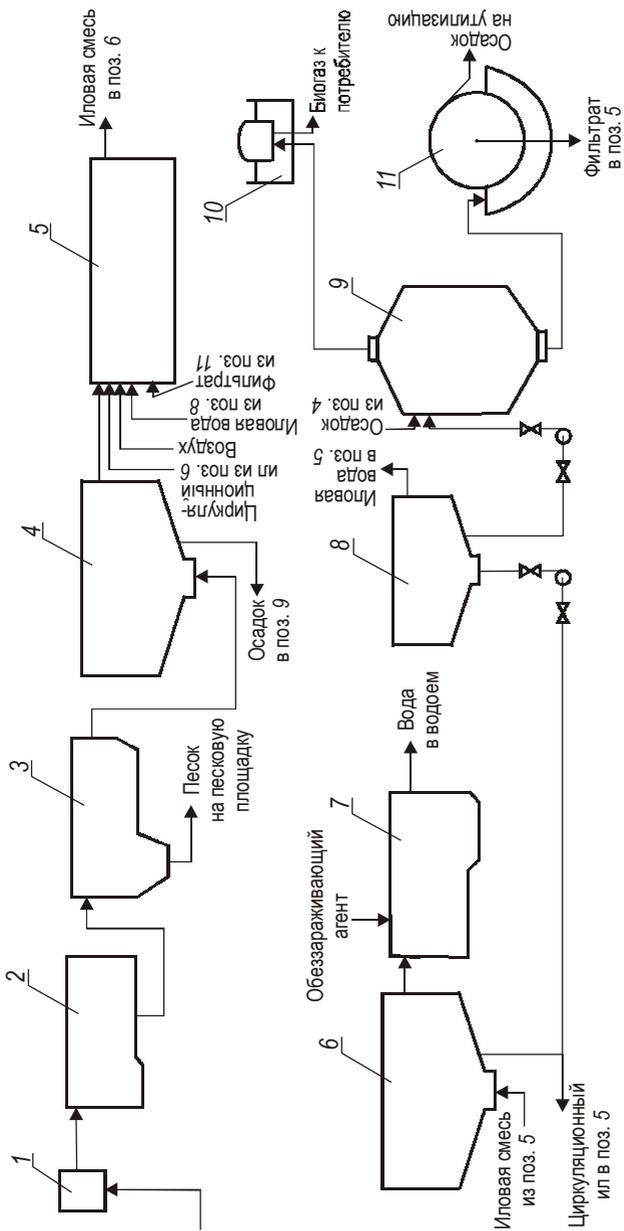


Рис. 3. Технологическая схема механикобиологической очистки городских сточных вод:  
 1 – приемная камера; 2 – решетка-дробилка; 3 – песколовка; 4 – первичный отстойник; 5 – аэротенк; 6 – вторичный отстойник;  
 7 – контактная камера; 8 – илоуплотнитель; 9 – метантенк; 10 – газгольдер; 11 – вакуум-фильтр

Осветленная в первичных отстойниках сточная вода поступает в аэротенк 5. Воздуходувками, установленными в машинном здании, в аэротенк подается воздух. В аэротенке осуществляется сорбция и окисление загрязнений, наблюдается прирост активного ила. Иловая смесь (смесь очищенной сточной воды и активного ила) из аэротенка направляется во вторичные отстойники 6, где осаждается активный ил и основная его масса возвращается в аэротенк (циркуляционный активный ил).

Очищенная сточная вода подается в контактный резервуар 7 для обеззараживания и направляется в водоем.

Избыточный активный ил уплотняется в илоуплотнителе 8 и поступает для сбраживания в метантенк 9. Сюда же подается осадок из первичных отстойников. Образующийся в процессе брожения биогаз собирается в газгольдере 10, осадок обезвоживается на вакуум-фильтре 11 и направляется на утилизацию. Иловая вода из илоуплотнителя и фильтрат с вакуум-фильтра подаются для очистки в аэротенк.

**2.1.7. Особенности очистки производственных сточных вод.** Как отмечалось выше, особенностью производственных сточных вод является сложный, непостоянный состав, возможность присутствия токсичных компонентов, нестабильность основных параметров: расхода, температуры, значения pH. Это дестабилизирует технологический режим работы очистных сооружений, препятствует адаптации активного ила к загрязняющим веществам. В таком случае целесообразно использовать технологическую схему очистных сооружений с предварительным усреднением поступающих сточных вод. Объем усреднителя рассчитывается для выравнивания концентрации загрязняющих веществ и регулирования расхода сточной воды.

Для интенсификации осаждения взвешенных веществ в первичных отстойниках и насыщения сточной воды кислородом проводят предварительную аэрацию. В качестве предварительных аэраторов используют водопроводящие каналы или специальные емкости – преаэраторы. Эффективность предварительной аэрации повышается, если в преаэратор подается избыточный активный ил, лучше регенерированный. В этом случае, помимо физико-химических процессов (коагулирование, флокуляция, сорбция), в преаэраторе протекают биосорбция и окисление некоторой части легкоокисляемых органических веществ. Продолжительность предварительной аэрации составляет 10–20 мин.

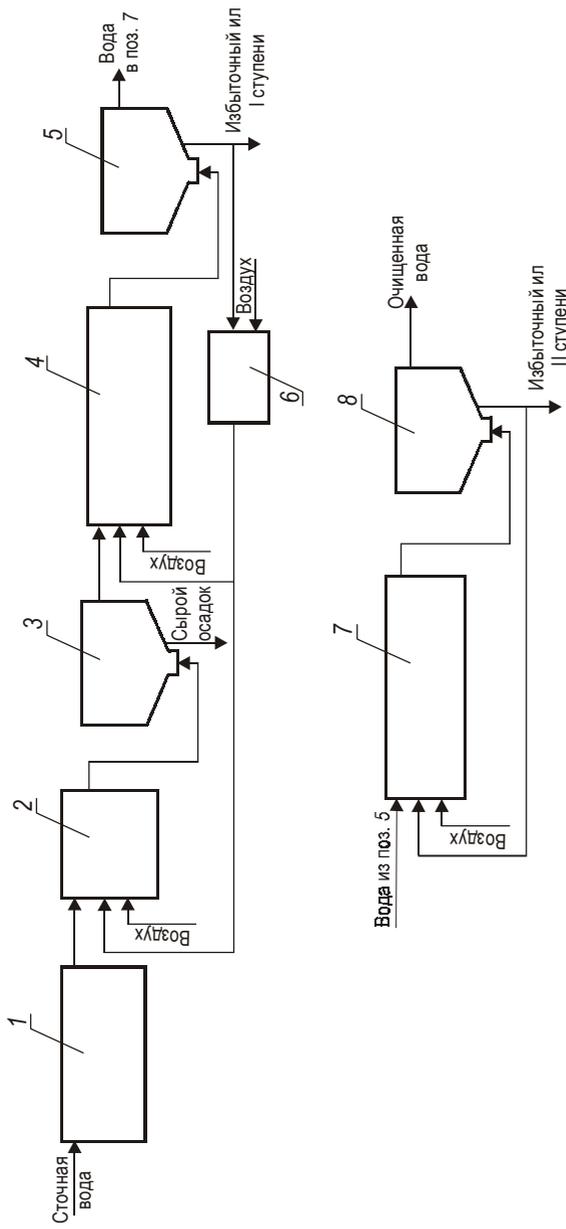


Рис. 4. Схема двухступенчатой биологической очистки концентрированных производственных сточных вод:  
 1 – усреднитель, 2 – преаerator, 3 – первичный отстойник, 4 – аэротенк-смеситель, 5 – вторичный отстойник I ступени, 6 – регенератор, 7 – аэротенк-выеснитель, 8 – вторичный отстойник II ступени

При поступлении на сооружения концентрированных сточных вод ( $\text{БПК}_{\text{полн}} > 1000 \text{ мг О}_2/\text{дм}^3$ ) целесообразно применять двухступенчатую очистку. При этом на первой ступени используют аэротенк-смеситель, позволяющий быстро снимать основную массу загрязнений. За счет быстрого разбавления сточной воды снижается негативное воздействие на активный ил при наличии в стоке токсичных соединений. На второй ступени устанавливают аэротенк-вытеснитель, обеспечивающий высокую глубину очистки. В результате автоселекции на каждой ступени формируется специфическая микробиота. В аэротенке первой ступени – микроорганизмы, имеющие высокую скорость роста, потребляющие легкоокисляемый субстрат, а в аэротенке второй ступени – организмы, осуществляющие доокисление трудноокисляемых соединений.

На рис. 4 приведена схема двухступенчатой биологической очистки концентрированных производственных сточных вод.

Возможны различные *модификации* двухступенчатой очистки:

1. Избыточный активный ил первой и второй ступени отводится раздельно. Активный ил первой ступени высоконагружен, прирост его большой и он требует дальнейшей обработки. Ил второй ступени сильно минерализован и нуждается только в обезвоживании.

2. Избыточный активный ил второй ступени направляют в аэротенк-смеситель первой ступени. В этом случае улучшается окислительная работа всей системы в целом, но возрастает общее количество избыточного активного ила, который трудно поддается обработке.

3. Избыточный активный ил первой ступени подается в аэротенк второй ступени, где осуществляется его минерализация, а значит, уменьшаются затраты на обработку. Но поскольку ил второй ступени засорен илом первой ступени, снижаются его адаптационные возможности и уменьшается глубина очистки.

Общим недостатком многоступенчатых схем является необходимость устройства промежуточных вторичных отстойников и связанной с ними системы распределительных лотков. Это приводит к увеличению общего объема сооружений и повышению гидравлических потерь напора при прохождении жидкости по сооружениям, что требует роста затрат на перекачивание циркуляционного ила.

**2.1.8. Очистка сточных вод с применением кислорода.** Концентрация растворенного кислорода оказывает существенное влияние на интенсивность биохимических процессов в аэротенке.

Между тем кислород плохо растворяется в воде, при 20°C его растворимость составляет около 9 мг/дм<sup>3</sup>. По закону Генри, растворимость пропорциональна парциальному давлению кислорода в газовой фазе, поэтому концентрация растворенного кислорода в аэротенке может быть повышена до 10–12 мг/дм<sup>3</sup> при применении технического кислорода. Доза ила в этом случае может поддерживаться на уровне 8–12 г/дм<sup>3</sup>.

Процесс биологической очистки с применением кислорода активно разрабатывается во всех развитых странах. Аэротенки, в которых аэрация иловой смеси осуществляется кислородом, называются окситенками. Для повышения эффективности использования кислорода применяют герметичные конструкции окситенков, предусматривают циркуляцию газа через слой жидкости.

Окислительная мощность окситенков в 5–10 раз выше, чем у аэротенков, в них ниже прирост активного ила, и при этом активный ил имеет лучшие седиментационные свойства, легче обезвоживается.

Окситенки могут применяться как самостоятельные сооружения, а также в качестве первой ступени при многоступенчатой биологической очистке, когда БПК<sub>полн</sub> сточной воды выше 1000 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>.

Основным недостатком окситенков является необходимость получения технического кислорода и связанные с этим затраты. Наиболее целесообразно использование окситенков в отраслях, где имеется резерв кислорода: черная металлургия, производство синтетического каучука, азотная промышленность и др.

Экономическая эффективность применения кислорода возрастает с увеличением пропускной способности сооружений. Расчеты показывают, что строительство кислородных цехов целесообразно для станций производительностью >650 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

## 2.2. Очистка сточных вод в биофильтрах

**Классификация биофильтров.** *Биофильтр* – это сооружение круглой или прямоугольной в плане формы, заполненное крупнозернистой насадкой (загрузкой) 2, на которой развиваются микроорганизмы, образуя пленку (био пленку) (рис. 5). Материал загрузки должен быть устойчивым к разрушению и безвредным для микроорганизмов.

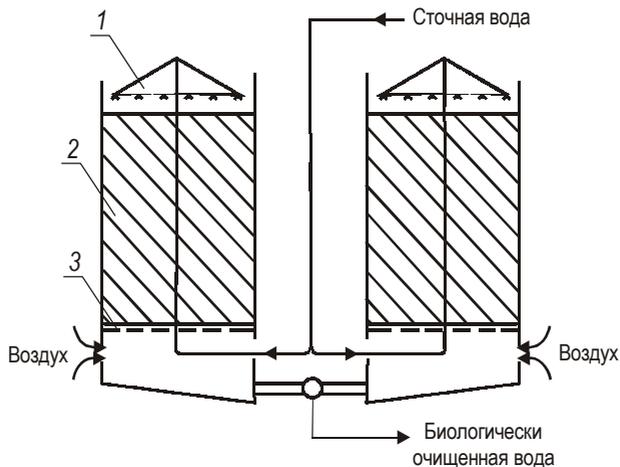


Рис. 5. Биофильтр для очистки сточной воды:  
 1 – устройство для распределения сточной воды;  
 2 – слой загрузки; 3 – дренажное дно

Водораспределительное устройство 1 обеспечивает равномерное орошение сточной водой поверхности загрузки биофильтра, дренажное устройство 3 служит для удаления очищенной сточной воды. Снизу подается постоянный поток воздуха для аэрации. Вентиляция может осуществляться принудительно, однако практика показывает, что часто разности температур загрузки фильтра, сточной воды и окружающего воздуха достаточно для обеспечения смены воздуха и удовлетворительной аэрации воды.

При контакте сточной воды с биопленкой происходит сорбция органических загрязнений поверхностью биопленки, во время паузы между орошениями сорбированные загрязнения окисляются, и восстанавливается сорбционная активность биопленки. В биофильтре происходит непрерывный прирост и отмирание биопленки. Омертвевшая пленка выносятся протекающей водой и осаждаются во вторичных отстойниках.

В зависимости от вида загрузочного материала различают биофильтры с объемной и плоскостной загрузкой.

В качестве объемной загрузки применяют щебень, гальку, гравий, керамзит и другие пористые материалы, удельная поверхность которых составляет 50–80 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. В зависимости от крупности фракций

загрузочного материала биофильтры с объемной загрузкой подразделяют на следующие *виды*:

- капельные с размером фракций 20–30 мм и высотой слоя загрузки 1–2 м;
- высоконагружаемые, имеющие крупность загрузочного материала 40–60 мм и высоту слоя загрузки 2–4 м;
- башенные с крупностью загрузочного материала 60–80 мм и высотой слоя загрузки 8–16 м.

Капельные биофильтры впервые появились в Великобритании в 1893 г. В капельных биофильтрах сточная вода подается в виде капель или струй. Их рекомендуется применять при расходе сточных вод не более 1000 м<sup>3</sup>/сут, гидравлическая нагрузка составляет 3 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · сут). Основным недостатком капельных биофильтров является их заиливание (разрастание биопленки) в случае, если нагрузка по органическим загрязнителям больше допустимой.

Высоконагружаемые биофильтры появились в начале XX в. Благодаря крупным фракциям загрузочного материала нагрузка по воде в них в несколько раз выше, чем в капельных биофильтрах и составляет 10–30 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · сут). Сточная вода, движущаяся с высокой скоростью, постоянно выносит трудноокисляемые нерастворимые примеси и отмирающую биопленку, и высоконагружаемые фильтры не подвержены заиливанию. В таких биофильтрах лучшие условия аэрации и выше окислительная мощность, чем в капельных.

Для строительства башенных биофильтров необходим благоприятный рельеф местности. Широкого распространения они не получили.

Биофильтры с плоскостной загрузкой подразделяются на следующие *виды*:

- 1) с жесткой насыпной загрузкой (керамической, пластмассовой, металлической). В зависимости от материала плотность загрузки составляет 100–600 кг/м<sup>3</sup>, пористость 70–90%, высота слоя загрузки 1–6 м;
- 2) с жесткой блочной загрузкой (гофрированные и плоские листы или пространственные элементы из пластмассы). Плотность загрузки 40–100 кг/м<sup>3</sup>, пористость 90–97%, высота слоя загрузки 2–16 м;
- 3) с мягкой или рулонной загрузкой (металлические сетки, пластмассовые пленки, синтетические ткани, которые крепятся на каркасах или укладываются в виде рулонов). Плотность такой загрузки 5–60 кг/м<sup>3</sup>, пористость 94–99%, высота слоя загрузки 3–8 м.

Высокая пористость плоскостных загрузочных материалов позволяет отказаться от принудительной вентиляции и сэкономить значительное количество электроэнергии. Удельная поверхность плоскостных загрузочных материалов составляет 80–450 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>, что выше, чем у объемных. Однако даже при одинаковой удельной поверхности активная поверхность плоскостных загрузочных материалов значительно больше за счет отсутствия мертвых зон, образующихся при соприкосновении фракций объемного загрузочного материала.

Окислительная мощность биофильтров составляет 400–580 г БПК<sub>полн</sub>/(м<sup>3</sup> · сут).

**Формирование биопленки на поверхности загрузки.** Термином «биопленка» обозначают слизистый матрикс на поверхности носителя, состоящий преимущественно из полисахаридов, которые удерживают в пределах единой структуры клетки микроорганизмов. На скорость формирования биопленки, прочность прикрепления микроорганизмов и их активность в биопленке оказывают влияние ряд *факторов*:

– факторы среды (концентрация и состав загрязнений, pH, температура, гидродинамический режим). Концентрация органических веществ влияет на скорость формирования биопленки. Исследования показывают, что образование биопленки происходит тем быстрее, чем ниже концентрация загрязнений в сточной воде и чем разнообразнее состав растворенной части этих загрязнений. Состав органической части загрязнений определяет видовой состав микроорганизмов и соотношение между отдельными группами. В зависимости от минерального состава сточной воды могут меняться свойства поверхности насадки, например, вследствие адсорбции катионов;

– свойства материала загрузки (структура, удельная площадь поверхности, пористость, конфигурация и размеры пор и др.). Заселение микроорганизмами пористых, шероховатых поверхностей происходит в несколько раз быстрее, чем гладких, с которых микроорганизмы смываются потоком жидкости;

– свойства микроорганизмов (поверхностные характеристики клеток – гидрофобность, заряд, способность продуцировать полимеры и др.). Свойства микроорганизмов, в свою очередь, определяются факторами среды.

**Микробиологический состав биопленки.** Изучению состава биопленки не уделялось достаточно внимания.

По сравнению с аэротенками концентрация микроорганизмов в биофильтрах выше более чем в 10 раз и составляет от 10 до 60 г беззольного вещества биомассы на 1 дм<sup>3</sup>.

При культивировании изолированных из биопленки микроорганизмов в жидкой среде в условиях аэрации формируются хлопья, напоминающие активный ил. Это свидетельствует об идентичности микробиоты при очистке сточной воды одинакового состава в аэротенке и в биофильтре. Вместе с тем исследования показывают, что биоценоз аэротенков и биофильтров характеризуется разным количественным соотношением отдельных групп микроорганизмов. Доля анаэробных микроорганизмов в биопленке биофильтра значительно выше, чем в аэротенке и может достигать 25% от общей численности микроорганизмов. До 30% в составе биопленки может составлять содержание грибов. Преобладают грибы родов *Fusarium*, *Geotrichum*, *Sporotrichum*, *Penicillium*, *Trichoderma* и др. При этом отмечаются сезонные колебания состава биопленки: летом преобладают зооглейные скопления бактерий, в осенне-зимний период – грибы.

Установлено, что состав микробиоты биопленки существенно меняется в зависимости от глубины биофильтра. Бактерии, образующие зооглеи, развиваются в верхней части биофильтра. Максимальное количество и наибольшее разнообразие микроорганизмов обнаруживается на глубине 0,25–0,50 м. Здесь преобладают бактерии, окисляющие органические соединения и нитрифицирующие бактерии. Глубже появляются денитрификаторы, а на глубине более 1 м общее количество микроорганизмов невелико, причем большая часть из них – анаэробы. Родовой состав грибов также меняется по высоте биопленки: *Fusarium* лучше развиваются в верхней части, *Geotrichum* – в глубине биофильтра. Развитию грибов препятствуют повышенные концентрации ионов  $Zn^{2+}$ , растворы солей цинка рекомендуется использовать для подавления слишком бурного развития грибов.

**Применение биофильтров.** Биофильтры используют для очистки сточных вод самых различных производств: целлюлозно-бумажной, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой промышленности и др. На биофильтрах может быть достигнута полная биологическая очистка сточной воды, значение БПК<sub>полн</sub> которой не превышает 220 мг/дм<sup>3</sup> для капельных и 300 мг/дм<sup>3</sup> для высоконагружаемых биофильтров.

Важными факторами стабильной работы биофильтра являются равномерное орошение его поверхности сточной водой и достаточное поступление кислорода воздуха.

Водораспределительные устройства могут быть подвижными и неподвижными, интервал между орошениями не должен превышать 5–8 мин.

Обогрев биофильтров происходит сточной водой и за счет выделяющегося в результате окисления загрязнений тепла. Если температура поступающей сточной воды и, следовательно, в толще загрузки биофильтра опускается ниже 10°C, возможно нарушение процесса нитрификации, восстановить который достаточно сложно. Для предупреждения переохлаждения биофильтров в зимний период применяют ряд мероприятий: установление противветровой защиты, сооружение купольных перекрытий над фильтрами, обеспечение равномерного притока сточных вод.

Вентиляция может быть естественной и искусственной. Искусственная вентиляция в основном используется в высоконагружаемых биофильтрах (аэрофильтрах). Для других типов биофильтров искусственная вентиляция может применяться только для обеспечения необходимого воздухообмена внутри помещения, в котором установлен биофильтр, или для поддержания требуемой температуры.

Перерывы в орошении аэрофильтров при сохранении продувки воздухом могут сопровождаться повышением температуры в теле фильтра до 50–60°C и появлением неприятного запаха, связанного с разложением отмирающей биопленки.

В зависимости от уровня загрязнения сточных вод, типа биофильтров и других факторов могут использоваться различные варианты технологических схем (рис. 6).

Традиционная технологическая схема очистки сточных вод методом биофильтрации включает первичный отстойник для удаления взвешенных частиц, биофильтр и вторичный отстойник (рис. 6, а).

При очистке более загрязненной воды необходимо предусматривать ее рециркуляцию. Для этого отбирают часть биологически очищенной сточной воды после вторичного отстойника и смешивают с потоком, подаваемым на биофильтр (рис. 6, б). При этом достигается разбавление воды и повышается эффективность очистки. Вместе с тем увеличивается нагрузка на биофильтр и отстойники и возрастают энергетические затраты на перекачивание воды.

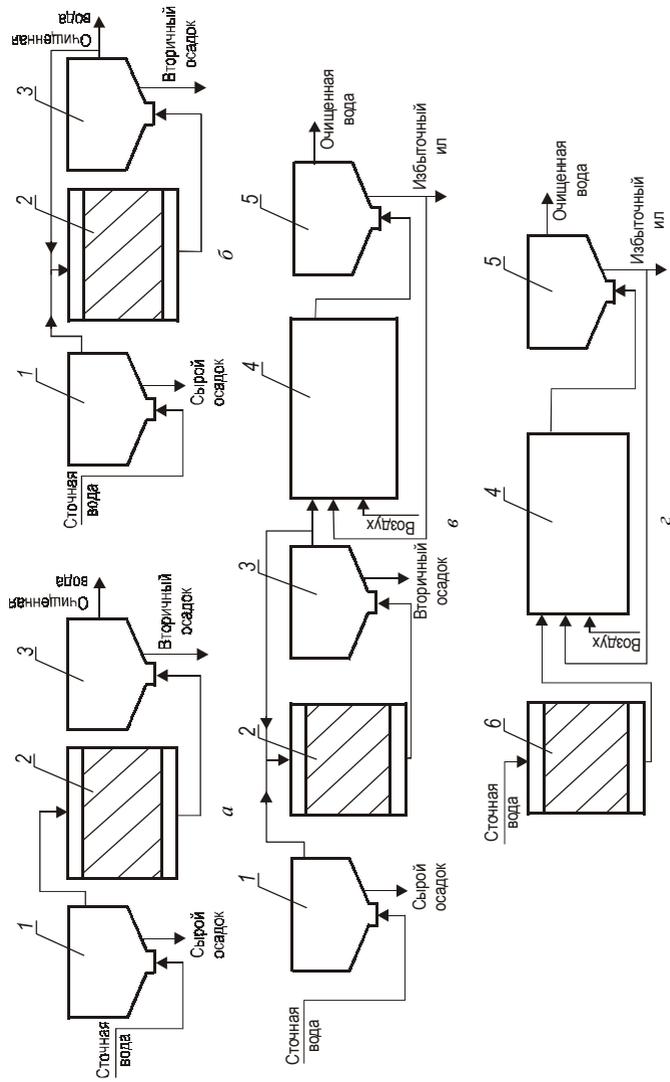


Рис. 6. Схемы очистки сточных вод в биофильтрах:

*а* – одноступенчатая; *б* – одноступенчатая с рециркуляцией;

*в* – двухступенчатая (I ступень – биофильтр с объемной загрузкой; II ступень – аэротенк); *г* – без первичного отстойника;

*1* – первичный отстойник; *2* – биофильтр с объемной загрузкой; *3* – вторичный отстойник; *4* – аэротенк;

*5* – третичный отстойник; *6* – биофильтр с плоскостной загрузкой

Очистка сточных вод с высокой концентрацией загрязнений, содержащих трудноокисляемые загрязнения, может быть двухступенчатой. При этом на первой ступени используют биофильтр, а на второй может быть биофильтр либо другое сооружение биологической очистки, например, аэротенк (рис. 6, в).

В последнее время находят применение одно- и двухступенчатые схемы биологической очистки с использованием на первой ступени биофильтров с плоскостной загрузкой, на которые сточная вода подается непосредственно после песколовок без первичного отстаивания (рис. 6, з).

## Глава 3. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В АНАЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ

### 3.1. Характеристика метанового брожения

Биологические методы удаления загрязнений общепризнанно считаются наиболее экономически эффективными и экологически приемлемыми. Но для широко распространенных аэробных технологий характерны труднопреодолимые недостатки: большие затраты энергии на аэрацию стоков; сложность очистки стоков с высоким уровнем загрязненности; образование в больших количествах труднообезвоживаемого и не находящего применения избыточного активного ила.

Современные достижения науки и техники позволяют с высокой эффективностью использовать альтернативный анаэробный процесс обезвреживания стоков. За рубежом достигнут значительный прогресс в области разработки и практического применения анаэробных биореакторов второго поколения, которые обеспечивают очистку стоков в очень широком диапазоне концентраций загрязнений, с высокой скоростью и эффективностью. В настоящее время анаэробные методы широко и успешно используют для очистки стоков различных производств в странах Западной Европы, Латинской Америки, в Канаде, США, Индии.

Бурное развитие анаэробных технологий очистки сточных вод объясняется их серьезными *преимуществами* перед традиционными аэробными методами:

- 1) низкая потребность в электроэнергии ввиду отсутствия аэрации стока и циркуляции активного ила. Энергопотребление анаэробного процесса составляет примерно 10% от энергетических затрат на аэробный процесс;
- 2) малый прирост биомассы активного ила, который является обременительным отходом. В аэробных процессах образуется 1,0–1,5 кг ила на 1 кг деструктированных загрязнений (по БПК), в анаэробных – 0,1–0,2 кг;
- 3) образующийся избыточный анаэробный ил стабилен, может храниться длительное время при температуре до 15°C без значительной потери активности, что очень важно для предприятий с периодическим циклом производства;

4) это единственный способ очистки сточной воды, который позволяет частично (иногда даже полностью) компенсировать затраты, связанные с организацией этого процесса, за счет генерации биогаза, используемого в качестве энергоносителя. На 1 кг деструктурированных загрязнений по ХПК образуется 0,26–0,34 м<sup>3</sup> метана (или 0,30–0,45 м<sup>3</sup> биогаза);

5) анаэробные методы пригодны для очистки высококонцентрированных стоков. Допустимы очень высокие нагрузки по загрязнению – до 30 кг ХПК/(м<sup>3</sup> · сут);

6) современные анаэробные биореакторы занимают небольшие производственные площади, устойчивы к длительным перерывам в подаче сточной воды, что позволяет эффективно использовать их при очистке стоков периодически действующих и сезонных производств.

Тем не менее метод анаэробной очистки имеет и *недостатки*:

– метод пригоден только для предварительной очистки сточной воды со снижением величины БПК на 80–90%;

– анаэробные бактерии, особенно метаногенные, растут очень медленно. Пуск биореактора требует длительного времени, если отсутствует инокулят с аналогичных установок;

– при очистке стоков с высоким содержанием сульфатов образуются продукты с неприятным запахом, что требует герметизации оборудования.

Метановое брожение сточных вод и органических отходов начинается при создании анаэробных условий без специальной микробной инокуляции за счет спонтанно развивающихся микроорганизмов, присутствующих в воде или отходах и окружающей среде.

Процесс анаэробного превращения органических веществ с образованием биогаза (метановое брожение, или биометаногенез) протекает через четыре последовательных *стадии* (рис. 7):

1) стадия гидролиза сложных биополимерных молекул (белков, липидов, полисахаридов и др.) на более простые олиго- и мономеры: аминокислоты, углеводы, жирные кислоты и др.;

2) кислотогенная стадия – образовавшиеся мономеры конвертируются бактериями-бройдильщиками в ряд простых соединений: летучие жирные кислоты, спирты, молочную кислоту, метанол, СО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> и Н<sub>2</sub>S;

3) ацетогенная стадия – образовавшиеся на предыдущей стадии продукты конвертируются в ацетат, Н<sub>2</sub>, СО<sub>2</sub>;

4) метаногенная стадия – уксусная кислота,  $H_2$  и  $CO_2$ , муравьиная кислота и метанол трансформируются в метан и  $CO_2$ .

Все эти превращения осуществляет сложное по составу сообщество микроорганизмов (несколько сотен видов), среди которых преобладают бактерии.



Рис. 7. Общая схема метанового брожения

Гидролиз биополимеров осуществляется экзогенными ферментами, экскретируемыми в ферментационную среду гидролитическими микроорганизмами. Выделены и описаны анаэробные гидролитические бактерии, разлагающие целлюлозу, гемицеллюлозу, крахмал, пектин. Они принадлежат к родам *Clostridium*, *Acetivibrio*, *Eubacterium*, *Bacillus*, *Lactobacillus* и др.

Большинство протеолитических бактерий метантенков являются клостридиями. Обнаружены также обладающие протеолитической

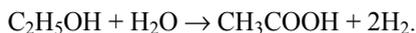
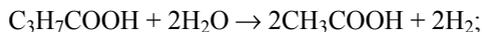
активностью бактерии родов *Peptococcus*, *Bifidobacterium*, *Eubacterium*.

Наименее изучен процесс анаэробного гидролиза липидов. Микроорганизмы с липолитической активностью представлены кластридиями и микрококками.

Присутствующий в растительных тканях лигнин в анаэробных условиях практически не гидролизует. Лишь небольшие его фрагменты с низкой молекулярной массой могут разлагаться в метантенках с образованием  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и ацетата.

Стадия гидролиза при метановом брожении тесно связана с кислотогенной стадией (брожением). Между этими стадиями нет четкой границы, так как обладающие гидролитической активностью микроорганизмы используют продукты гидролиза для накопления биомассы. Большая часть бактерий-бродильщиков является строгими анаэробами (*Clostridium*, *Bacteroides*, *Eubacterium* и др.), но в значительном количестве присутствуют и факультативные анаэробные бактерии, например рода *Streptococcus*. Из-за широкого видового разнообразия кислотогенные бактерии достаточно устойчивы к изменениям условий среды метантенка. Отходы, содержащие в значительном количестве соединения серы и азота, могут индуцировать рост сульфатредуцирующих бактерий и денитрификаторов.

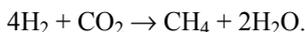
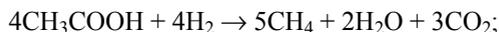
Ацетогенные бактерии осуществляют разложение продуктов кислотогенной стадии: дегидрогенизацию жирных кислот с более длинной, чем у уксусной кислоты цепью и конверсия спиртов в ацетат:



Это протонвосстанавливающие синтрофные бактерии (*Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*), нуждающиеся, как правило, в водородиспользующих партнерах, роль которых выполняют метановые бактерии и сульфатредукторы. Фактически ацетогенные бактерии подготавливают субстрат, пригодный для жизнедеятельности метанобразующих бактерий, завершающих сложный процесс распада органического вещества в анаэробных условиях.

В метаногенном биоценозе имеет место более чем 10-кратное численное превосходство разнообразия ферментативных бактерий над метанобразующими (из 300 видов анаэробных микроорганизмов продуцируют метан около 30 видов).

Метаногенные бактерии – наиболее капризная с точки зрения условий культивирования группа среди симбионтов, участвующих в анаэробном сбраживании. Они требуют строжайшего анаэробноза, нейтральной или слабощелочной реакции среды (рН 6–8), нуждаются в микроколичествах кобальта, молибдена, никеля, могут использовать в качестве источников энергии и углерода только 8 субстратов (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>, формат, закись углерода, метанол, ацетат, моно-, ди- и триэтаноламины), из которых наиболее важными являются ацетат и CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>:



При анаэробном разложении сложных органических веществ более 70% метана образуется из ацетата. Метаногенные бактерии 90–95% используемого углерода превращают в метан, и только 5–10% углерода расходуется на прирост биомассы.

Известно более 45 видов метаногенов, принадлежащих к 13 родам: *Methanobacter*, *Methanococcus*, *Methanogenum*, *Methanosarcina*, *Methanothrix* и др. Метанообразующие бактерии отличаются морфологическим разнообразием. Среди них имеются палочковидные, округлые, спиральные, нитевидные формы.

Процесс анаэробной конверсии органических веществ в метан лимитируется либо скоростью гидролитического расщепления биополимеров (если таковые содержатся в перерабатываемом сырье в большом количестве), либо скоростью трансформации ацетата в метан. Последнее обстоятельство связано с низкими скоростями роста и размножения метаногенных бактерий. Например, время генерации (удвоение биомассы) бактерий рода *Methanosarcina* составляет 20–30 ч, рода *Methanothrix* – 200–300 ч. Для сравнения укажем, что при 35°C время удвоения биомассы гидролитических микроорганизмов составляет 10–20 ч, кислотогенов – 1–10 ч, синтрофных (ацетогенных) бактерий – около 100 ч, водородиспользующих метаногенов – 15–100 ч.

Общая скорость биометаногенеза определяется температурой процесса, химическим составом сырья, плотностью бактериальной ассоциации, степенью гомогенизации ферментационной среды.

Термофильный процесс (40–55°C) протекает в 2–3 раза быстрее, чем мезофильный (20–40°C). При температуре ниже 20°C активность анаэробной биомассы значительно уменьшается. Чаще всего скорость

поступления сырья в метантенк, функционирующий в проточном режиме, составляет 7–20% от рабочего объема аппарата в сутки (удельная скорость протока 0,07–0,20 сут<sup>-1</sup>). При наличии в ферментационной среде только растворенных соединений скорость биометаногенеза выше, чем в средах, содержащих твердые органические включения.

Экономически целесообразно разделение процесса на две стадии (фазы): кислотную (рН 6,0–6,5) и метановую (рН 6,5–8,0), – осуществляемые в двух последовательно соединенных аппаратах. Это технологическое решение требует увеличения капитальных вложений, но за счет пространственной сукцессии микроорганизмов общая скорость метанового сбраживания субстрата возрастает примерно в 1,5 раза.

С каждой тонны сброженного сухого органического вещества образуется 300–600 н. м<sup>3</sup> биогаза. Чем больше содержится в перерабатываемом сырье восстановленных органических соединений, тем выше концентрация метана в биогазе. В частности, при анаэробном сбраживании углеводов образуется больше диоксида углерода (выход метана составляет 0,42–0,47 м<sup>3</sup>/кг), жиры в этих условиях расщепляются с образованием преимущественно метана (до 1 м<sup>3</sup>/кг).

## **3.2. Факторы, влияющие на процесс анаэробной очистки стоков**

Особенность анаэробной деструкции загрязнений сточных вод состоит в том, что 80–90% органического вещества, разлагаемого метаногенным консорциумом, превращается в биогаз. Чем больше выход биогаза, тем выше степень очистки стока.

Остановимся на важнейших факторах, влияющих на эффективность функционирования анаэробных биореакторов.

**3.2.1. Состав и концентрация загрязнений.** Многообразие состава метаногенного биоценоза позволяет при определенных условиях осуществить очистку практически любого вида стоков, содержащих органические загрязнения, но скорость и глубина этого процесса будут определяться химической природой загрязнений и их фазовым состоянием. Наиболее благоприятны для очистки стоки, содержащие растворенные загрязнения. Присутствие взвешенных веществ в высокой концентрации отрицательно влияет на работу биореакторов второго поко-

ления, имеющих различные устройства для удержания биомассы в реакционной зоне в виде биопленки, флокул, гранул.

Взвешенные вещества могут забивать насадку, предназначенную для закрепления микроорганизмов, абразивно воздействовать на биопленку, способствовать вытеснению из реакционной зоны биореактора флокул активной биомассы.

Классификация сточных вод по уровню загрязненности для анаэробного метода очистки сильно отличается от общепринятой для аэробных биосистем. Применительно к анаэробным биореакторам второго поколения сточные воды относят к низкоконцентрированным при величине показателя ХПК 1000–5000 мг/дм<sup>3</sup>, к концентрированным – при ХПК 5000–20 000 мг/дм<sup>3</sup>, к высококонцентрированным – при ХПК более 20 000 мг/дм<sup>3</sup>. Считают, что минимальная концентрация загрязнений в сточной воде, при которой целесообразна анаэробная очистка, составляет по показателю БПК 500 мг/дм<sup>3</sup>, хотя уже разрабатываются технологии анаэробной очистки городских стоков с загрязненностью по БПК около 300 мг/дм<sup>3</sup>. Предельная величина загрязненности стока зависит от конструкции биореактора и варьирует от 10 000 до 15 000 мг/дм<sup>3</sup> по ХПК.

**3.2.2. Величина pH сточной воды и температура процесса.** Метаногенез возможен при pH ферментационной среды 6–8. В условиях стабильного функционирования биореактора анаэробная биосистема способна к саморегулированию pH среды в оптимальных пределах за счет сбалансированных процессов образования подкисляющих и подщелачивающих метаболитов. Подкисление среды происходит преимущественно образующимися летучими жирными кислотами (ЛЖК), а подщелачивание – в результате потребления ЛЖК и образования ионов аммония при дезаминировании азотсодержащих соединений.

Основной причиной нарушения баланса между образованием и потреблением ЛЖК чаще всего является перегрузка реактора по загрязнениям, что приводит к сдвигу pH среды в кислую область. Длительное (более 3-х суток) сохранение pH среды в биореакторе на уровне  $\leq 5$  приводит к долговременной дестабилизации биосистемы. Повышение pH среды в реакционной зоне  $> 9$  полностью затормаживает метаногенез, но процесс быстро возобновляется при восстановлении оптимальной величины pH.

В связи с приведенными выше особенностями анаэробного процесса важное значение имеет буферная емкость ферментационной

среды, которая в естественных условиях метаногенеза создается прежде всего угольной кислотой, ЛЖК и ионами аммония. Чем больше буферная емкость среды в биореакторе, тем устойчивее биосистема к изменениям pH.

Повышение температуры увеличивает скорость биохимических процессов, в связи с чем термофильный режим (50–55°C) функционирования биореакторов является наиболее производительным. Однако получаемый эффект от интенсификации процесса, как правило, не компенсирует затраты на поддержание требуемой температуры в биореакторе. Кроме того, формирующийся в термофильных условиях метаногенный биоценоз отличается значительно меньшим видовым разнообразием и в ряде случаев при очистке стоков с широким спектром загрязнений этот фактор нивелирует положительный эффект от повышения температуры процесса. Поэтому большинство анаэробных биореакторов функционируют в мезофильном режиме (30–40°C), при котором выгодно сочетаются достаточно высокая скорость деструкции загрязнений и небольшие затраты энергии на стабилизацию температурного режима. При температуре ферментационной среды в биореакторе ниже 20°C скорость биохимических превращений значительно снижается, тем не менее в настоящее время уже разрабатываются анаэробные технологии очистки сточной воды в психрофильном режиме (10–20°C).

**3.2.3. Наличие в сточной воде биогенных элементов, ингибиторов и токсичных веществ.** Как уже отмечалось, анаэробный биоценоз вследствие низкого прироста биомассы менее требователен к содержанию в реакционной среде биогенных элементов, чем аэробный активный ил. Если для аэробного процесса необходимые количества азота и фосфора определяются соотношением БПК : N : P = 100 : 5 : 1, то при анаэробной очистке достаточно количества этих элементов в пропорции 100 : 1 : 0,2.

Имеет значение соотношение C : N, оптимальная величина которого колеблется по различным данным от 20 : 1 до 100 : 1. При большей доле азота в сточной воде наблюдается ингибирование метаногенеза высокой концентрацией образующегося аммиака, который присутствует в реакционной среде в двух находящихся в равновесии формах: в виде растворенного аммиака и иона аммония. Более токсичным является растворенный аммиак, при концентрации которого 50 мг/дм<sup>3</sup> скорость биохимических превращений уменьшается в 2 раза. Кроме

аммиака, ингибирующим действием при высокой концентрации обладают собственные интермедиаты метаногенеза – ЛЖК и водород, а также побочный продукт – сероводород. Ингибирующий эффект ЛЖК проявляется при концентрации 2000 мг/дм<sup>3</sup>, причем большей токсичностью обладают не анионы кислот, а недиссоциированные молекулы, которые легче проникают через клеточную стенку микроорганизмов. Наиболее токсична и труднорастворима из ЛЖК – пропионовая кислота.

Если pH реакционной среды >7, то концентрация недиссоциированных молекул ЛЖК низкая и ингибирование маловероятно.

Сильным ингибитором является водород. При нарушении баланса в образовании и потреблении водорода и достижении концентрации его в газовой фазе 0,2–0,5% метаногенез затормаживается. Присутствие в сточной воде соединений серы приводит к развитию сульфатвосстанавливающих бактерий, продуцирующих сероводород, который распределяется между газовой и жидкой фазами. Токсичностью обладает растворенный сероводород при концентрации свыше 200 мг/дм<sup>3</sup>. Продукт его диссоциации – сульфид-ион – не токсичен. В процессе метаногенеза часть растворенного сероводорода взаимодействует с тяжелыми металлами с образованием нерастворимых в воде сульфидов, что способствует предотвращению ингибирования.

К числу потенциально токсичных соединений относятся также тяжелые металлы, антибиотики, галогенсодержащие органические соединения и другие ксенобиотики. В то же время установлено, что микроорганизмы метанового биоценоза обладают достаточно высокими адаптационными способностями и проблема ингибирования биометаногенеза не так серьезна, как предполагали раньше.

### **3.3. Кинетические закономерности функционирования анаэробных биореакторов**

Сложность и многообразие протекающих при метановом сбраживании процессов сильно затрудняет математическое моделирование биореакторов. Разработанные к настоящему времени модели применимы в определенных границах и описывают функционирование биореакторов второго поколения с различной степенью адекватности. Они непрерывно совершенствуются и имеют своей целью прогнозирование, управление и интенсификацию процесса.

В практике проектирования анаэробных установок пользуются упрощенными эмпирическими моделями на основе теории хемостата.

Если не учитывать сложность составов как загрязнений сточной воды, так и метанового биоценоза, то для описания кинетики процесса в проточном биореакторе с идеальным перемешиванием можно использовать уравнения хемостатной культуры:

$$\frac{dX}{d\tau} = \frac{\mu_{\max} S_1}{K_s + S_1} X - bX - \frac{X_1 G}{v}, \quad (1)$$

$$\frac{dS_1}{d\tau} = \frac{(S_0 - S_1)G}{v} - \frac{\mu_{\max} S_1}{K_s + S_1} \frac{X}{Y}, \quad (2)$$

где  $X, X_1$  – концентрация биомассы в биореакторе и в очищенной сточной воде на выходе из биореактора соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{\max}$  – максимальная удельная скорость роста биомассы, сут<sup>-1</sup>;  $K_s$  – константа, численно равная концентрации биомассы, при которой  $\mu = 0,5 \mu_{\max}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $b$  – удельная скорость отмирания биомассы, сут<sup>-1</sup>;  $S_0, S_1$  – концентрация загрязнений в исходной и очищенной сточной воде соответственно, кг ХПК/м<sup>3</sup>;  $G$  – скорость протока сточной воды, м<sup>3</sup>/сут;  $v$  – рабочий объем биореактора, м<sup>3</sup>;  $Y$  – экономический коэффициент (выход биомассы от деструктированных загрязнений), кг/кг ХПК.

Удельная скорость роста биомассы  $\mu$  зависит от концентрации субстрата  $S$  по уравнению Моно:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S}. \quad (3)$$

В установившемся режиме функционирования биореактора имеем:

$$\frac{dX}{d\tau} = \mu X - bX - \frac{X_1 G}{v} = 0. \quad (4)$$

Следует отметить, что для биореактора, не удерживающего биомассу активного ила,  $X = X_1$ .

Отношение  $\frac{G}{v} = D$  представляет собой удельную скорость разбавления ферментационной среды в биореакторе, сут<sup>-1</sup>. Этот параметр часто выражают в виде процентной суточной дозы загрузки биореактора:

$$D_{\%} = 100 \frac{G}{v}.$$

После преобразования уравнения (4) получим:

$$\mu = \frac{X_1 G}{vX} + b,$$

т. е. «чистая» удельная скорость прироста биомассы равна:

$$\mu_0 = \frac{X_1 G}{vX}. \quad (5)$$

Отсюда возраст биомассы

$$\tau_6 = \frac{1}{\mu_0} = \frac{vX}{X_1 G} = \frac{\tau_p X}{X_1}, \quad (6)$$

где  $\tau_p = \frac{1}{D}$  – время пребывания сточной воды в биореакторе, сут.

Из уравнения (6) следует, что  $\tau_6 = \frac{\tau_p}{f}$ , где  $f = \frac{X_1}{X}$  называют коэффициентом выноса биомассы.

Для биореакторов первого поколения (метантенков со свободными клетками микроорганизмов)  $X = X_1, f = 1$ , а следовательно,

$$\tau_6 = \tau_p = \frac{1}{\mu_0}.$$

Это означает, что проток сточной воды не может быть больше величины максимальной «чистой» удельной скорости роста метаногенного биоценоза и на практике соответствует времени пребывания стока в метантенке, функционирующем в мезофильном режиме, 10–15 сут.

Для биореакторов второго поколения величина коэффициента выноса биомассы значительно меньше единицы и составляет 0,005–0,1, что обеспечивает возможность устойчивой работы биореактора при гидравлической нагрузке, в 10–200 раз превышающей значение удельной скорости роста биомассы, что соответствует времени пребывания сточной воды в аппарате 0,5–10 ч.

В стационарном режиме работы биореактора из уравнения (2) следует:

$$\frac{\mu_{\max} S_1}{K_s + S_1} \frac{X}{Y} = \frac{(S_0 - S_1)G}{v} = g,$$

где  $g$  – удельная производительность биореактора по разрушаемым загрязнениям, кг ХПК/(м<sup>3</sup> · сут).

Удельный выход метана (на единицу объема жидкой среды в аппарате) связан с удельной производительностью через коэффициент выхода метана из единицы массы деструктурированных загрязнений:

$$g_m = g y_m,$$

где  $g_m$  – удельный выход метана,  $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ ;  $y_m$  – выход метана,  $\text{м}^3/\text{кг}$  ХПК.

Приведенные уравнения справедливы как для кислотогенной и метаногенной стадий в отдельности, так и для процесса анаэробной очистки в целом (табл. 6).

Таблица 6

**Кинетические параметры роста анаэробных микроорганизмов**

Группа микроорганизмов	$\mu_{\text{max}}$ , $\text{сут}^{-1}$	$Y$ , $\text{кг}/\text{кг}$ ХПК	$K_{\text{is}}$ , $\text{кг}$ ХПК/ $\text{м}^3$	$b$ , $\text{сут}^{-1}$
Кислотогенные бактерии	2,0	0,15	0,20	0,40
Метаногенные бактерии	0,1–0,4	0,03	0,05	0,02
Анаэробный консорциум в целом	0,1–0,4	0,04–0,08	–	0,03

### 3.4. Конструкции современных анаэробных биореакторов

Типичным представителем анаэробных биореакторов первого поколения является метантенк, который широко применяется и в настоящее время в производстве биогаза сбраживанием сельскохозяйственных отходов и осадков сточных вод (см. гл. 13). Анаэробные биореакторы второго поколения принципиально отличаются тем, что их конструкция предусматривает удержание биомассы метанового биоценоза в реакционном пространстве путем использования разнообразных инженерно-технических решений.

Концентрация микроорганизмов в реакционном объеме является важнейшим фактором, определяющим производительность анаэробного биореактора и продолжительность обработки стоков. В биореакторах второго поколения низкая удельная метаболическая активность метанового биоценоза компенсирована высокой концентрацией биомассы в аппарате. В современных анаэробных биореакторах концентрация активного ила по сухой массе достигает  $100 \text{ кг}/\text{м}^3$  и более (для

сравнения в аэротенках – 2–4 кг/м<sup>3</sup>). Такая высокая концентрация ила недостижима в аэробных сооружениях из-за лимитации роста и размножения микроорганизмов кислородом.

Разработаны различные *методы* удержания биомассы микроорганизмов в реакционном объеме биореактора:

1) формирование биопленки на поверхности частиц носителя (подвижных (псевдооживленных) или неподвижных);

2) удержание флокул биомассы в пустотах неподвижного загрузочного материала;

3) ультрафильтрация выводимой из аппарата жидкости через синтетические мембраны;

4) применение газоилоотделительных устройств, обеспечивающих формирование в аппарате агрегатов клеток (компактных флокул и гранул) с высокой седиментационной способностью.

В начале 80-х гг. XX в. зарубежными учеными был разработан ряд конструкций высокопроизводительных анаэробных биореакторов. К настоящему времени в Западной Европе сотни таких аппаратов успешно функционируют в составе промышленных установок для очистки стоков различных производств.

Распространенными *типами* анаэробных биореакторов являются:

– биореакторы с прикрепленной биомассой – анаэробные биофильтры с неподвижным слоем загрузки, биореакторы с псевдооживленным слоем носителя;

– биореакторы с гранулированной биомассой активного ила;

– комбинированные биореакторы.

В качестве загрузки (носителя) для закрепления биопленки и улавливания флокул активного ила используют самые разнообразные материалы: пластмассовые и керамические элементы (гофрированные или гладкие кольца, трубы, листы), пенополиуретан, «Ерши» и «Вии» из стекловолокна или синтетических нитей, гранулы из вспененных композиционных материалов, синтетические ткани и нетканые материалы, активированный уголь, специальные носители из обожженного пористого стекла (материал SIRAN) и т. д.

В настоящее время в развитых странах уделяется большое внимание разработке и производству специальных видов носителей для закрепления (иммобилизации) микроорганизмов.

Рассмотрим конструкции основных типов анаэробных биореакторов.

**3.4.1. Анаэробный биофильтр с восходящим потоком жидкости.** Является наиболее простым анаэробным реактором с прикрепленной биомассой микроорганизмов. Имеет неподвижный слой загрузки, через который восходящим потоком проходит очищаемая сточная вода (рис. 8). Биомасса анаэробного активного ила удерживается в виде флокул в пустотах загрузочного материала и биопленки на его поверхности. Основную роль в очистке сточной воды выполняют флокулы. Поэтому определяющим фактором является не адгезионная способность материала загрузки, а удельный объем пустот в загрузке и их способность задерживать флокулы биомассы. Большая пустотность загрузки (90–95%) обуславливает низкую скорость движения жидкости через материал, что способствует удержанию флокул в пустотах. Большая часть биомассы скапливается в нижних слоях загрузки. Гидравлический режим в аппарате близок к режиму идеального вытеснения, что приводит к формированию значительных градиентов концентраций биомассы, загрязнений и продуктов метаболизма (ЛЖК) по высоте биореактора.

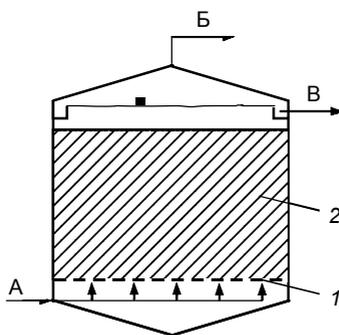


Рис. 8. Анаэробный биофильтр:

1 – поддерживающая решетка; 2 – слой засыпного загрузочного материала;  
А – исходная сточная вода; Б – биогаз; В – очищенная сточная вода

При высоком содержании в очищаемой сточной воде трудно-разлагаемых взвешенных веществ возможно заиливание (кольматация) загрузки в нижней части биореактора с образованием каналов, по которым проходит большая часть сточной воды, минуя основной слой загрузки с активной биомассой. В результате снижается

эффективность очистки стоков. Для предотвращения каналообразования в конструкции биофильтров предусматривают равномерное распределение подаваемой на очистку сточной воды по сечению аппарата. Вероятность заиливания резко уменьшается, если в нижней части биореактора располагают вертикально ориентированную загрузку (например, в виде труб или плоских элементов), а в верхней – засыпной загрузочный материал (например, из гофрированных колец).

Анаэробные биофильтры могут работать при достаточно высоких нагрузках по загрязнению ( $7\text{--}12$  кг ХПК/ $(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ ), они устойчивы к колебаниям величины рН и температуры сточной воды, гидравлическим и органическим перегрузкам, перерывам в подаче субстрата.

**3.4.2. Биореактор с нисходящим потоком жидкости.** Отличается от анаэробного биофильтра тем, что сточная вода подается в верхнюю часть аппарата и нисходящим потоком проходит через слой загрузочного материала (рис. 9). Развивающийся в аппарате метановый биоценоз сосредоточен главным образом в биопленке, формирующейся на поверхности загрузки. Взвешенная биомасса в пустотах загрузки представлена преимущественно быстрорастущими гидролитическими и кислотогенными микроорганизмами. Для закрепления медленно растущих метановых бактерий в биопленке очень важны поверхностные (адгезионные) свойства материала загрузки. Толщина биопленки составляет 1–4 мм, в ней сосредоточено до 90% активной биомассы реактора. Производительность биореактора находится в прямой пропорциональной зависимости от удельной поверхности загрузочного материала, в качестве которого считают наиболее целесообразным использование мягкой плоскостной загрузки, например нетканых материалов из синтетических нитей.

Встречные потоки очищаемой воды и пузырьков биогаза создают в реакторе режим, близкий к полному перемешиванию, что значительно повышает устойчивость аппарата к заиливанию. Чрезмерный рост биопленки контролируется абразивным действием взвешенных веществ сточной воды и потоком пузырьков биогаза. В отличие от анаэробного биофильтра нет необходимости в тщательном распределении сточной воды в аппарате.

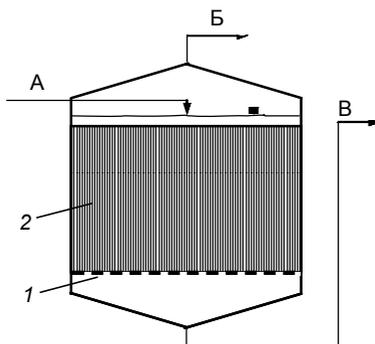


Рис. 9. Биореактор с нисходящим потоком сточной воды:  
 1 – поддерживающая решетка; 2 – слой вертикально ориентированного  
 загрузочного материала; А – исходная сточная вода; Б – биогаз;  
 В – очищенная сточная вода

Биореакторы с нисходящим потоком жидкости наиболее эффективны при очистке сильно загрязненных сточных вод (ХПК более  $5\text{--}10\text{ г/дм}^3$ ) с высоким содержанием взвешенных веществ. К недостаткам биореакторов следует отнести относительно невысокое количество удерживаемой биомассы ( $3\text{--}15\text{ кг/м}^3$ ) из-за малой доли флокул и длительный период запуска, связанный с формированием на поверхности загрузочного материала биопленки. Особенно медленно происходит колонизация гладких поверхностей пластмассовых элементов загрузки.

В промышленных установках для очистки сточной воды удельная производительность биореакторов с нисходящим потоком по деструктируемому загрязнению колеблется в пределах  $7\text{--}10\text{ кг ХПК}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ .

### 3.4.3. Биореактор с гранулированной биомассой активного ила.

В начале 80-х гг. XX в. голландский ученый G. Lettinga установил, что микроорганизмы метанового биоценоза в процессе очистки сточной воды способны к агрегированию с образованием плотных легкооседающих гранул размером  $1\text{--}4\text{ мм}$ . Явление самопроизвольного гранулообразования было положено в основу конструкции нового типа биореактора, которому G. Lettinga дал название Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB-реактор) – реактор с восходящим потоком сточной воды через слой анаэробного ила. Биореактор отличается от предыдущих типов тем, что не имеет загрузки. Удержание активного ила

производится за счет встроенного в верхней части аппарата газоилоотделительного устройства, обеспечивающего в процессе эксплуатации биореактора формирование флокулированного и гранулированного ила с высокой седиментационной способностью.

UASB-процесс оказался настолько эффективным, что к настоящему времени эксплуатируется более 500 UASB-реакторов в составе промышленных установок по очистке сточных вод предприятий пищевой, фармацевтической, спиртовой, целлюлозно-бумажной, химической и других отраслей промышленности. В странах с теплым климатом (Индия, Португалия, Колумбия) UASB-реакторы успешно применяют для очистки коммунальных сточных вод.

В гранулах активного ила диффузионные расстояния минимальны и наиболее благоприятны для транспорта промежуточных продуктов разложения органического вещества. Исследователи считают, что агрегация выгодна прежде всего для межвидового переноса основного регулятора метаногенной системы – водорода – между кислотогенными, ацетогенными и метановыми бактериями. Компактное расположение бактерий в гранулированной биомассе благоприятствует эффективному массопереносу и увеличивает скорость анаэробной деструкции загрязнений. Метаногенная активность гранулированного ила выше, чем у флокулированного и значительно превышает активность дисперсной биомассы.

Агрегирование метаногенного биоценоза является уникальным явлением спонтанного формирования микроэкосистемы и играет исключительно важную роль в интенсификации процесса очистки стоков.

Гранулы могут иметь разнообразную форму: сферическую, дискообразную, округлую или неправильную. Плотность их колеблется в пределах 1040–1080 кг/м<sup>3</sup>. В составе гранул присутствуют представители всех групп бактерий метанового ценоза – кислотогенов, синтрофов, метаногенов, сульфатредукторов. Электронно-микроскопические исследования показали, что в микробной массе гранул преобладают нитчатые бактерии рода *Methanothrix*, которые, как считает большинство исследователей, играют решающую роль в формировании гранул. Между нитями метанотрикса в виде микроколоний и в свободной форме располагается большое количество морфологически разнообразных форм бактерий. Значительная часть микроколоний представлена ассоциацией синтрофных бактерий (*Syntrophomonas*, *Syntrobacter*) и водородиспользующих метаногенов (*Methanobacter*, *Methanobrevibacter*). Формирующиеся

в производственных стоках гранулы активного ила имеют, как правило, черную окраску, обусловленную адгезией на нитях метанотрикса сульфата железа, который, как предполагают, принимает участие в инициации процесса гранулообразования и стабилизации агрегатов.

У исследователей нет однозначного мнения о роли внеклеточных полимеров в процессе агрегирования, хотя их присутствие в матрице гранул хорошо просматривается на электронно-микроскопических снимках. Содержание экзополимеров полисахаридной природы в гранулированном иле составляет обычно 2–5% от сухой массы. Большинство исследователей признают определяющую роль экзополимеров в образовании матрицы для удержания клеток бактерий и придания стабильности формирующимся агрегатам.

На процесс образования гранулированной биомассы в биореакторе влияет ряд факторов: наличие центров, инициирующих гранулообразование, состав сточной воды, температура и величина pH ферментационной среды, концентрация в среде двухвалентных катионов, гидродинамический режим в аппарате.

В результате многочисленных исследований предложено несколько гипотез относительно механизма инициации и образования гранул анаэробного ила. Считается общепризнанным, что центрами инициации гранулообразования являются присутствующие в сточной воде частицы органических и неорганических материалов и мелкие, но плотные бактериальные агрегаты, а доминирующим микроорганизмом в гранулах является метанотрикс. Отрицательно влияют на качество гранулированного ила взвешенные частицы с волокнистой структурой, которые ухудшают седиментационные свойства ила и даже вызывают его всплывание.

Способствует образованию гранул присутствие в сточной воде катионов кальция, формирующих сильные связи с анионными группами органической матрицы через так называемые «кальциевые мостики». Установлено, что оптимальные концентрации ионов кальция для получения высококачественного гранулированного ила находятся в диапазоне 150–450 мг/дм<sup>3</sup>.

Процесс гранулирования активного ила ускоряется, если сточная вода содержит углеводы и летучие жирные кислоты.

Разработанные зарубежными фирмами многочисленные модификации UASB-реактора различаются конструкцией газоилоотделительного устройства, выполняющего функции сепаратора трехфазной сме-

си: жидкости, частиц ила и биогаза. В простейшем варианте это устройство представляет собой перегородки конусной формы, перекрывающие собой все сечение аппарата и разделяющие его по высоте на зоны сбраживания и отстаивания (рис. 10). Вверху направляющие перегородки образуют газосборные колпаки. Вход очищаемой сточной воды в зону отстаивания прикрывают перегородки-дефлекторы. Хлопья активного ила, транспортируемые потоком пузырьков образовавшегося биогаза или облегченные неотделившимися пузырьками, поднимаются вертикально вверх и контактируют с поверхностью направляющей перегородки. Пузырьки биогаза отделяются, биогаз скапливается в колпаках, а отяжелевшие хлопья ила опускаются вниз. В результате многократной циркуляции хлопья уплотняются и формируются гранулы, которые образуют в нижней части реактора плотный слой активного ила с концентрацией сухого вещества 50–100 кг/м<sup>3</sup>.

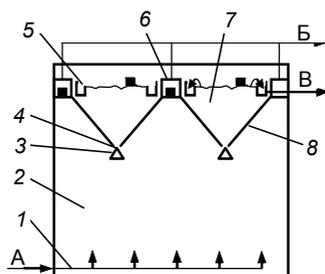


Рис. 10. UASB-реактор:

- 1 – распределительная система; 2 – зона сбраживания; 3 – дефлектор;  
 4 – щель (вход в отстаивающую зону); 5 – водосборный лоток; 6 – газосборный короб;  
 7 – отстаивающая зона; 8 – газонаправляющая перегородка;  
 А – исходная сточная вода; В – биогаз; В – очищенная сточная вода

Сточная вода через щели между конусом и дефлектором поступает в зону отстаивания, образованную наружными поверхностями конических перегородок. Коническое расширение зоны отстаивания уменьшает скорость восходящего потока сточной воды, частицы унесенной биомассы активного ила седиментируют и через щель над дефлектором возвращаются в зону активного сбраживания, в которой создается высокая концентрация гранулированной биомассы. Удельная производительность UASB-реакторов достигает 30 кг ХПК/(м<sup>3</sup> · сут).

UASB-реакторы просты по конструкции, высокопроизводительны, но имеют один серьезный недостаток: продолжительность периода формирования в реакционном объеме гранулированного активного ила в достаточно высокой концентрации составляет 5–7 мес. Ускорить запуск биореактора (достижение расчетной производительности) можно внесением в ферментационную среду частиц инертного материала (например, угольной пыли), инициирующих образование гранул, или инокулированием гранулированным активным илом из другого анаэробного биореактора. В последнем случае продолжительность периода запуска UASB-реактора сокращается до двух недель.

**3.4.4. Комбинированный (гибридный) биореактор.** Аппарат состоит из двух частей: верхняя часть (25–40% от общего объема) заполнена загрузкой и функционирует как анаэробный биофильтр, а нижняя, не заполненная загрузочным материалом, представляет собой UASB-зону. Биореактор можно рассматривать как анаэробный биофильтр с «укороченным» слоем загрузки или как UASB-реактор с газоилоотделительным устройством в виде загрузочного материала (рис. 11). Опыт эксплуатации гибридных биореакторов показал, что сильного обрастания загрузочного материала биопленкой не наблюдается, концентрация биомассы в загрузочном слое составляет 2–6 кг/м<sup>3</sup>. Основная функция загрузочного материала – удержание в пустотах флоккул биомассы, поднятых вверх пузырьками биогаза.

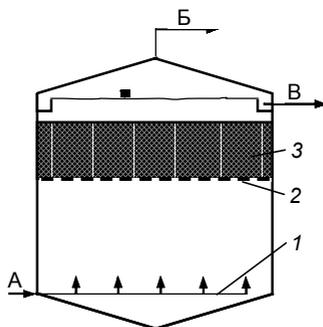


Рис. 11. Гибридный биореактор:  
 1 – распределительная система; 2 – поддерживающая решетка;  
 3 – слой загрузочного материала;  
 А – исходная сточная вода; Б – биогаз; В – очищенная сточная вода

По сравнению с анаэробными биофильтрами в гибридных биореакторах экономится 60–75% дорогостоящего загрузочного материала, исключается заиливание загрузки. Период запуска гибридного биореактора менее продолжительный, чем для UASB-реактора. Указанные достоинства и опыт эксплуатации свидетельствуют о больших перспективах для биореакторов комбинированного типа.

**3.4.5. Биореактор с псевдооживленным слоем носителя.** Среди современных систем анаэробной очистки стоков биореактор с псевдооживленным слоем носителя биопленки является наиболее производительным. Биореакторы такого типа (рис. 12) в настоящее время успешно применяются во всех видах биологической очистки воды – аэробная и анаэробная очистка, нитрификация и денитрификация, глубокая доочистка сточных и природных вод.

Псевдооживляющим агентом может быть жидкость, газ или газожидкостная смесь. В анаэробных процессах оживление частиц носителя осуществляют, как правило, восходящим потоком циркулирующей в замкнутом контуре очищаемой воды. Некоторый (небольшой) вклад в оживление вносит также образующийся биогаз. В принципе возможно псевдооживление в результате рециркуляции биогаза.

В биореакторе носитель может находиться в состоянии псевдооживления (свободное витание частиц в объеме слоя) или в виде расширенного слоя (колебательное движение частиц). В качестве носителя исследованы различные материалы, но на практике получил распространение кварцевый песок с размером частиц 0,2–0,3 мм. Частицы меньшего диаметра вымываются из аппарата, а оживление слоя из крупных частиц песка требует больших энергозатрат. Линейная скорость восходящего потока сточной воды для создания расширенного слоя носителя составляет 2–10 м/ч.

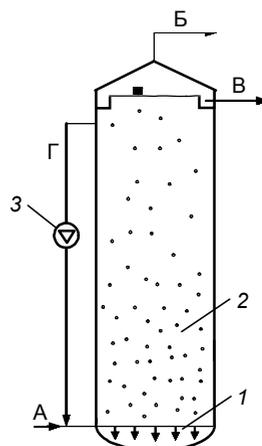


Рис. 12. Биореактор с псевдооживленным слоем частиц носителя:  
 1 – распределительная система; 2 – слой частиц носителя; 3 – насос;  
 А – исходная сточная вода;  
 Б – биогаз; В – очищенная сточная вода; Г – рециркуляция сточной воды

Таблица 7

Важнейшие параметры и качественная оценка функциональных характеристик анаэробных биореакторов

Параметр	Тип реактора				
	Анаэробный биофильтр	Биореактор с нисходящим потоком сточной воды	UASB-реактор	Гибридный реактор	Биореактор с псевдоожиженным слоем носителя
1. Средняя концентрация биомассы в реакторе, кг/м <sup>3</sup>	5–20	3–15	20–40	20–30	10–40
2. Нижний предел загрязненности стока, кг ХПК/м <sup>3</sup>	0,3	1–2	0,3	0,3	0,3
3. Максимальная производительность, кг ХПК/(м <sup>3</sup> · сут)	10–15	10–12	15–25	15–25	30–40
4. Минимальное время обработки сточной воды, ч	8–12	24	2–3	2–3	0,5
5. Устойчивость к перегрузкам по загрязнениям	Высокая	Очень высокая	Удовлетворительная	Высокая	Очень высокая
6. Устойчивость к содержанию взвешенных веществ	Низкая	Высокая	Высокая	Удовлетворительная	Удовлетворительная
7. Устойчивость к токсичности сточной воды	Высокая	Высокая			Очень высокая

Режим псевдооживления требует значительно большей скорости – 6–35 м/ч. На частицах носителя формируется биопленка толщиной 0,06–0,20 мм, что позволяет поддерживать в биореакторе высокую концентрацию биомассы – 20–40 кг/м<sup>3</sup>.

Небольшая толщина биопленки и витание частиц носителя в жидкой среде способствует интенсивному массообмену, следствием чего является высокая активность биопленки. Движение жидкости и контакт между частицами приводят к удалению отмершей биомассы и постоянному обновлению биопленки. Чрезмерное увеличение толщины биопленки снижает плотность частиц и повышает вероятность вымывания их из аппарата. Для эффективного удержания частиц носителя в реакторе предусматривают расширение его верхней части и размещение газоилоотделительных устройств, аналогичных применяемым в UASB-реакторах.

Несмотря на высокую производительность, биореакторы с псевдооживленным слоем в составе промышленных установок используются гораздо реже, чем, например, UASB-реакторы, что объясняется сложностью создания экономичной системы распределения и рециркуляции сточной воды в аппарате, повышенными эксплуатационными затратами.

В зависимости от характеристик сточной воды и местных условий любой из рассмотренных типов анаэробных биореакторов может оказаться наиболее пригодным. Сравнительная характеристика биореакторов приведена в табл. 7.

### **3.5. Технологические особенности анаэробных методов очистки сточных вод**

Как было указано ранее, анаэробный метод применим для предварительной очистки сточных вод на локальных очистных сооружениях с последующим сбросом сточной воды в коммунальную канализационную систему либо как первая ступень глубокой анаэробно-аэробной очистки в составе комплекса очистных сооружений.

Многие предприятия в Республике Беларусь не располагают собственными очистными сооружениями и сбрасывают сточные воды в городскую канализационную сеть. В последние годы все в большей степени ужесточаются требования к уровню загрязненности сточных

вод, принимаемых на очистку городскими очистными станциями, и возникла потребность в компактных, малоэнергозатратных и малоотходных установках для предварительной очистки стоков непосредственно на территории предприятий. Этим условиям в полной мере отвечают современные анаэробные технологии. В ряде случаев целесообразно разделение сточных вод предприятия с выделением и локальной очисткой наиболее загрязненного стока.

Существующая инфраструктура предприятия (наличие котельной, реагентного хозяйства, горячей оборотной воды) значительно упрощает решение задачи кондиционирования сточной воды по pH, температуре и эффективного использования образующегося биогаза.

На рис. 13 приведена одна из наиболее сложных схем локальной очистки производственного стока, которая, помимо основного процесса анаэробной деструкции загрязнений в биореакторе, включает предварительную подготовку сточной воды, очистку биогаза от сероводорода, удаление сульфидов из биологически очищенной сточной воды и обезвоживание образующихся осадков. Необходимость в каждой из перечисленных технологических операций определяется характеристиками сточной воды и конкретными местными условиями.

Предварительная обработка стока может заключаться в удалении грубодисперсных и минеральных примесей, усреднении расхода и уровня загрязненности, отстаивании, нейтрализации, обогащении биогенными элементами, подогреве, частичной преацидификации (выдержке в кислотогенной фазе) или физико-химической обработке. Практический опыт свидетельствует о необходимости удаления грубодисперсных примесей при очистке сточных вод свеклосахарных, картофель- и овощеперерабатывающих заводов, мясокомбинатов, заводов по производству пива.

Усреднение стока является обязательной операцией для производств с периодической промывкой оборудования, значительными колебаниями расхода, концентрации загрязнений и величины pH. Усреднитель одновременно может выполнять функции отстойника, емкости для преацидификации и нейтрализации сточной воды. Как правило, при нейтрализации требуется подщелачивание стоков до оптимальной величины pH (6,5–7,5), значительно реже сточная вода нуждается в подкислении. В качестве нейтрализующих агентов используют NaOH, NH<sub>4</sub>OH, Ca(OH)<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Наиболее дешевым реагентом является гидроксид кальция, но применение его в большой дозе приводит к накоплению нерастворимого карбоната кальция в иле и снижению его активности.

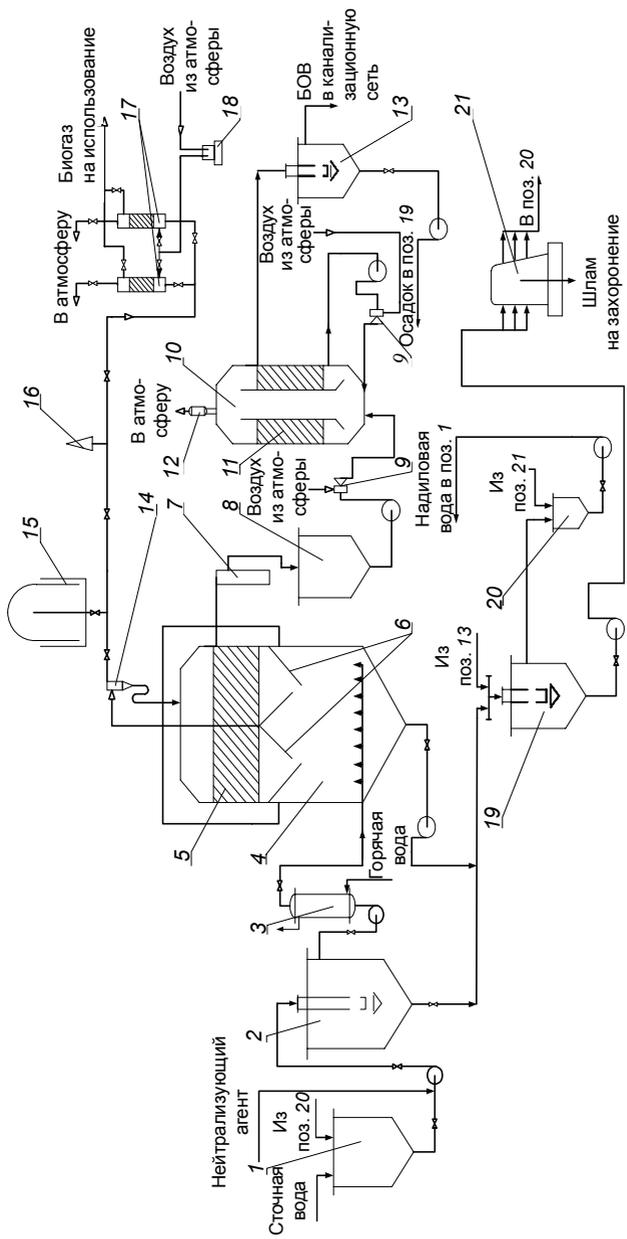


Рис. 13. Технологическая схема предварительной анаэробной очистки сточной воды:  
 1 – приемник сточных вод; 2, 13 – вертикальные отстойники; 3 – подогреватель; 4 – комбинированный анаэробный биореактор;  
 5 – фиксированная насадка; 6 – газоотделительное устройство; 7 – гидрозатвор; 8 – приемник биологически очищенной сточной  
 воды; 9 – аэратор эжекторного типа; 10 – биореактор для удаления растворенного сероводорода из воды; 11 – волоконная загрузка;  
 12 – каплеотделитель сечетчатый; 14 – циклон-каплеотделитель; 15 – газодельтер; 16 – предохранительная «свеча»; 17 – установка  
 для десульфуризации биогаза; 18 – нагнетатель воздуха; 19 – илоуплотнитель; 20 – сборник надливовой воды; 21 – фильтр-пресс

При нейтрализации сточной воды следует учитывать не только величину рН, но и содержание органических соединений азота, которые разлагаются в биореакторе с образованием аммиака, эффективно подщелачивающего среду. Высокое содержание органического азота (больше 500 мг/дм<sup>3</sup>) позволяет осуществлять очистку кислых (рН не ниже 3,5) стоков без подщелачивания реагентами, только за счет рециркуляции очищенной воды.

В настоящее время накоплен значительный положительный опыт анаэробной очистки низкоконцентрированных сточных вод (1–3 г/дм<sup>3</sup> по ХПК) в условиях невысокой и колеблющейся температуры исходного стока (20–30°С), вопреки существовавшим ранее представлениям о необходимости строгого поддержания оптимальной температуры. Низкая температура (20°С и менее) неприемлема при очистке концентрированных сточных вод или содержащих значительную часть загрязнений в виде биохимически трудногидролизуемых взвешенных веществ.

При очистке сточных вод, содержащих загрязнения в виде простых органических соединений, рекомендуют применять частичную преацидификацию (со снижением ХПК на 20–30%), которую часто проводят не в отдельных кислотофазных биореакторах, а в усреднителях. В результате создаются более благоприятные условия для функционирования метаногенных бактерий в основном биореакторе. По поводу целесообразности полного разделения кислотогенной и метаногенной фаз применительно к очистке стоков в биореакторах второго поколения единого мнения у специалистов нет.

Выявлены следующие недостатки двухфазных технологий: увеличение капитальных затрат; в ряде случаев возникает необходимость в нейтрализации ЛЖК, образующихся в кислотофазном реакторе и закисляющих сток до величины рН < 5; дисперсная биомасса кислотогенных бактерий, содержащаяся в стоке после первой фазы обработки, способствует вытеснению метаногенного ила из биореактора второй фазы. В связи с этим при двухфазной обработке концентрированных стоков рекомендуется отделение кислотогенной биомассы отстаиванием. Кроме того, целесообразна оптимизация кислотофазного брожения для конкретного вида стоков с целью получения состава интермедиатов, наиболее благоприятного для последующего метанового сбраживания.

Считают выгодным применение глубокого разделения фаз анаэробного брожения при очистке сточных вод с высоким содержанием со-

единений серы. В этом случае большая часть сероводорода, образующегося в результате протекающей на первой стадии брожения сульфатредукции, отводится с «кислотогенным» биогазом, что повышает качество биогаза, получаемого на второй стадии.

Избыточная биомасса активного ила удаляется из биореактора с очищенной водой в виде взвешенных веществ. В реакторах со взвешенно-седиментирующей биомассой (гибридный, UASB-реактор) необходим периодический отбор избыточного ила из нижней части аппарата. При очистке сточных вод с уровнем загрязненности по ХПК 2–3 г/дм<sup>3</sup> прирост избыточной биомассы ила составляет в среднем 150–200 мг/дм<sup>3</sup>, что позволяет сбрасывать очищенный сток без отстаивания в городскую канализационную сеть или направлять на доочистку в аэробные сооружения. Количество избыточного ила, удаляемого непосредственно из биореактора, составляет в этих условиях не более 0,002–0,003 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> сточной воды.

Анаэробный ил может длительное время храниться при температуре 15–20°C (в течение года активность ила снижается на 20–30%). Резервный запас ила используется в качестве инокулята при резких нарушениях режима работы биореактора или при запуске других реакторов. В странах Западной Европы гранулированный ил производится как товарный продукт, предназначенный для запуска анаэробных установок. Хорошие водоотдающие свойства ила позволяют обезвоживать его в центрифугах или фильтр-прессах без применения реагентов.

Удаление из очищенной сточной воды растворенного сероводорода при необходимости производят посредством контакта со стальной стружкой или биохимическим окислением до серы в аэробных условиях с помощью иммобилизованных бактерий рода *Thiobacillus*, спонтанно развивающихся в аэробном активном иле. Требуемая продолжительность аэрации при исходной концентрации сероводорода 150–180 мг/дм<sup>3</sup> составляет 3–4 ч.

Общим недостатком анаэробных биореакторов является длительный период выхода на проектную производительность из-за низкой скорости роста и невысокой адгезионной способности метаногенных бактерий. Стабилизация функционирования биореакторов с прикрепленной биопленкой может продолжаться до года. Значительно быстрее (за 4–6 месяцев) происходит запуск реакторов со взвешенно-седиментирующей биомассой (UASB- и гибридный

реакторы), но в период запуска необходимо соблюдать следующие *требования*:

- разбавление сточной воды при высоком содержании загрязнений или токсичных компонентов;
- поддержание низкой скорости протока сточной воды (до  $0,01 \text{ ч}^{-1}$ ), исключающей вымывание флокул и гранул активного ила из аппарата;
- постепенное увеличение нагрузки по органическим загрязнениям только после достижения степени очистки стока по биоразлагаемой части ХПК не менее 80%;
- поддержание оптимальных значений pH среды (не ниже 6,0) и температуры процесса.

Резко сокращает продолжительность запуска UASB-реактора (до 2–3 недель) инокулирование его гранулированным илом (5–15 кг органического вещества на  $1 \text{ м}^3$  объема ферментационной среды) из другого биореактора, функционирующего на аналогичном стоке. При отсутствии ила анаэробных биореакторов могут быть использованы и другие источники посевного материала. В этом отношении наиболее пригодны анаэробно сброженные осадки очистных сооружений. Большая неожиданность состоит в том, что, как показали исследования, в качестве инокулята для анаэробных биореакторов применим даже активный ил из аэротенков, в котором содержится до  $10^8$  клеток метаногенных бактерий в расчете на 1 г сухого вещества.

Опыт эксплуатации анаэробных биореакторов в Западной Европе свидетельствует, что возникающие технические проблемы связаны с утечкой биогаза, засорением распределительных устройств для сточной воды, коррозией и недостаточной теплоизоляцией аппаратов. Специалисты оценивают эксплуатацию современных анаэробных биореакторов как нетрудоемкую. Капитальные затраты на строительство анаэробной установки с UASB-реактором объемом  $1000 \text{ м}^3$  составляют в условиях Западной Европы 500–750 тыс. долл. США. Эксплуатационные затраты на анаэробную очистку  $1 \text{ м}^3$  сточной воды – 0,06–0,08 долл. США. С учетом дохода от реализации биогаза анаэробная очистка стоков с высоким уровнем загрязненности может стать прибыльной.

## Глава 4. ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД

### 4.1. Доочистка сточных вод от взвешенных веществ и органических загрязнений

После обработки на сооружениях механобиологической очистки сточные воды могут быть спущены в водоем либо использованы в системах повторного и оборотного водоснабжения промышленных предприятий.

Современные очистные сооружения в основном не обеспечивают нормативные требования к сбросу очищенных сточных вод в водоем. Технологические требования к качественным показателям оборотной воды могут быть еще более жесткими. И в том и в другом случае необходима глубокая очистка (доочистка) сточных вод.

В зависимости от требуемой степени глубокой очистки вложения на строительство сооружений глубокой очистки увеличивают общие затраты на 30–100%. Часто необходимо привлечение дополнительных материалов: реагентов, ионообменных смол, активированного угля.

В зависимости от целей и выбранных методов глубокой очистки могут быть решены следующие *задачи*:

- глубокая очистка сточных вод от органических загрязнений и взвешенных веществ (могут быть достигнуты БПК<sub>полн</sub> < 1,5 мг/дм<sup>3</sup>, содержание взвешенных веществ < 3,5 мг/дм<sup>3</sup>);

- глубокая очистка сточных вод от биогенных элементов;

- глубокая очистка сточных вод от отдельных компонентов (нефтепродуктов, ПАВ, тяжелых металлов и др.);

- обеззараживание – удаление из очищенных сточных вод бактериальных загрязнений;

- насыщение сточных вод кислородом.

**Фильтрование.** Для использования фильтрования как метода глубокой очистки необходимо выполнение двух *условий*:

- 1) в очищенной сточной воде должны отсутствовать вещества, затрудняющие промывку фильтрующего слоя (смолы, жиры, нефтепродукты и др.);

- 2) концентрация взвешенных веществ не должна превышать 40 мг/дм<sup>3</sup>.

Применяют сетчатые барабанные фильтры (микрофильтры) и фильтры с зернистой загрузкой, в которых в качестве фильтрующего

материала используют кварцевый песок, гравий, гранитный щебень, керамзит, полимерную загрузку.

По мере накопления изъятых из фильтруемой воды загрязнений в толще фильтра возрастает гидравлическое сопротивление фильтрующей среды и ухудшается качество фильтрования вследствие выноса частиц. Для регенерации фильтрующего слоя применяют водную или водовоздушную промывку.

**Доочистка в биопрудах.** Биопруды устраивают при наличии свободных земельных участков с водонепроницаемым или слабофильтрующим грунтом.

Глубокая очистка в биопрудах осуществляется за счет дополнительного продолжительного отстаивания и протекающих в теплое время года процессов биологической деструкции загрязнений.

Для доочистки сточных вод рекомендуется устраивать трехкаскадные биопруды, при этом в первых двух каскадах следует устанавливать по две параллельные секции для периодической очистки.

## **4.2. Методы глубокой очистки сточных вод от биогенных элементов**

**4.2.1. Влияние соединений азота и фосфора на состояние водоемов.** Традиционная биологическая очистка позволяет изъять из воды основную массу органических загрязняющих веществ, но не может обеспечить достаточную глубину удаления соединений азота и фосфора.

В городских сточных водах содержание азота составляет 20–50 мг/дм<sup>3</sup>, в основном это азот органических соединений и аммонийный азот. Содержание фосфатов колеблется в пределах от 5 до 12 мг/дм<sup>3</sup>.

В ходе механобиологической очистки протекают процессы аммонификации и последующей нитрификации, гидролиз соединений фосфора. При этом лишь часть азота и фосфора выводится с биомассой активного ила (в сухом веществе ила содержание азота составляет 6–8%, фосфора – 2%). Содержание аммонийного азота и фосфора в очищенной воде на 20–40% меньше, чем в воде, поступающей на очистку, содержание нитратного и нитритного азота может даже увеличиться.

Таким образом, в водоемы поступает большое количество биогенных элементов. Согласно водному кадастру за 2004 г., сброс соединений

азота в составе сточных вод в водоемы республики составил, тыс. т/г.: аммонийного азота – 6,2; нитратного – 2,8; нитритного – 0,23. Самыми крупными загрязнителями водоемов по аммонийному азоту являются УП «Минскводоканал» (2,4 тыс. т/г.), ГУКПП «Гродноводоканал» и ГКУП «Борисовводоканал» (по 0,5 тыс. т/г.), Брестское КУП ВКХ «Водоканал» (0,3 тыс. т/г.) и др. Самые высокие среднегодовые концентрации биогенных элементов обнаруживаются в воде таких рек, как Свислочь, Березина, Днепр, Мухавец и др. (табл. 8).

Таблица 8

**Средние годовые концентрации соединений биогенных элементов в воде некоторых рек Республики Беларусь (согласно водному кадастру за 2004 г.)**

Река, пункт отбора проб	Средние годовые концентрации		
	азота аммонийного, мг/дм <sup>3</sup>	азота нитритного, мг/дм <sup>3</sup>	фосфатов, мг P/дм <sup>3</sup>
Свислочь (10,0 км ниже г. Минска)	5,95	0,22	0,58
Березина (5,9 км ниже г. Борисова)	1,23	0,02	0,16
Березина (1,9 км ниже г. Бобруйска)	0,56	0,05	0,31
Днепр (25,6 км ниже г. Могилева)	0,67	0,02	0,31
Днепр (0,5 км ниже г. Орши)	0,69	0,02	0,26
Мухавец (1,7 км ниже г. Кобрин)	1,21	0,02	0,08
вдхр. Осиповичское (7,0 км юго-западнее г. Осиповичи)	1,01	0,09	0,61
Ясельда (0,5 км ниже г. Березы)	1,27	0,02	0,15
Припять (3,5 км ниже г. Пинска)	1,15	0,13	0,08
Ипуть (1,7 км ниже г. Добруша)	1,31	0,02	0,05

При высокой концентрации биогенных элементов в воде водоемов (эвтрофикации) происходит нарушение процессов саморегуляции в биоценозах. В них начинают доминировать виды, наиболее приспособленные к изменившимся условиям, вызывая «цветение» воды. Биомасса

бактерио- и фитопланктона во время «цветения» возрастает до 200–500 г/м<sup>3</sup>, тогда как в олиготрофных водоемах она в норме составляет 0,1–0,4 г/м<sup>3</sup>.

В период «цветения» в водоеме повышается значение pH воды, падает содержание растворенного кислорода. Цианобактерии (*Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Nodularia*, *Oscillatoria*) продуцируют нейротоксины, вызывающие заболевания центральной нервной системы, и гепатоксины, приводящие к разрушению печени. Токсины цианобактерий угнетают беспозвоночных, рыб и других гидробионтов, а также могут вызывать заболевания людей при использовании воды из «цветущего» водоема в качестве питьевой. Особенно опасен *Microcystis*, яды которого в 10 000 раз токсичнее цианидов.

В периоды массовой гибели цианобактерий, в результате достижения предельной интенсивности развития, в природных водоемах резко возрастает общее содержание фенольных соединений, которое может составлять более 53 мг/дм<sup>3</sup>.

Кроме того, что азот и фосфор, накапливаясь в водоеме, вызывают его «цветение», разнообразные соединения азота и фосфора оказывают вредное воздействие на гидробионтов и здоровье человека.

Аммонийный азот токсичен для рыб и требует на свое окисление в водоеме большого количества растворенного кислорода. При взаимодействии аммонийного азота с активным хлором в процессе хлорирования очищенных сточных вод образуются хлорамины – токсичные и мутагенные соединения.

Нитраты, попадая в желудочно-кишечный тракт с питьевой водой и продуктами питания, восстанавливаются до нитритов, которые быстро всасываются в кровь, концентрируясь в эритроцитах, обладают выраженной способностью окислять гемоглобин эритроцитов с образованием метгемоглобина, не способного снабжать ткани кислородом, в результате чего развивается гипоксия у человека и рыб.

Кроме того, нитраты в питьевой воде претерпевают химические превращения, при которых могут образоваться нитрозоамины – вещества, обладающие высоким канцерогенным воздействием. По этой причине стандарты на питьевую воду в развитых странах нормируют содержание нитратов. В соответствии с санитарными нормами Республики Беларусь на питьевую воду содержание нитратов в ней не должно превышать 45 мг/дм<sup>3</sup> (по NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Фосфаты малотоксичны, их летальная концентрация для дафний довольно высока – 2,0 г/дм<sup>3</sup>. Однако именно содержанием соединений

фосфора лимитируется «цветение» природных водоемов, поскольку азот может фиксироваться из атмосферы.

Основными *источниками* поступления биогенных элементов в природные водоемы являются:

- объекты сельского хозяйства по причине его интенсификации и химизации;

- промышленные предприятия, в сточных водах которых повышенное содержание азота и фосфора (мясокомбинаты, молокозаводы и др.);

- бытовые сточные воды, содержащие моющие средства, в составе которых находится до 30–50% полифосфатов, а также азот- и фосфорсодержащие продукты жизнедеятельности людей и животных (мочевина, мочева кислота, нуклеиновые кислоты, нуклеопротеиды и др.).

**4.2.2. Очистка сточных вод от азота.** Перед сооружениями биологической очистки ставится задача глубокого удаления всех форм азотсодержащих веществ, что осуществляется в сложных многостадийных процессах, которые требуют обеспечения различных условий среды.

В сточных водах азот представлен в основном в виде минеральных (солей аммония, нитратов, нитритов) и органических соединений (аминокислот, белков, нуклеиновых кислот).

В бытовых сточных водах, поступающих на очистные сооружения, около 80–90% всех азотсодержащих веществ составляют аммиак и мочевины. Аммиак образуется в результате протекающей в канализационной сети аммонификации органических соединений. Этот процесс проходит недостаточно интенсивно при пониженной температуре ( $<10^{\circ}\text{C}$ ) и низком значении pH и может не завершиться при недостаточном времени нахождения сточной воды в системе канализации из-за незначительной протяженности сетей. В этом случае поступающие белковые соединения разлагаются с образованием аммонийного азота на очистных сооружениях в анаэробных зонах (которые всегда присутствуют). По этой причине может наблюдаться возрастание содержания аммонийного азота в осветленных, а также в биологически очищенных водах на фоне удовлетворительной нитрификации в аэротенках. Этим объясняется постоянное наличие аммонийного азота в концентрациях 1,0–2,0 мг/дм<sup>3</sup> в очищенных сточных водах удовлетворительно работающих очистных сооружений, как бы хорошо ни протекал процесс нитрификации в аэротенках.

Суммарное содержание нитратов и нитритов в поступающих на очистку городских сточных водах не превышает 1,0 мг/дм<sup>3</sup>. Увеличение

их содержания сверх данной нормы является признаком промышленного загрязнения. В небольших количествах нитриты и нитраты могут появляться в осветленных водах при наличии преаэрации сточных вод, в результате сильного перемешивания в приемных камерах, а также при подаче иловой воды после сооружений обработки осадка в поток поступающих сточных вод в первичные отстойники.

Основной процесс трансформации азотсодержащих соединений, протекающий в аэротенках, – нитрификация.

Для успешного протекания процесса нитрификации в аэротенках необходимо выполнение ряда *условий*:

1. Низкая нагрузка на активный ил, поскольку в присутствии органических соединений подавляется рост нитрификаторов, большинство из которых являются облигатными автотрофами (см. п. 2.1.5).

При нагрузках 400–500 мг БПК<sub>полн</sub> на 1 г активного ила нитрификация не обеспечивается. При нагрузках 200–250 мг/г нитраты появляются, особенно летом. При низких нагрузках (100–150 мг/г) нитрификация проходит особенно интенсивно, и большая часть азота переходит в нитраты.

О возможности и интенсивности протекания нитрификации судят по величине нитрификационного потенциала. Нитрификационным потенциалом сточных вод принято считать соотношение значений БПК<sub>5</sub> и общего азота в осветленных сточных водах после первичного отстаивания. В обычных системах очистки, работающих на полное окисление с последующей нитрификацией, нитрификационный потенциал составляет 5–6. При его возрастании интенсивность нитрификации снижается. В системах низконагружаемых аэротенков, обеспечивающих глубокую нитрификацию, а также в двухстадийных последовательных процессах очистки нитрификационный потенциал более благоприятен – он равен 3.

2. Высокий уровень аэрации. На превращение 1 мг аммонийного азота в нитритный затрачивается 2,33 мг растворенного кислорода, а на окисление 1 мг нитрита до нитрата требуется 3,4 мг кислорода. Кроме того, подачей большого количества воздуха обеспечивается тщательное перемешивание иловой смеси.

3. Удовлетворительный режим удаления ила из вторичных отстойников для предупреждения его залежей и образования анаэробных зон. С другой стороны, избыточное удаление ила из системы отрицательно влияет на скорость нитрификации, поскольку уменьшается возраст ила.

4. Возраст активного ила должен быть не менее 4–5 сут. За счет большого возраста ила удается сохранять необходимую численность нитрификаторов, которые имеют низкую скорость роста.

5. Оптимальные значения температуры 15–35°C, pH 7,2–8,6.

Присутствие аммонийного азота в очищенных водах в количестве более 2,0 мг/дм<sup>3</sup> свидетельствует о недостаточной глубине нитрификации. На сооружениях биологической очистки, обеспечивающих глубокую нитрификацию, в очищенных водах весь азот представлен в основном в форме нитратов. Нитриты содержатся в небольшом количестве: даже если их образуется много в результате незавершенного процесса нитрификации, они в значительной степени окисляются в процессе хлорирования.

Эффективная нитрификация не всегда благоприятный процесс и может приводить к ухудшению качества очищенных сточных вод. На сооружениях с глубоко развитым процессом нитрификации во вторичных отстойниках может протекать денитрификация. Образующимся газообразным азотом разрываются хлопья активного ила, он плохо оседает, всплывает на поверхность и выносится с очищенной водой. Смена температурного режима в летний период усугубляет это явление. Возникает парадоксальная ситуация, при которой чем выше степень очистки и глубже идут процессы нитрификации, тем больше опасность загрязнения водоемов в результате избыточного выноса ила из вторичных отстойников по причине денитрификации.

Протеканию денитрификации во вторичных отстойниках благоприятствует ряд *факторов*:

- содержание растворенного кислорода менее 1 мг/дм<sup>3</sup>;
- содержание нитратов в очищенной воде более 5–8 мг/дм<sup>3</sup>;
- температура воды 16–25°C.

Сам по себе процесс денитрификации на сооружениях биологической очистки является положительным, поскольку позволяет освобождать воду от окисленных форм азота. Сочетанием процессов нитрификации и денитрификации можно снижать содержание неорганического азота на 90% и общего азота на 80–95%. Однако денитрификация при этом не должна мешать осаждению активного ила.

**4.2.3. Очистка сточных вод от фосфора.** Под термином «общий фосфор» понимают все соединения фосфора, содержащиеся в воде: неорганические фосфаты и полифосфаты, органические соединения

фосфора (нуклеиновые кислоты, фосфолипиды). В сточных водах фосфор может присутствовать в растворенном, коллоидном и взвешенном состояниях.

В нерастворимом состоянии фосфор в основном находится на взвешенных частицах в виде труднорастворимых фосфатов и белковых веществ. Нерастворимый фосфор, прочно связанный с другими соединениями, присутствующими в сточных водах, абсолютно инертен для биологического процесса очистки и, поступая в водоем в виде устойчивых минералов, подобных ортофосфату кальция, не обогащает его фосфором, а захоранивается в донных осадках.

В процессе биологической очистки в аэротенках при определенных значениях pH и при наличии ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  происходит процесс изъятия фосфора за счет образования нерастворимых фосфатов.

Основная доля соединений фосфора представлена в виде коллоидной и растворенной форм фосфатов и ортофосфатов и растворенных форм полифосфатов. Фосфаты и полифосфаты гидролизуются в результате биологической очистки в ортофосфаты, а органический фосфор отчасти переходит в ортофосфаты, в некоторой степени усваивается активным илом, а частично остается в очищенных водах.

Взвешенные формы соединений фосфора отчасти осаждаются в первичных отстойниках, а в некоторой степени сорбируются на активном иле. Если на очистных сооружениях предусмотрено обезвоживание активного ила, то эти соединения фосфора переходят в надыловую воду, которая подается в первичные отстойники, т. е. снова оказываются в сточной воде.

**Биологическое удаление фосфора.** Определенные группы бактерий активного ила обладают способностью накапливать в своих клетках (в полифосфатных гранулах, так называемых зернах волютина) растворенные формы фосфора. Эти бактерии в состоянии потреблять фосфора больше, чем его требуется на прирост биомассы и энергетические потребности. Такой способностью обладают представители родов *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Aerobacter*, *Beggiatoa*, *Aeromonas*, *Zoogloea ramigera*, а также реже встречающиеся *Klebsiela*, *Enterobacter*, *Mycobacterium* и многие другие. От других микроорганизмов активного ила они отличаются тем, что содержание соединений фосфора в них может составлять до 1–3% сухой массы клеток.

Однако если в аэробных условиях аэротенков эти бактерии накапливают фосфор, то в анаэробных условиях вторичных отстойников ак-

тивно выделяют его в воду. В результате на тех сооружениях, где протекает нитрификация, почти всегда наблюдается увеличение содержания фосфора в очищенной воде после вторичных отстойников. Причем, чем эффективнее нитрификация в аэротенках, тем больше накапливается фосфатов в клетках активного ила и тем больше они его отдадут во вторичных отстойниках.

Это связано с тем, что в анаэробных условиях эти микроорганизмы используют накопленные в гранулах волютина ортофосфаты, полифосфаты и связанный органический фосфор как энергетический резерв, расходуемый на потребление субстрата. Они потребляют простые легкоокисляемые органические субстраты, например, летучие жирные кислоты (среди которых излюбленная – уксусная кислота) и запасают их внутри клетки в виде полигидроксиалканатов (наиболее распространен поли-β-гидроксибутират (ПГБ)), что сопровождается внутриклеточной деградацией накопленных в аэробной стадии соединений фосфора. Энергия деградации фосфатов расходуется на накопление и потребление легкоокисляемой органики, клеточный синтез и транспортный перенос в процессе дыхания в анаэробных условиях. Эти процессы сопровождаются отдачей накопленного клеткой фосфора в воду.

При попадании бактерий в аэробные условия накопленный субстрат в виде полигидроксиалканатов начинает расходоваться как источник углерода на питание и прирост биомассы бактерий. Это сопровождается выделением углекислого газа и воды и повышенным потреблением из окружающей среды фосфатов, которые снова откладываются в клетках в полифосфатных гранулах.

На такой цикличности накопления полифосфатов в клетках бактерий и использования их энергии основана технология глубокого изъятия из сточных вод соединений фосфора. Важным условием для успешного протекания процесса является чередование аэробных и строго анаэробных условий, при которых отсутствует даже химически связанный кислород.

**Физико-химическое удаление фосфора.** Все методы физико-химического удаления фосфора основаны на переводе растворенных соединений фосфора в нерастворимую форму либо на поглощении их поверхностью сорбента.

Высокой сорбционной способностью по отношению к примесям соединений фосфора обладает доломит, сорбенты на основе окиси алюминия.

На основе шлака доменных печей, минералов, содержащих фосфат кальция, проводят наращивание кристаллов фосфатов с последующим их удалением из сточной воды.

Соли алюминия и железа используют для коагулирования и осаждения коллоидных фосфатов.

Однако все эти методы требуют применения дорогостоящих реагентов и приводят к вторичному загрязнению сточной воды, поэтому их использование ограничено.

**4.2.4. Технология удаления биогенных элементов.** В обычных условиях биологической очистки процессы нитрификации и дефосфотации как бы противостоят друг другу. Чем интенсивнее нитрификация, тем больше фосфатов накопится в клетках бактерий и тем больше бактерии их отдадут в очищенную воду в анаэробных условиях вторичных отстойников.

Кроме того, содержание фосфатов в очищенных водах может возрастать за счет разрушения клеток активного ила, например, в илоуплотнителях, а также при голодании и самоокислении активного ила, когда его клетки отдают накопленный фосфор в окружающую воду, например, в минерализаторах.

Незначительное накопление фосфатов в биологически очищенных водах может происходить также по причине аммонификации белка в анаэробных зонах различных звеньев очистных сооружений, если этот процесс не был удовлетворительно завершен в канализации, при условии, что таких бескислородных зон достаточно много. Кроме того, растворимость фосфорных соединений повышается при снижении pH сточных вод, что также объясняет периодическое возрастание содержания соединений фосфора в очищенных сточных водах при аварийных сбросах загрязняющих веществ, способствующих повышению кислотности.

Таким образом, в процессе традиционной биологической очистки не удается достичь требуемого качества сточных вод по содержанию фосфора и всех форм азота. В табл. 9 приведены данные по эффективности удаления общего азота и фосфора при применении разных методов очистки сточных вод.

Наиболее перспективный метод глубокого удаления биогенных элементов из сточных вод базируется на традиционной биологической очистке с сочетанием аэробных и анаэробных процессов. Глубокое

удаление азота достигается методом нитрификации – денитрификации, а глубокое удаление фосфора – методом биологической дефосфотации, т. е. предварительной подготовкой бактерий в анаэробных условиях к повышенному потреблению и накоплению фосфора в последующей аэробной стадии.

Таблица 9

**Эффективность удаления соединений азота и фосфора при очистке сточных вод разными методами, %**

Вид очистки сточных вод	Эффективность удаления	
	общего фосфора	общего азота
Механическая	15	15
Механическая с реагентами	75–90	25–30
Традиционная биологическая	30	30
Биологическая с реагентами	90–95	35
Глубокое удаление биогенных элементов при биологической очистке	90–95	60–85

Этот процесс начал активно исследоваться только в конце 80-х гг. XX в., и в современной литературе сведений об условиях, обеспечивающих эффективное удаление фосфора биологическим методом, мало. В сентябре 1987 г. в Риме была проведена первая крупная международная конференция, посвященная этому вопросу, где было отмечено, что довольно сложно получить удовлетворительные результаты по глубокому удалению соединений фосфора из сточных вод.

При использовании технологии глубокого удаления азота и фосфора биологическим методом предполагается искусственное создание различных зон, которые по степени обеспеченности кислородом подразделяются на три основные: аэробная, анноксидная и анаэробная. Каждая из этих зон характеризуется специфическими условиями для реализации определенных микробиологических процессов.

Первичная аэробная зона имеется на всех сооружениях с аэротенками, предназначенных для удаления органических загрязняющих веществ, с последующей нитрификацией. В сточных водах, прошедших очистку в данной зоне, снижается содержание органических веществ и аммонийного азота, а увеличивается содержание нитритов и нитратов. Окислительные процессы в этой зоне осуществляются в основном в аэробных условиях.

В аноксидной зоне свободный кислород отсутствует, так как воздух в иловую смесь не подается, и ее перемешивание обеспечивается низкоскоростными погружными механическими мешалками. Однако кислород присутствует в химически связанном виде в форме нитратов и небольшого количества нитритов. При благоприятных условиях аноксидная зона – это зона активной денитрификации, которая интенсифицируется подачей дополнительной легкоокисляемой органики. В аноксидной зоне присутствуют микроаэрофилы и факультативные анаэробы.

В анаэробной зоне кислород отсутствует в свободном виде, а его содержание в химически связанном виде минимально. Продолжается процесс денитрификации и идет накопление биомассы организмов, которые в состоянии откладывать полифосфаты в своих клетках, а также стимулируется их способность поглощать фосфаты в последующей вторичной аэробной зоне, которая следует за анаэробной зоной при реализации технологии глубокого изъятия азота и фосфора. Содержание фосфатов на этой стадии в сточных водах повышается, а количество нитратов и нитритов сокращается. В анаэробной зоне в активном или присутствуют факультативные и облигатные анаэробы. Чем больше в среде на стадии анаэробноаэробия находится легкоокисляемой органики, тем больше в последующей вторичной аэробной зоне будет прирост биомассы фосфорнакапливающих бактерий и больше депонируется полифосфатов в клетках, а следовательно, больше фосфатов перейдет из сточных вод в биомассу активного ила.

Таким образом, вторичная аэробная стадия завершает цикл удаления азота и фосфора. Иловая смесь аэрируется. В этой зоне начинается «жадное» поглощение фосфатов активным илом и интенсивное изъятие их из очищенных вод. Присутствуют факультативные анаэробы, микроаэрофилы.

Последовательное использование в традиционной биологической очистке сточных вод всех вышеуказанных стадий позволяет обеспечить глубокое удаление азота и фосфора, но этот метод остается наиболее дорогим методом удаления биогенных веществ как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам. В табл. 10 представлены условные затраты на разные процессы, когда за единицу приняты затраты на механическую очистку.

В мировой практике существует несколько традиционных схем сочетания анаэробных и аэробных стадий, предложенных для глубокого удаления биогенных элементов из сточных вод разного состава (рис. 14).

Таблица 10

**Сравнение затрат на удаление соединений азота и фосфора при очистке сточных вод разными методами**

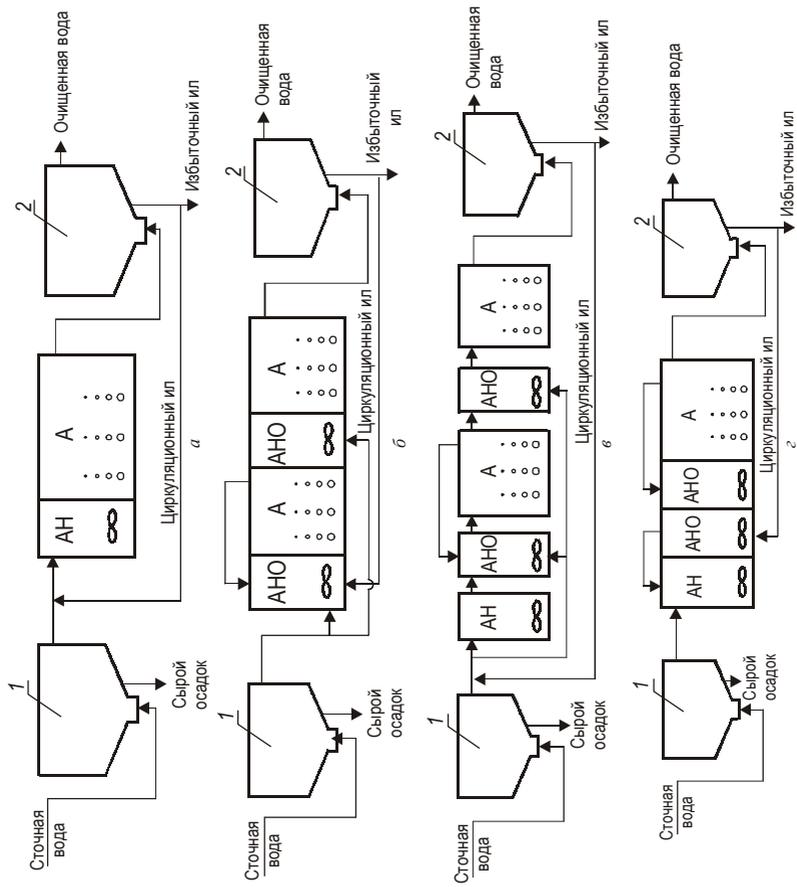
Вид очистки сточных вод	Затраты	
	капитальные	эксплуатационные
Механическая	1,0	1,0
Механическая с реагентами	1,1–1,3	1,6–1,9
Традиционная биологическая	1,8	1,7
Биологическая с реагентами	1,7–1,9	2,2–2,6
Глубокое удаление биогенных элементов при биологической очистке	2,1–2,6	2,6–3,3

1. Наиболее простая схема разработана в США для одновременного удаления соединений азота и фосфора (в наибольшей степени фосфора) из сточных вод на высоконагружаемых очистных сооружениях. Она получила название А/О-процесса (Anaerobic/Oxic-процесса). По этой схеме (рис. 14, а) возвратный ил перемешивается с поступающими сточными водами и подается в анаэробный реактор, затем сточные воды проходят аэробную очистку и поступают во вторичные отстойники.

Это наиболее простая и дешевая схема удаления соединений азота и фосфора, но ее применение возможно только для сточных вод промышленного состава с высокими нагрузками на активный ил по углеродсодержащей органике, умеренной нитрификации и при больших концентрациях фосфорсодержащих соединений. Для низконагружаемых сооружений устраивается дополнительная аноксидная стадия с целью более эффективного удаления нитратного и нитритного азота.

2. Наиболее известная, широко применяемая в Европе, схема очистки (рис. 14, б), позволяющая эффективно удалять соединения азота и фосфора на низконагружаемых сооружениях, получила название по имени разработчика Vardenpho-процесс.

В этой схеме очистка сточных вод начинается с аноксидной стадии, в которой осуществляется денитрификация. В эту зону подаются сточные воды, используемые для денитрификации как источник углерода, и иловая смесь после нитрификатора, которая содержит нитриты и нитраты.



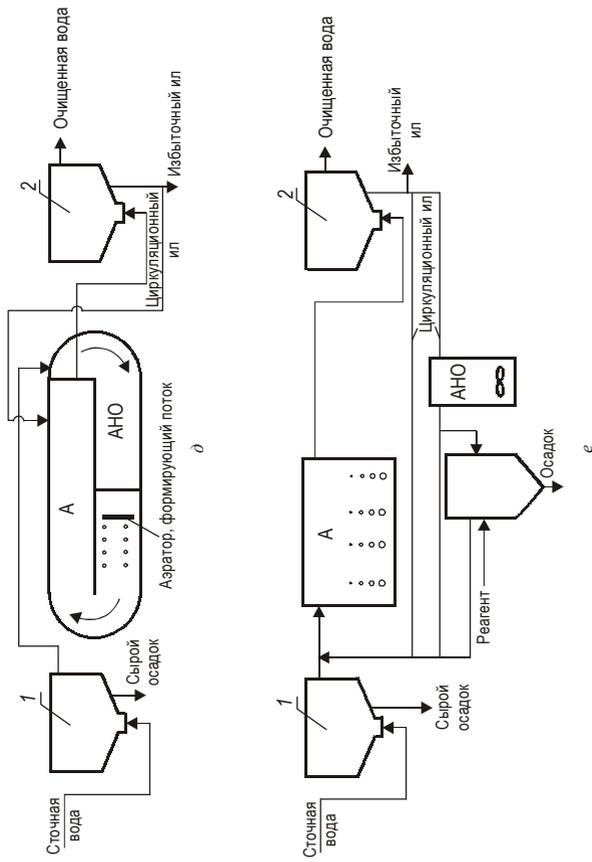


Рис. 14. Технологические схемы удаления из сточных вод азота и фосфора:

*a* – схема для удаления азота и фосфора на высоконагружаемых сооружениях; *b* – схема для удаления азота и фосфора на низконагружаемых сооружениях; *в* – модификация схемы *b* с дополнительной анаэробной стадией; *г* – модификация схемы *в* с тремя рециркулирующими потоками; *д* – схема с оксидационным каналом;

*e* – схема с дополнительным реагентным удалением фосфора:

*1* – первичный отстойник; *2* – вторичный отстойник; *A* – аэробная зона; *АНО* – анаэробная зона; *АНО* – аноксидная зона

Затем следует аэробная стадия, где происходит снижение содержания органических загрязняющих веществ в очищаемых сточных водах и нитрификация. Смесь ила из этой зоны, содержащая нитраты, подается в следующую аноксидную зону денитрификации и одновременно в предыдущую аноксидную зону денитрификации. Процесс заканчивается аэробной зоной, в которой осуществляется нитрификация и частичная дефосфотация.

3. Phoredox-процесс (рис. 14, в) представляет собой модификацию Bardenpho-процесса (пятистадийный Bardenpho). В этой схеме добавлена дополнительная анаэробная стадия с коротким периодом пребывания сточных вод (1–3 ч), в которой обеспечивается рост и функционирование фосфорнакапливающих бактерий и стимулируется «жадное» потребление фосфора в последующей аэробной стадии. Изъятие общего фосфора может достигать 95%.

4. УСТ-процесс (рис. 14, г) был предложен в университете Кейптауна в 1984 г. и представляет модификацию Phoredox-процесса с тремя рециркулирующими потоками (а не с двумя, как в предыдущих процессах). Эффективность удаления органических загрязняющих веществ, характеризуемых показателем БПК<sub>5</sub>, составляет в этой схеме 95%, общего азота – 80%, общего фосфора – до 70%. Общее время пребывания сточных вод в сооружениях биологической очистки – 15–20 ч.

5. В европейских странах широкое использование получили оксидационные каналы (рис. 14, д), в которых сточные воды приводятся в движение по кругу с помощью аэраторов, создающих поток сточных вод. Наиболее распространены оксидационные каналы, в которых аэраторы установлены равномерно по всей окружности сооружения. Продленная аэрация и глубокая нитрификация достигается непрерывной циркуляцией и большим временем пребывания сточных вод (может достигать нескольких суток). Для обеспечения глубокого удаления соединений азота и фосфора оксидационный канал делится на зоны с разной аэробностью: в аэробной зоне иловая смесь насыщается кислородом при помощи аэратора, в аноксидной – аэратор не устанавливается и туда подается осветленная вода из первичных отстойников. Поток сточных вод во вторичные отстойники подается из аэробной зоны.

6. Phostrip-процесс (рис. 14, е), кроме биологического удаления азота и фосфора, включает дополнительное изъятие фосфора (до 95%) с помощью химических реагентов.

### 4.3. Обеззараживание сточных вод

Согласно «Правилам охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами», сточная вода, поступающая в водоем, не должна содержать патогенных микроорганизмов и вирусов. В сооружениях механобиологической очистки содержание бактерий группы кишечной палочки снижается на 90–95%. Для полного обеззараживания сточных вод применяют хлорирование, озонирование, ультрафиолетовое облучение.

**Хлорирование.** Обеззараживание сточной воды соединениями хлора достигается за счет окисления веществ, входящих в состав цитоплазмы, и гибели клеток. Наиболее широко используют хлорную известь, хлор и его производные. Количество активного хлора, вводимого на единицу объема сточной воды, называется дозой хлора. Доза хлора подбирается таким образом, чтобы содержание бактерий группы кишечной палочки в воде, сбрасываемой в водоем, не превышало 1000 клеток на 1 дм<sup>3</sup>. Доза остаточного хлора при этом должна составлять не менее 1,5 мг/дм<sup>3</sup> при продолжительности контакта 30 мин и не менее 1 мг/дм<sup>3</sup> при продолжительности контакта 60 мин.

Требуемые дозы хлора в каждом конкретном случае устанавливаются экспериментально. Для обеззараживания сточной воды после механической очистки доза хлора составляет около 10 г/м<sup>3</sup>, после полной и неполной биологической – около 3 и 5 г/м<sup>3</sup> соответственно.

Установка для хлорирования жидким хлором включает хлораторную, смеситель, контактные резервуары. Жидкий хлор находится в контейнерах под давлением, после испарения он проходит фильтр и в газообразном состоянии поступает в дозатор. Для обеззараживания сточных вод гипохлоритом натрия применяют электролизные установки. Из технической соли в электролизере получают хлор, а при его взаимодействии со щелочью – гипохлорит натрия.

Обработка сточной воды гипохлоритом натрия и жидким хлором практически равноценна по стоимости, обеззараживание хлорной известью – в 1,5–2 раза дороже.

После смешивания сточной воды с хлорсодержащими агентами она поступает в контактные резервуары. Они предназначены для обеспечения расчетной продолжительности контакта очищенных сточных вод с хлором или гипохлоритом натрия. Конструктивно они не отличаются от первичных отстойников. Осадок, выпадающий в контактных резервуарах,

имеет влажность 96%, его можно обезвоживать без предварительной стабилизации.

Обеззараживание сточных вод хлорированием имеет два существенных *недостатка*:

1) такая обработка не обеспечивает необходимой эпидемической безопасности в отношении вирусов;

2) образуются хлорамины и хлорорганические соединения (диоксины), обладающие высокой токсичностью, мутагенностью, канцерогенностью. Они способны аккумулироваться в донных отложениях, тканях гидробионтов и в конечном счете попадать в организм человека.

**Озонирование.** Озон обладает высокой бактерицидной активностью и обеспечивает надежное обеззараживание воды даже по отношению к спорообразующим бактериям. Благодаря сильной окислительной способности озон разрушает клеточные мембраны и стенки. Кроме того, обработка озоном дает возможность получить более высокую степень очистки воды за счет окисления биостойких загрязнений и обезвреживания токсичных соединений. Эффект озонифлотации позволяет отказаться от применения фильтров доочистки перед озонированием и снизить затраты на проведение доочистки воды.

Токсикологическая оценка озонирования свидетельствует об отсутствии негативного воздействия обеззараженной воды на организм человека и теплокровных животных.

Основными факторами, сдерживающими широкое применение озона, являются его высокая себестоимость и малая степень использования озона (50–70%) в существующих конструкциях смесителей. Совершенствование озонаторных установок и технологии озонирования способствует более широкому распространению обеззараживания и доочистки сточных вод методом озонирования. В частности, на очистных сооружениях г. Могилева смонтирована пилотная установка для доочистки и обеззараживания стоков методом озонирования.

**Ультрафиолетовое обеззараживание.** В отличие от предыдущих методов обеззараживания применение бактерицидного облучения не требует введения в воду реактивов, не влияет на вкус и запах воды, не оказывает токсичного воздействия на водные организмы и не приводит к образованию вредных химических соединений.

Основным ограничением в использовании УФ-установок для обеззараживания сточных вод является невысокая проникающая способность УФ-лучей даже в прозрачной воде, а в загрязненных водах она быстро затухает.

#### **4.4. Насыщение сточных вод кислородом**

Содержание растворенного кислорода в сточных водах после механикобиологической очистки обычно составляет 0,5–1,0 мг/дм<sup>3</sup>. Для достижения требуемой концентрации (4 или 6 мг/дм<sup>3</sup> в зависимости от категории водоема) воду перед выпуском необходимо аэрировать.

При наличии подходящего рельефа местности можно применять систему аэрации в виде многоступенчатых водосливов-аэраторов. Водосливные отверстия выполняют в виде зубчатой стенки с зубчатым щитом над ней. При этом зубья стенки и щита обращены друг к другу остриями. Перепад уровней на каждой ступени каскада должен составлять 0,55 м, для насыщения воды кислородом достаточно 3–5 ступеней.

При отсутствии перепада уровней необходимо использовать барботажные сооружения.

## Глава 5. ОБРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

### 5.1. 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. Объем влажных осадков составляет 2–10% от объема очищаемых вод. Содержание сухого вещества в осадках в зависимости от их вида находится в пределах от 0,3 до 7%. В Республике Беларусь образуется около 0,7 млн. т (по абсолютно сухому веществу) осадков в год, в США – 6,5, в Великобритании – 1,1, в Германии – 2,4, во Франции – 0,8, в Японии – 2,8 млн. т.

В зависимости от условий формирования и особенностей отделения различают осадки первичные и вторичные.

**Первичные осадки.** К ним относят грубодисперсные примеси, которые находятся в твердой фазе и выделены из воды методами механической очистки (седиментация, флотация, фильтрация, осаждение в центробежном поле).

Грубые осадки (отбросы) задерживаются решетками. В состав отбросов входят крупные взвешенные и плавающие примеси, преимущественно органического происхождения: бумага, тряпье, древесина, полимерные материалы и др. Отбросы часто подвергаются дроблению с последующим выпуском их в канал перед решеткой. Переработка отбросов вместе с другими осадками может осуществляться в метантенках, на пиролизных установках либо они направляются на компостирование.

Тяжелые осадки (песок, камни, кирпич, уголь, битое стекло) задерживаются песколовками. Влажность тяжелых осадков составляет около 60%.

Плавающие осадки улавливаются жироловками или всплывают в отстойниках.

Сырые осадки задерживаются первичными отстойниками. В бытовых сточных водах эти осадки представляют собой студенистую, вязкую суспензию, содержащую до 60–75% органических веществ. Влажность осадков при самотечном удалении после 2-часового отстаивания составляет 95%, при удалении плунжерными насосами – 93–94%.

**Вторичные осадки.** К ним относят примеси, которые первоначально находились в воде в виде коллоидов, молекул, ионов, но в процессе биологической или физико-химической очистки были переведены в твердую фазу и удалены из сточных вод. Осадок, который образуется после биологической очистки, – избыточный активный ил, после физико-химической очистки – шлам.

Активный ил, задерживаемый вторичными отстойниками после аэротенков, представляет собой хлопьевидную массу бурого цвета, обладающую флокулирующими свойствами. По механическому составу он относится к тонким суспензиям, поскольку на 98% по массе состоит из частиц размерами меньше 1 мм. Активный ил отличается высокой влажностью, которая достигает 99,2–99,7%. Содержание органических веществ в активном иле составляет 70–75%, в том числе: белков – 45–50%, жиров – 15–20%, углеводов – 5–8%. По сравнению с сырым осадком из первичных отстойников активный ил содержит белков вдвое больше, а углеводов в 2,5–3 раза меньше. Сырой активный ил имеет в своем составе патогенные микроорганизмы и яйца гельминтов. Высокая влажность и химический состав ила обуславливают его способность к самопроизвольному разложению с образованием специфического гнилостного запаха.

Влажность избыточной биопленки, выносимой из биофильтров, после вторичных отстойников составляет 96%.

Шламы при физико-химической очистке выделяются с применением реагентов, адсорбции, ионного обмена, экстракции и других методов и задерживаются отстойниками или другими сооружениями.

**Формы связи влаги.** Все осадки имеют очень высокую влажность. Условия и степень удаления влаги из осадков определяются их структурой и особенностями распределения воды. Влага в структуре осадка может находиться в свободном состоянии, в физико-механической связи с твердыми частицами, а также в виде физико-химически и химически связанной.

Свободная влага имеет наименьшую энергию связи со структурой осадка и может быть из него удалена механическими методами и естественной сушкой осадков на иловых площадках.

Физико-механически связанная влага – это капиллярная вода, вода смачивания и структурная влага. Физико-механическая связь нарушается при выпаривании и удалении влаги под давлением.

Физико-химической связью удерживается адсорбционная и осмотическая влага.

Химически связанная вода, входящая в состав веществ, не выделяется даже при термической сушке осадков.

## 5.2. Обработка осадков

Обработка осадков проводится с целью получения конечного продукта, наносящего минимальный ущерб окружающей среде или пригодного для утилизации. Эта цель достигается при выполнении трех основных *условий*:

1) уменьшение объема осадка за счет его уплотнения и обезвоживания;

2) стабилизация, обуславливающая длительное хранение осадков без разложения;

3) обеззараживание, т. е. обеспечение безопасности осадков по санитарно-бактериологическим показателям.

На рис. 15 приведена классификация методов обработки осадков.

**5.2.1. Уплотнение осадков.** Имеющий высокую влажность избыточный активный ил уплотняют для уменьшения объема. На современных очистных сооружениях устройство илоуплотнителей является обязательным.

Уплотнению могут подвергаться осадок из первичных отстойников, избыточный активный ил, смесь осадка первичных отстойников и избыточного активного ила, осадки и ил после стабилизации. На рис. 16 приведены варианты расположения илоуплотнителей на схеме станции очистки сточных вод с использованием аэротенков.

В первом варианте (рис. 16, *а*) избыточный активный ил непрерывно поступает в илоуплотнитель, где отдает основную массу свободной влаги в виде иловой воды, и подается на дальнейшую обработку. Иловая вода содержит значительное количество растворенных органических веществ и возвращается в схему очистки перед аэротенками.

Во втором варианте (рис. 16, *б*) уплотнению в отдельном илоуплотнителе подвергается осадок из первичных отстойников, что облегчает в последующем совместную обработку осадков. Отделенная вода содержит взвешенные вещества и подается в схему перед первичными отстойниками.



Рис. 15. Классификация методов обработки осадков

По схеме третьего варианта (рис. 16, в) реализуется совместное уплотнение избыточного активного ила и осадка из первичных отстойников.

И, наконец, в четвертом варианте (рис. 16, г) уплотнение осадков осуществляется без илоуплотнителей. Активный ил подается в преаэраторы в объеме, превышающем его избыточное количество, откуда со сточной водой поступает в первичные отстойники. Выносимый из первичных отстойников активный ил компенсирует недостающую часть циркулирующего, подающегося в аэротенки. Таким образом, в преаэраторы отправляется такая часть активного ила, которая превышает его избыточное количество, но позволяет выделить в первичных отстойниках весь избыточный активный ил. По этой схеме получается один вид осадка – смесь сырого осадка и активного ила.

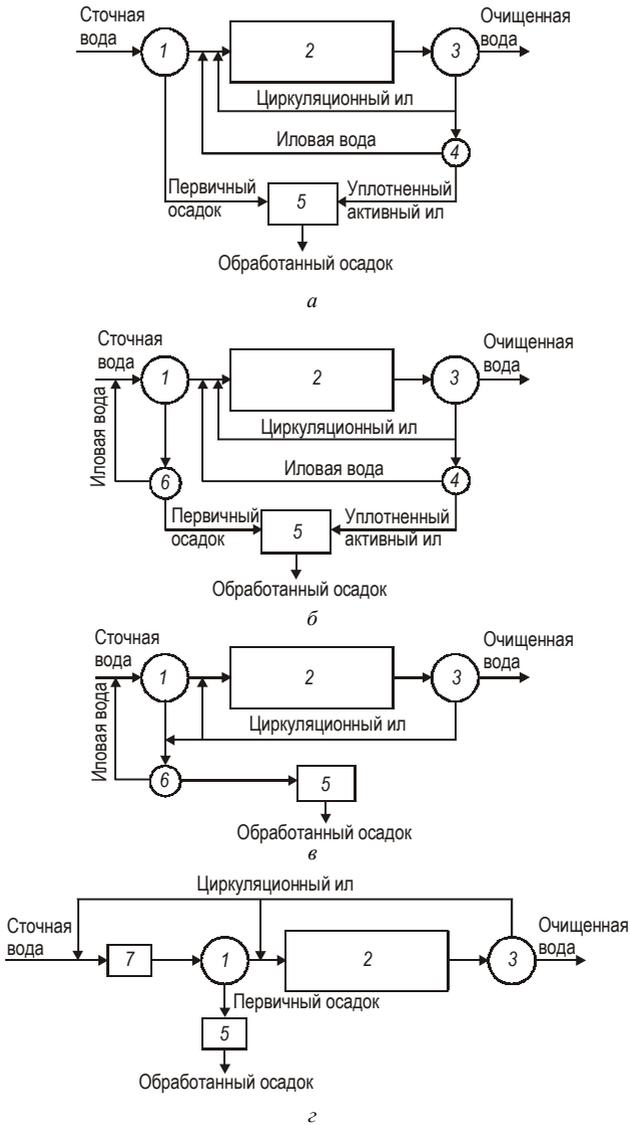


Рис. 16. Варианты расположения илоуплотнителей:  
 1 – первичный отстойник; 2 – аэротенк; 3 – вторичный отстойник; 4 – илоуплотнитель;  
 5 – блок обработки осадков; 6 – осадкоуплотнитель; 7 – преаэратор

На выбор оптимальной схемы оказывают влияние не только тип илоуплотнителя, но и свойства активного ила, которые зависят от состава сточных вод, степени очистки и др. К примеру, активный ил при неполной биологической очистке уплотняется значительно лучше, чем при полной, а иловая смесь из аэротенков уплотняется быстрее, чем активный ил из вторичных отстойников.

Для уменьшения объема избыточного активного ила наибольшее распространение получило *гравитационное илоуплотнение*. Используются радиальные и вертикальные илоуплотнители, конструкции которых аналогичны конструкциям первичных отстойников.

Наибольшей эффективностью обладают радиальные илоуплотнители с илоскребами. Они имеют меньшую высоту по сравнению с вертикальными, а медленное перемешивание способствует лучшему хлопьеобразованию и осаждению.

Влажность активного ила после гравитационного уплотнения продолжительностью 9–11 ч составляет 97–98%. Смесь осадка из первичных отстойников и активного ила при продолжительности уплотнения 7–10 ч достигает влажности 93–95%. Иловая смесь из аэротенков за 5–8 ч уплотняется до влажности 97%.

Для повышения степени уплотнения и сокращения продолжительности процесса применяют химические реагенты (коагулянты), термообработку осадка (при нагревании разрушаются гидратные оболочки вокруг частиц, часть связанной влаги переходит в свободную), разбавление активного ила очищенной сточной водой.

*Флотационное уплотнение* рекомендуется для флокулообразующей структуры активного ила, причем концентрация по сухому веществу не должна превышать 6–8 г/дм<sup>3</sup>. Избыточный активный ил насыщается воздухом под давлением, равномерно распределяется по сечению флотатора, всплывает и удаляется. Нижняя часть флотатора используется как зона отстаивания для удаления плотных частиц.

При флотационном уплотнении влажность уплотненного осадка составляет 95–97%. Для интенсификации процесса илоуплотнения и понижения влажности выгружаемого осадка в некоторых случаях используют добавление полиэлектролитов.

Флотационное уплотнение осуществляется в 10–15 раз быстрее, чем гравитационное, однако при этом возрастают эксплуатационные затраты.

**5.2.2. Стабилизация осадков.** Стабилизация первичных и вторичных осадков достигается путем разложения органической части до простых соединений или устойчивых в условиях окружающей среды продуктов. Эффект стабилизации может быть достигнут биологическими (анаэробное сбраживание, аэробная минерализация, компостирование), химическими (реагентная обработка) методами или их комбинацией.

**Анаэробная стабилизация.** При небольшом количестве осадков применяют септики, двухъярусные отстойники и осветлители-перегниватели, в которых биологический процесс разложения органической массы осуществляется в условиях окружающей среды.

**Септики** – комбинированные сооружения, в которых происходит осветление сточной воды и сбраживание выпавшего осадка. Септики используют при очистке небольших количеств сточных вод (до 25 м<sup>3</sup>/сут), поступающих от отдельно стоящих зданий. Перегнивший осадок со дна септиков периодически выгружается и вывозится.

**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. В верхней части таких отстойников расположены осадочные желоба, по которым протекает сточная вода. Желоба выполняют функции горизонтальных отстойников. Выпавший осадок через нейтральный слой поступает в иловую камеру, где происходит метановое брожение. Процесс протекает при температуре окружающей среды, поэтому для созревания осадка требуется от 60 до 120 дней. Большой объем иловой части является основным недостатком двухъярусных отстойников.

**Осветлители-перегниватели** – это комбинированные сооружения, в которых внутри перегнивателя концентрически расположен осветлитель с естественной аэрацией. Достоинством таких сооружений является разделение зон осветления и сбраживания, что исключает попадание осадка в очищенную воду.

**Метантенки** – сооружения, в которых создаются условия для интенсивного анаэробного разложения органического вещества осадков ассоциацией анаэробных микроорганизмов с образованием биогаза (см. гл. 13).

**Аэробная стабилизация.** Аэробной стабилизации может подвергаться уплотненный и уплотненный избыточный активный ил и его смесь с осадком первичных отстойников.

При стабилизации только активного ила процесс можно рассматривать как завершающую ступень очистки сточных вод, когда при минимуме растворенных питательных веществ происходит самоокисление клеточного вещества микроорганизмов. В этом случае продолжительность стабилизации ила составляет 2–5 сут и зависит от возраста ила: чем больше возраст ила, тем короче период стабилизации.

При совместной стабилизации избыточного активного ила и осадка первичных отстойников степень распада органического вещества и продолжительность процесса зависят от многих факторов: соотношения количеств сырого осадка и активного ила, концентрации органических веществ, интенсивности аэрации, температуры и др.

Если в мезофильных условиях подвергается стабилизации смесь неуплотненного ила и осадка первичных отстойников, продолжительность процесса составляет 6–7 сут, если ил перед смешиванием уплотнен – 8–12 сут. Содержание патогенных микроорганизмов и вирусов при этом снижается на 70–90%, однако яйца гельминтов не погибают.

Термофильная стабилизация имеет ряд преимуществ перед мезофильной: меньше продолжительность процесса (2 сут), более глубокое разложение органических веществ, улучшение седиментационных и фильтрационных характеристик осадков, гибель патогенных микроорганизмов, яиц гельминтов, семян сорняков. Однако при повышенных температурах снижается растворимость кислорода в воде и необходимый кислородный режим может быть обеспечен только механическими аэраторами, что в 2–3 раза увеличивает энергозатраты.

Аэробную стабилизацию осадков проводят в сооружениях типа аэротенков глубиной 3–5 м, отстаивание и уплотнение – в илоуплотнителях в течение 1,5–5,0 ч. Влажность уплотненного осадка 96,5–98,5%.

**Анаэробно-аэробная стабилизация.** При сочетании термофильного сбраживания с аэробной минерализацией достигается обеззараживание осадка и хорошие показатели влаготдачи. Если на анаэробной стадии добиваются глубокого разложения органических веществ, то аэробный реактор рассчитывают только на период времени, необходимый для улучшения водоотдачи стабилизированного осадка.

**Компостирование.** Процесс компостирования эффективно идет при влажности осадков, не превышающей 60–80%, оптимальное соотношение углерода и азота составляет  $C : N = (20-30) : 1$ .

Для создания пористой структуры осадка, достижения требуемой влажности и необходимого соотношения углерода и азота, обеспечивающих

проведение процесса в аэробных условиях, осадок смешивают с наполнителем. В качестве разрыхляющей и влагопоглощающей добавки используют древесную муку, опилки, листья, солому, торф и другие подобные компоненты.

В первые 2–3 недели компостирования происходит интенсивное развитие микроорганизмов, температура осадка повышается до 50–80°C, происходит обеззараживание осадка, уменьшение его массы. Далее по мере потребления легкоусвояемых соединений жизнедеятельность микроорганизмов замедляется, температура снижается, развиваются простейшие и членистоногие, материал разрыхляется и постепенно приходит в равновесие с окружающей средой.

Для равномерного прогревания и обеспечения микроорганизмов воздухом в период компостирования требуется 2–3-разовое перемешивание осадка.

В результате процесса получают компост в виде сыпучего материала влажностью 40–50%. Он не имеет запаха, не загнивает.

**Реагентная стабилизация.** Введение реагентов оказывает в основном бактерицидное действие и не влияет на количество биологически разрушаемых органических веществ. Поэтому реагентная стабилизация может применяться как временная мера в том случае, если в сооружениях для основного процесса проводятся профилактические работы, ремонт, реконструкция.

Из реагентов наиболее часто используют негашеную и гашеную известь вследствие ее низкой стоимости. Добавление извести приводит к увеличению значения pH и замедлению или временной остановке процессов жизнедеятельности микроорганизмов, в частности, осуществляющих брожение с образованием дурнопахнущих газов. Содержание патогенных микроорганизмов при известковании существенно снижается, однако только при дозе извести 30% от сухого вещества осадка можно добиться практически полного их исчезновения.

Реагентной стабилизации могут подвергаться жидкие или обезвоженные осадки, при этом известкование обезвоженных осадков оказывает более длительный эффект.

**5.2.3. Кондиционирование осадков.** Осадки, образующиеся на очистных сооружениях, как правило, характеризуются весьма низкими коэффициентами водоотдачи. Для глубокого и быстрого их обезвоживания необходимо изменить структуру осадков таким образом,

чтобы увеличить содержание свободной влаги за счет уменьшения доли связанной, например, при укрупнении частиц.

Процессы подготовки осадков к обезвоживанию называют кондиционированием.

**Промывка** – первая стадия подготовки осадка к обезвоживанию. Промывка применяется только для сброженных осадков, при этом из них удаляются коллоидные частицы и мелкая взвесь. Промывку производят очищенной сточной водой из расчета 2 м<sup>3</sup> воды на 1 м<sup>3</sup> промываемого осадка. Вода отделяется в илоуплотнителе и направляется в сооружение для очистки воды.

**Реагентные методы** предполагают использование коагулянтов и флокулянтов для агрегации коллоидных и мелких нерастворенных частиц осадков.

К недостаткам применения коагулянтов следует отнести их большой массовый расход, высокую коррозионную активность, внесение большого количества балластных веществ. Эти проблемы решаются при использовании флокулянтов.

В Англии, Германии, США применяется **тепловая обработка** осадков перед их обезвоживанием. Сущность метода заключается в прогревании осадков в реакторе в течение определенного времени при температуре 140–200°С.

В процессе тепловой обработки происходит распад органических веществ, в основном белков, их растворение и переход твердой фазы осадков в жидкую. При этом изменяется структура осадков, их зольность, достигаются улучшение водоотдачи и обезвреживание осадков.

Недостатками тепловой обработки являются: сложность конструкции реактора для прогрева осадка; большие энергетические затраты; высокий уровень загрязненности иловой воды (концентрация взвешенных веществ 2000–6000 мг/дм<sup>3</sup>, значение БПК от 5000 до 10 000 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК от 10 000 до 30 000 мг/дм<sup>3</sup>). Подача такой воды в начало очистных сооружений приводит к серьезной дополнительной нагрузке.

**Замораживание и оттаивание осадков** сопровождается изменением их структуры, при этом связанная влага частично переходит в свободную, что приводит к улучшению водоотдачи осадков. Снижение стоимости искусственного замораживания может быть достигнуто за счет уменьшения расхода электроэнергии вследствие рекуперации теплоты, когда оттаивание осадка производится за счет теплоты, выделяемой при замораживании.

Естественное замораживание осадка лучше всего осуществлять на иловых площадках каскадного типа на естественном основании с дренажом и поверхностным удалением талой воды. Объем осадка уменьшается при этом в 5–7 раз.

#### **5.2.4. Обезвоживание осадков.**

**Обезвоживание на иловых площадках.** Иловые площадки предназначены для обезвоживания осадков, образующихся на станциях биологической очистки сточных вод. Это одни из первых сооружений для обработки осадков. Их достоинствами являются простота инженерного обеспечения и легкость эксплуатации. По этой причине до настоящего времени, например, в России 90% образующихся осадков обрабатывается на иловых площадках.

Иловые площадки можно разделить на две основные категории: естественного обезвоживания и сушки и интенсивного обезвоживания и сушки.

**Площадки естественного обезвоживания и сушки.** На таких площадках используются природные процессы испарения и декантации. Это площадки на естественном основании, они проектируются на хорошо фильтрующих грунтах при залегании грунтовых вод на глубине не менее 1,5 м и только тогда, когда допускается фильтрация иловой воды в грунт.

Подсушенный осадок сгребается бульдозерами и отвозится автомашинами, влажность подсушенного осадка 75%.

Наибольшее распространение получили иловые площадки на естественном основании каскадного типа с отстаиванием и поверхностным удалением иловой воды. После слива иловой воды дальнейшее обезвоживание осуществляется путем испарения с поверхности оставшейся влаги.

Существенно ускоряет естественную сушку осадка на иловых площадках процесс ворошения. При этом удаляется растительный покров, разрушается поверхностная корка, что способствует ускоренному подсыханию осадка в летнее время и более глубокому промораживанию в зимнее.

Характерная особенность площадок естественного обезвоживания – их полная зависимость от климатических условий.

**Площадки интенсивного обезвоживания и сушки.** К этой категории относятся площадки, на которых природные процессы видоизменены

и интенсифицированы. Это могут быть площадки с искусственным дренажом, созданием вакуума в дренажной системе, искусственным водонепроницаемым покрытием, подогревом.

Дренажная система иловых площадок обычно включает:

- слой песка высотой 0,15–0,25 м;
- слой гравия высотой 0,20–0,25 м;
- дренажные трубы (керамические, пластмассовые).

Основной проблемой при эксплуатации таких площадок является кольматация дренажа. Она происходит тем быстрее, чем хуже фильтруются осадки, т. е. чем выше в них содержание мелкодисперсных и коллоидных частиц.

За рубежом иловые площадки довольно часто защищают от атмосферных осадков стеклянным покрытием. В условиях холодного и влажного климата это позволяет существенно улучшить работу площадок.

В Дунедине (США, штат Флорида) применяются асфальтированные иловые площадки с центральным дренажом и подогревом. Тепловая энергия, получаемая при сжигании биогаза, используется для нагрева воды, которая циркулирует в трубах, расположенных в заасфальтированной части площадок. Время подсушки осадка на таких площадках составляет в среднем 5 сут.

**Механическое обезвоживание осадков.** Основными недостатками обезвоживания осадков на иловых площадках являются большая площадь занимаемых земельных участков, которых вблизи городов ощущается дефицит, и создание неблагоприятной экологической обстановки вблизи площадок.

Оптимальным методом переработки осадков на сегодняшний день является механическое обезвоживание на вакуум-фильтрах, фильтр-прессах и центрифугах. Производительность фильтров и влажность кека при обезвоживании осадков городских сточных вод приведены в табл. 11.

**Обезвоживание осадков на вакуум-фильтрах.** Поскольку осадки сточных вод вследствие своей структуры способны быстро заиливать фильтровальную ткань, эффективно применение барабанных вакуум-фильтров со сходящим полотном, в которых непрерывно производится регенерация фильтровальной ткани.

Для предотвращения кольматации фильтровальной ткани и получения высокого качества фильтрата используют вспомогательные вещества, которые в виде тонкого слоя намывают на фильтровальную ткань. Производительность фильтра при этом возрастает в 3–4 раза.

В качестве вспомогательного вещества рекомендуются зола, перлит, диатомит и др.

Таблица 11

**Производительность фильтров и влажность кека при обезвоживании осадков городских сточных вод**

Обрабатываемый осадок	Производительность, кг сухого вещества на 1 м <sup>2</sup> поверхности фильтра в час		Влажность кека, %	
	вакуум-фильтр	фильтр-пресс	вакуум-фильтр	фильтр-пресс
Сброженный осадок из первичных отстойников	25–35	12–17	75–77	60–65
Аэробно стабилизированный активный ил Сброженная в мезофильных условиях смесь осадка из первичных отстойников и активного ила	20–25	10–16	78–80	62–68
Сброженная в термофильных условиях смесь осадка из первичных отстойников и активного ила	17–22	7–13	78–80	62–70
Сырой осадок из первичных отстойников	30–40	12–16	72–75	55–60
Смесь сырого осадка из первичных отстойников и уплотненного активного ила	20–30	5–12	75–80	62–75

Кроме барабанных вакуум-фильтров, используются (в основном для обезвоживания осадков производственных сточных вод) ленточные вакуум-фильтры и листовые фильтры.

**Обезвоживание осадков на фильтр-прессах.** Фильтр-прессы применяют для обработки сжимаемых аморфных осадков. По сравнению с вакуум-фильтрами при прочих равных условиях после обработки на фильтр-прессах получают осадки с меньшей влажностью. Фильтр-прессы используют в тех случаях, когда осадок после обезвоживания направляют на сушку или сжигание.

**Центрифугирование осадков.** Данный способ находит все более широкое распространение. Достоинствами этого метода являются простота, возможность управлять процессом и низкая влажность получаемых осадков.

Осадок из первичных отстойников разделяется в центробежном поле лучше, чем сброженная смесь осадка и ила, и значительно лучше, чем активный ил (табл. 12).

Таблица 12

**Эффективность задержания сухого вещества осадка и влажность кека при обезвоживании на центрифугах, %**

Обрабатываемый осадок	Эффективность задержания сухого вещества	Влажность кека
Сырой или сброженный осадок из первичных отстойников	45–55	65–75
Стабилизированная смесь осадка из первичных отстойников и активного ила:		
в аэробных условиях	25–40	65–67
в анаэробных условиях	25–35	70–80
Сырой активный ил при зольности, %		
28–35	10–15	75–85
38–42	15–25	70–80
44–47	25–35	60–75

Центрифугирование осадков производится с использованием реагентов или без них.

При центрифугировании без реагентов образующийся фугат имеет высокие значения БПК, ХПК и содержание взвешенных веществ. Его направляют на сооружения биологической очистки, что увеличивает нагрузку на них.

Применение коагулянтов не дает должного эффекта, поскольку хлопья коагулянтов разрушаются в поле действия центробежных сил.

При использовании флокулянтов катионного типа эффективность задержания сухого вещества увеличивается до 90–95%, фугат имеет невысокий уровень загрязненности. Однако применение флокулянтов сдерживается их дефицитом и стоимостью.

В табл. 13 отражены основные преимущества и недостатки механических методов обезвоживания осадков сточных вод.

**5.2.5. Термическая сушка осадков.** Термическая сушка предназначена для обеззараживания и уменьшения массы осадков сточных вод.

Термической сушке подвергают предварительно обезвоженные на вакуум-филтрах, центрифугах или фильтр-прессах осадки.

Сопоставление методов механического обезвоживания осадков сточных вод

Аппараты, применяемые для обезвоживания	Преимущества	Недостатки
Вакуум-фильтры	Отсутствие быстроизнашивающихся узлов. Сокращение топливно-энергетических расходов на термосушку	Применение реагентов, вакуум-насосов. Необходимость периодической замены фильтровальной ткани. Повышенный расход электроэнергии
Ленточные фильтр-прессы	Отсутствие быстроизнашивающихся узлов. Сокращение расхода электроэнергии. Отсутствие необходимости выделения крупных включений и песка из осадков	По сравнению с вакуум-фильтрами – повышенные топливно-энергетические расходы на термосушку. По сравнению с центрифугами – увеличенные габариты. Необходимость периодической замены фильтровальной ткани
Камерные и рамные фильтр-прессы	Низкая влажность обезвоженного осадка. Сокращение топливно-энергетических расходов на термосушку	Низкая удельная производительность. Повышенный расход реагентов. Периодичность действия. Необходимость замены фильтровального полотна по мере износа
Центрифуги	Компактность установок. Возможность обезвоживания без реагентов	Необходимость извлечения из осадков крупных включений и песка. Необходимость периодической наплавки или замены шнеков. По сравнению с вакуум-фильтрами – повышенные топливно-энергетические расходы на термосушку

Сушка жидких осадков требует большого расхода теплоты на испарение влаги и может быть экономически целесообразна только при сушке небольших объемов осадков, предназначенных для использования, например, в качестве кормовой добавки. В этом случае применяют распылительные сушилки и сушилки со взвешенным слоем.

После термической сушки осадок представляет собой сыпучий материал влажностью 10–50%, незагнивающий, свободный от гельминтов и патогенных микроорганизмов.

Наиболее распространен конвективный способ сушки, при котором тепловая энергия, необходимая для испарения влаги, непосредственно передается высушиваемому материалу теплоносителем – сушильным агентом. В качестве сушильного агента могут применяться топочные газы, перегретый пар или горячий воздух. Поскольку процесс сушки осадков производится при высоких температурах (500–800°C), предпочтительно использование топочных газов. Это позволяет уменьшить габариты сушильных установок.

Применяют сушилки барабанные, ленточные, кипящего слоя, распылительные и сушилки со встречными струями газозвеси.

**5.2.6. Сжигание осадков.** Сжигание осадков осуществляют, если их утилизация невозможна или экономически нецелесообразна. Перед сжиганием осадки механически обезвоживают или подвергают термической сушке либо проводят оба процесса.

В осадках могут присутствовать либо образоваться при сжигании токсичные вещества, что вызывает серьезные трудности при очистке газов перед выбросом в атмосферу.

Процесс сжигания осадков состоит из следующих стадий: нагревание, сушка, отгонка летучих веществ, сжигание органической части и прокаливание для выгорания остатков углерода. Температура в топке печи должна быть в пределах 700–1000°C.

Установки для сжигания осадков должны обеспечивать полноту сгорания органической части и утилизацию теплоты отходящих газов.

### **5.3. Утилизация осадков сточных вод**

**Применение осадков в качестве удобрений.** Осадки сточных вод содержат биогенные элементы (табл. 14), необходимые для развития растений микроэлементы и органические соединения. Поэтому они могут представлять интерес в агротехнике как органическое удобрение и средство для улучшения структуры почвы. Внесение осадков уменьшает кислотность почвы, увеличивает содержание азота, фосфора, гумусовых веществ. Особенно благоприятно действуют на кислые почвы осадки, обработанные известью.

Таблица 14

Содержание биогенных элементов в осадках сточных вод, % от массы сухого вещества

Вид осадка	Содержание биогенных элементов		
	азота общего	фосфора общего (в пересчете на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	калия общего (в пересчете на K <sub>2</sub> O)
Сырой осадок	1,6–6,0	0,6–5,2	0,1–0,6
Сброженный осадок	1,7–7,5	0,9–6,6	0,2–0,5
Активный ил	2,4–10,0	2,3–8,0	0,3–0,4
Смесь осадка первичных отстойников и активного ила	2,0–8,0	1,0–7,0	0,2–0,5

Однако использование осадков сточных вод в качестве удобрения ограничивается рядом *обстоятельств*:

1. Экономически целесообразно транспортировать и применять только осадки, высушенные до влажности 35–45%, объем которых в 2–2,5 раза меньше по сравнению с механически обезвоженными.

2. В большинстве городов и населенных пунктов в городскую канализационную сеть поступает значительная доля производственных стоков. Осадки, выделяемые в процессах очистки таких городских сточных вод, могут содержать токсичные соединения, в том числе соли тяжелых металлов. К примеру, с осадками, которые образуются на Минской очистной станции аэрации, ежегодно вывозятся десятки килограммов цинка и меди, сотни килограммов кадмия, тысячи килограммов свинца и никеля.

3. Высокое содержание микроэлементов (В, Мп, Мо, Со и др.) также оказывает неблагоприятное воздействие на рост растений и качество сельскохозяйственной продукции.

**Применение осадков в качестве кормовых добавок.** Активный ил содержит белок, жиры, витамины, аминокислоты и другие ценные компоненты. После сгущения и сушки в щадящих условиях из него можно получить продукт, по питательной ценности близкий к кормовым дрожжам. Исследования по использованию активного ила в качестве кормовых белково-витаминных добавок проводятся во многих странах. Однако для практической реализации этих разработок требуется проведение обширных физиологических, токсикологических и других исследований на сельскохозяйственных животных.

**Пиролиз осадков.** Это наиболее разработанный процесс промышленной переработки осадков сточных вод. Высокотемпературному нагреву без доступа кислорода осадки могут подвергаться отдельно или вместе с твердыми бытовыми отходами.

В результате пиролиза осадков получается пирокарбон (полукокс), представляющий собой черную массу, легко рассыпающуюся в порошок. Пирокарбон можно использовать в качестве топлива либо для получения азота и фосфора. Количество газообразных продуктов, выделяющихся в процессе пиролиза осадков, составляет 9,0–11,5% от массы сухого вещества. В выделяющихся газах содержатся непредельные углеводороды, сероводород, окись углерода, водород, метан, этан, азот. Теплота сгорания газов составляет около 4000 кДж/м<sup>3</sup>.

*Преимуществами* пиролиза осадков по сравнению со сжиганием являются:

- меньший вынос золы и других загрязнений в атмосферу;
- возможность проведения процесса без применения дополнительного источника топлива (если содержание сухого вещества в осадке превышает 25%).

К *недостаткам* пиролитической переработки следует отнести пожаровзрывоопасность установок и наличие кислотообразующих компонентов в отводимых газах, что требует использования оборудования с высокой коррозионной стойкостью.

#### **5.4. Депонирование осадков сточных вод**

Захоронение осадков сточных вод следует применять только в случае невозможности утилизации по техническим или экономическим причинам. При этом должны быть приняты меры по предотвращению возможных отрицательных воздействий на окружающую среду. Не пригодны для захоронения осадки, содержащие патогенные микроорганизмы, высокотоксичные соединения, выделяющие опасные газы и т. п. Экономически нецелесообразно направлять на захоронение осадки, содержание сухого вещества в которых менее 15%.

Наибольшее распространение получили траншейный и полигонный способы захоронения осадков.

Размещение осадка в траншеях требует выемки грунта. Грунтовые воды должны находиться на глубине, достаточной для выемки грунта и

сохранения прослойки между основанием траншеи и верхним уровнем грунтовых вод. Вынутый грунт используют как изолирующий слой.

Площадки под полигоны для складирования осадков не заглубляются ниже естественного уровня земли, поэтому полигоны можно размещать на территориях с более высоким уровнем залегания грунтовых вод. Для предотвращения их загрязнения следует предусматривать дренажные системы и надежную противодиффузионную систему.

Различают три вида полигонов для захоронения осадков: с размещением осадка в виде насыпей, с послойной укладкой осадка и обвалованные полигоны.

Если содержание сухого вещества в осадках не ниже 20%, то такие осадки на полигонах можно размещать в виде насыпей. Для повышения устойчивости и несущей способности насыпи осадок предварительно смешивают с грунтом.

Для послойной укладки осадка он должен содержать не менее 15% сухого вещества. С целью повышения доли сухого вещества осадок смешивают с грунтом или твердыми бытовыми отходами. Смесь осадка и наполнителя распределяют последовательно ровными слоями толщиной от 0,5 до 1,5 м.

При устройстве обвалованных полигонов на ровной поверхности со всех сторон сооружают валы высотой 3–9 м. По верхней части валов оборудуют пути движения транспорта для выгрузки осадка. Недостатком обвалованного полигона является большое количество жидкости, поступающей в основание полигона, поэтому требуется устройство эффективной дренажной системы на разных уровнях и надежного противодиффузионного экранирующего слоя.

После полной загрузки полигонов и укрытия растительным слоем грунта их поверхность можно использовать для устройства парков, игровых и спортивных площадок.

## Глава 6. ВОДОПОДГОТОВКА

### 6.1. Требования к качеству питьевой воды

Гигиенические требования к качеству питьевой воды устанавливаются Санитарные правила и нормы СанПиН 10-124 РБ 99 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества». Согласно этим требованиям, питьевая вода должна быть безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства.

Безопасность питьевой воды в эпидемическом отношении характеризуется отсутствием в ней болезнетворных бактерий, вирусов и простейших, общее микробное число не должно превышать 50 КОЕ (колонийобразующих единиц) в 1 см<sup>3</sup>.

Безвредность питьевой воды по химическому составу определяется ее соответствием нормативам по обобщенным показателям, содержанию вредных химических веществ, наиболее часто встречающихся в природных водах на территории Республики Беларусь, и веществ антропогенного происхождения (табл. 15), а также содержанию вредных химических веществ, поступающих и образующихся в воде в процессе ее обработки в системе водоснабжения (табл. 16).

### 6.2. Технология водоподготовки

**6.2.1. Источники водоснабжения. Качество природных вод.** Система водоснабжения представляет собой комплекс инженерных сооружений, предназначенных для забора воды из природных источников, улучшения ее качества, транспортирования, хранения и подачи потребителям.

Централизованная система водоснабжения населенных пунктов должна обеспечивать: хозяйственно-питьевое водопотребление в жилых и общественных зданиях; нужды коммунально-бытовых предприятий; хозяйственно-питьевое водопотребление на предприятиях; производственные нужды промышленных и сельскохозяйственных предприятий, где требуется вода питьевого качества или для которых

экономически нецелесообразно сооружение отдельного водопровода; тушение пожаров; собственные нужды станций водоподготовки; промывку водопроводных и канализационных сетей и др.

Таблица 15

**Нормативы обобщенных показателей и наиболее распространенных химических веществ в питьевой воде**

Показатель	Нормативы (ПДК), не более	Показатель вредности	Класс опасности
1	2	3	4
<b>Обобщенные показатели</b>			
Значение pH	6–9	–	–
Общая минерализация (сухой остаток), мг/дм <sup>3</sup>	1000 (1500)	–	–
Жесткость общая, моль/дм <sup>3</sup>	7,0 (10,0)	–	–
Окисляемость перманганатная, мг/дм <sup>3</sup>	5,0	–	–
Нефтепродукты, суммарно	0,1	–	–
Поверхностно-активные вещества (ПАВ), анионоактивные, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	–	–
Фенольный индекс, мг/дм <sup>3</sup>	0,25	–	–
<b>Неорганические вещества</b>			
Алюминий (Al <sup>3+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	с.-т.	2
Барий (Ba <sup>2+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	с.-т.	2
Бериллий (Be <sup>2+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	0,0002	с.-т.	1
Бор (В, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	с.-т.	2
Железо (Fe, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,3 (1,0)	орг.	3
Кадмий (Cd, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,001	с.-т.	2
Марганец (Mn, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,1 (0,5)	орг.	3
Медь (Cu, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	1,0	орг.	3
Молибден (Mo, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,25	с.-т.	2
Мышьяк (As, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	с.-т.	2
Никель (Ni, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,1	с.-т.	3
Нитраты (по NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	45	с.-т.	3
Ртуть (Hg, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,0005	с.-т.	1
Свинец (Pb, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,03	с.-т.	2
Селен (Se, суммарно), мг/дм <sup>3</sup>	0,01	с.-т.	2
Стронций (Sr <sup>2+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	7,0	с.-т.	2
Сульфаты (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	500	орг.	4
Фториды (F <sup>-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	1,5	с.-т.	2
Хлориды (Cl <sup>-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	350	орг.	4

Окончание табл. 15

1	2	3	4
Хром (Cr <sup>6+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	0,05	с.-т.	3
Цианиды (CN <sup>-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	0,035	с.-т.	2
Цинк (Zn <sup>2+</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	5,0	орг.	3
Органические вещества			
γ-ГХЦГ (линдан), мг/дм <sup>3</sup>	0,002	с.-т.	1
ДДТ (сумма изомеров), мг/дм <sup>3</sup>	0,002	с.-т.	2
2,4-Д, мг/дм <sup>3</sup>	0,03	с.-т.	2

*Примечания:* 1. Лимитирующий признак вредности вещества, по которому установлен норматив: с.-т. – санитарно-токсикологический, орг. – органолептический.

2. Величина, указанная в скобках, может быть установлена по постановлению главного государственного санитарного врача соответствующей территории для конкретной системы водоснабжения на основании оценки санитарно-эпидемиологической обстановки в населенном пункте и применяемой технологии водоподготовки.

Таблица 16

**Предельно допустимые концентрации вредных химических веществ, поступающих и образующихся в воде в процессе ее обработки**

Показатель	Нормативы (ПДК), не более, мг/дм <sup>3</sup>	Показатель вредности	Класс опасности
Хлор: остаточный свободный	в пределах 0,3–0,5	орг.	3
остаточный связанный	в пределах 0,8–1,2	орг.	3
Хлороформ (при хлорировании воды)	0,2	с.-т.	2
Озон остаточный	0,3	орг.	1
Формальдегид (при озонировании воды)	0,05	с.-т.	2
Полиакриламид	2,0	с.-т.	2
Активированная кремнекислота (по Si)	10	с.-т.	2
Полифосфаты (по PO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> )	3,5	орг.	3

*Примечания:* 1. При одновременном присутствии в воде свободного и связанного хлора их общая концентрация не должна превышать 1,2 мг/л.

2. В отдельных случаях по согласованию с органами госнадзора может быть допущена повышенная концентрация хлора в питьевой воде.

Забор воды осуществляется из поверхностных или подземных источников либо может быть смешанное водоснабжение. Поверхностными источниками водоснабжения являются реки, водохранилища и озера.

По обеспеченности водными ресурсами Республика Беларусь находится в сравнительно благоприятных условиях. Средний годовой речной сток по стране составляет около  $60 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ , общий объем воды в озерах –  $(6-7) \cdot 10^9 \text{ м}^3$ , в водохранилищах – около  $3 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ . Ресурсы подземных вод составляют около  $16 \cdot 10^9 \text{ м}^3$  в год. В последнее время в структуре общего водозабора в республике доминируют подземные воды (около 57%), которые используют главным образом на удовлетворение коммунально-бытовых потребностей населения, а также нужд пищевой и легкой промышленности. Эксплуатируется более 30 тыс. артезианских скважин и 400 тыс. шахтных колодцев. В основном водозабор осуществляется из неглубоко залегающих (50–200 м) водоносных горизонтов.

Подземные воды содержат в основном природные компоненты – продукты растворения пород, с которыми контактировала данная вода. Состав таких вод относительно стабилен. Воды одного горизонта, отобранные в разных точках, достаточно близки по составу. При этом воды из находящихся рядом скважин, пробуренных в разные горизонты, могут различаться достаточно сильно.

Для формирования состава речной воды имеют значение обмен с окружающей атмосферой, взаимодействие с поверхностными слоями земной коры, большей частью хорошо промытыми, биологические процессы, а также климатические и погодные условия. Воды рек, как правило, имеют невысокую минерализацию, в них всегда находятся атмосферные газы, для речной воды характерно непостоянство состава во времени, а также по длине реки и глубине.

Водоохранилища – это искусственные водоемы, создаваемые с целью более рационального использования природных вод для нужд народного хозяйства. По гидрохимическим особенностям водохранилища близки к озерам, но отличаются от них в силу искусственного происхождения. В верхней части водохранилища, куда впадает река, поддерживается полуречной режим, путем регулирования стока существует возможность управлять водным режимом в водохранилище.

Химический состав озерной воды схож с составом воды рек, впадающих в озеро, и питающих их подземных вод. Однако вследствие замедленного стока в озерах выше испарение, а следовательно, увеличивается минерализация воды.

Следует отметить, что в поверхностных водах наряду с природной составляющей во все большем количестве присутствуют техногенные

загрязнения. Поверхностные воды интенсивно загрязняются отходами сельского хозяйства, промышленности, энергетики, городскими стоками и т. д.

Большинство рек Беларуси в соответствии с индексом загрязнения воды (ИЗВ), в основу которого положены такие параметры, как концентрация растворенного кислорода, БПК, азот аммонийный и нитритный, нефтепродукты и цинк, относится к категории умеренно загрязненных (ИЗВ изменяется от 0,8 до 2,5). Более высокие значения ИЗВ характерны, как правило, для участков рек ниже крупных промышленных центров.

К загрязнению подземных вод приводит попадание в них удобрений и ядохимикатов в местах их складирования и применения, очаговый характер имеют загрязнения в местах промышленных площадок, захоронения промышленных и бытовых отходов, в районах очистных сооружений. Практически повсеместно в подземных водах наблюдается повышенное содержание железа и связанное с этим превышение норм по мутности и цветности, в некоторых скважинах – высокое содержание марганца, нитратного и аммонийного азота, хлоридов, высокая жесткость воды.

**6.2.2. Технология обработки природных вод.** Выбор рациональной схемы обработки воды – довольно трудная задача по причине высоких требований к качеству очистки и сложности состава природных вод.

Методы обработки воды выбираются в соответствии с основными задачами, решаемыми в процессе водоподготовки. *Задачи* эти следующие:

- улучшение органолептических свойств воды (осветление, обесцвечивание, дезодорация и т. д.);
- ликвидация болезнетворных микроорганизмов и вирусов (озонирование, хлорирование, ультрафиолетовая обработка);
- достижение нужного минерального состава, так называемое кондиционирование воды (фторирование или, наоборот, удаление фтора, обезжелезивание, умягчение и т. д.).

Примеси, загрязняющие природную воду, различаются по своей природе (неорганические, органические, биологические), по степени дисперсности, по свойствам. Все разнообразие загрязнений можно разделить на четыре группы.

*Первая группа* – взвешенные вещества, которые могут быть удалены безреагентными методами и с применением реагентов. Использование

реагентов позволяет интенсифицировать процесс: осаждение основной массы взвешенных частиц происходит в течение 2–4 ч, в то время как при безреагентном осаждении это требует нескольких суток.

Во *вторую группу* примесей входят различные гидрофильные и гидрофобные коллоидные системы, высокомолекулярные вещества и детергенты. Они удаляются из воды путем ее обработки коагулянтами, флокулянтами, известью, хлором, озоном и т. д.

*Третья группа примесей* – это растворенные вещества. Они наиболее эффективно удаляются из воды аэрированием, окислением, адсорбцией на активированном угле и других сорбентах, экстракцией органическими растворителями.

*Четвертая группа* объединяет находящиеся в воде электролиты. Для их извлечения лучше всего использовать ионные процессы.

Установки для удаления молекулярных и ионных примесей могут дополнять основные очистные сооружения.

По характеру движения воды в системе подготовки различают безнапорные и напорные технологические схемы очистки. На крупных городских и промышленных водоочистных комплексах вода чаще всего движется самотеком (безнапорная схема), при этом уровень воды в каждом последующем сооружении ниже уровня в предыдущем. При напорной схеме вода движется под давлением; естественно, напорные сооружения должны быть герметичными. Такие схемы используются для небольших объемов воды.

**Реагентное хозяйство.** Для улучшения качества воды применяют большое количество реагентов.

В 30-х гг. прошлого столетия широкое распространение получила обработка коагулянтами, которая и до настоящего времени остается одной из главных стадий очистки на водопроводных станциях.

Вначале выбор коагулянтов был небольшим, в основном использовался сульфат алюминия, позже были получены новые коагулянты: оксисульфат алюминия, оксихлорид алюминия, железные коагулянты, а также коагулянты, являющиеся композиционными смесями солей алюминия и железа.

Серьезным недостатком применения коагулянтов является зависимость процесса от физико-химических параметров и температуры воды. При определенных условиях существует вероятность попадания коллоидных компонентов в резервуар чистой воды. После того как было установлено, что соли алюминия обладают нейротоксичным действием, были

введены ограничения на содержание остаточного алюминия в очищенной питьевой воде.

В настоящее время накоплен положительный опыт использования в процессах водоподготовки водорастворимых синтетических полимерных реагентов – флокулянтов. По сравнению с неорганическими коагулянтами они обладают следующими преимуществами: обеспечивают такой же эффект при значительно меньших дозах и меньшем объеме образующегося осадка, который легче обрабатывать. Флокулянты работают в широком диапазоне рН и щелочности, не изменяют рН очищенной воды, их использование не приводит к увеличению содержания в воде железа и алюминия.

Введение в структуру цепочки водорастворимых полимерных соединений биоцидных фрагментов открывает перспективу для создания реагентов нового поколения, в которых соединяются очень важные для технологии водоподготовки функции дезинфектанта и флокулянта.

В практике водоподготовки наиболее широко распространено дозирование коагулянта в виде растворов или суспензий. Растворы (суспензии) готовят в растворных и расходных баках. С целью интенсификации подготовки в растворных баках применяют барботаж (подачу воздуха), механическое перемешивание или непрерывную циркуляцию раствора с помощью насоса. Насыщенный раствор коагулянта поступает в расходный бак, где смешивается с водопроводной водой до достижения нужной концентрации.

Растворы других веществ (известки, соды, перманганата калия и т. д.) готовят отдельно с учетом свойств данных веществ.

Подача реагентов в воду осуществляется дозировано. Существуют так называемые дозаторы постоянной дозы, регулирующие дозу реагента в зависимости от расхода воды и ее качества; насосы-дозаторы.

Растворы, суспензии и газы могут вводиться как в открытый поток, так и в напорный трубопровод. Сухие реагенты могут дозироваться в открытый водный поток или в дополнительный смеситель, где эти вещества растворяются. Сухие гранулированные или порошкообразные реагенты дозируются шнековыми, ленточными, тарельчатыми, объемными и массовыми дозаторами постоянной дозы.

В последние годы для дозирования реагентов начали использовать плунжерные и винтовые (более производительные) насосы-дозаторы. Реагенты надо быстро и равномерно распределить в массе обрабатываемой воды. Например, неэффективное распределение коагулянта

в воде снижает скорость агломерации примесей и приводит к перерасходу коагулянта.

**Смесители.** Смешивание реагентов с обрабатываемой водой обеспечивают смесительные устройства. Смесители бывают гидравлические и механические.

Гидравлические смесители характеризуются конструктивной простотой и надежностью. Следует отметить, однако, что если количество обрабатываемой воды падает ниже расчетного показателя, то гидросмесители не обеспечивают нужного эффекта смешивания. В группу гидравлических смесителей входят перегородчатые смесители с разделением потока; дырчатые и вертикальные смесители. Самые производительные – перегородчатые смесители коридорного типа с вертикальным или горизонтальным движением воды.

Механические смесители представляют собой круглые или квадратные резервуары с плоским или коническим днищем. Смешивание коагулянта с водой обеспечивают турбинные, пропеллерные и лопастные мешалки на вертикальной оси. Применение механических смесителей позволяет на четверть снизить расход коагулянта, уменьшает время нахождения воды в отстойниках и осветлителях со слоем взвешенного осадка.

**Камеры хлопьеобразования.** Используются для более успешной и полной коагуляции загрязнений. По принципу действия камеры бывают гидравлические, механические (флокуляторы) и аэрофлокуляторы. Все они обеспечивают плавное перемешивание водного потока на завершающей второй стадии коагуляции – хлопьеобразования.

Принцип работы камер гидравлического типа – под действием напора воды. Механические камеры хлопьеобразования (флокуляторы) характеризуются применением механических пропеллерных или лопастных мешалок для плавного перемешивания воды. Преимущества флокуляторов по сравнению с камерами гидравлического типа: меньшая потеря напора, простота конструкции. К недостаткам можно отнести дополнительный расход электроэнергии.

В аэрофлокуляторах повышенное хлопьеобразование достигается путем барботирования воды сжатым воздухом. Параллельно с хлопьеобразованием происходит насыщение воды кислородом и удаление оксида углерода. Равномерное распределение воздуха обеспечивается системой перфорированных труб или ложным дном из пористых материалов.

**Предочистка.** Предочистку воды осуществляют пропуская ее через сетки, ткани, пористые элементы. Процесс проходит или на поверхности (поверхностное фильтрование), или в глубине фильтрующего материала (объемное фильтрование). Выбор того или иного вида обусловлен требуемым качеством фильтрата, свойствами воды и типом примесей, а также экономической целесообразностью.

**Отстаивание.** Отстойники используются для предварительного осветления воды перед ее подачей на скорые фильтры. Содержание примесей в воде после отстойника не должно превышать 8–15 мг/дм<sup>3</sup>.

Горизонтальные отстойники применяются при мутности воды до 1500 мг/дм<sup>3</sup>, цветности до 120 град и производительности водоочистного комплекса не менее 30 тыс. м<sup>3</sup> воды в сутки.

Вертикальные отстойники используют для осветления такой же воды при производительности станции водоподготовки до 5 тыс. м<sup>3</sup> в сутки.

Радиальные отстойники применяют обычно для обработки высокомутных вод и в системах оборотного водоснабжения.

Для осветления воды могут быть использованы также гидроциклоны, в которых выделение механических примесей происходит в процессе вращения воды в аппарате под действием центробежных сил. По сравнению с объемом отстойника объем гидроциклона небольшой, скорость выделения взвеси и процесса осветления высокая. Гидроциклоны стоят недорого и могут служить определенной альтернативой сооружениям предварительного осветления воды. Они, однако, достаточно быстро изнашиваются, а эффект осветления сильно зависит от состава и содержания взвеси в исходной воде.

Осветлители со взвешенным осадком также применяются как сооружения первой ступени водоподготовки, причем обязательна предварительная обработка примесей воды коагулянтom или флокулянтom. Осветлители более производительны, чем отстойники, но их эксплуатация сложнее. Обработываемая вода (с реагентами) подается в осветлитель снизу и проходит через слой уже сформированного взвешенного осадка; вода осветляется в результате контактной коагуляции. Осветленная вода отводится, а извлеченные примеси остаются в слое взвешенного осадка, причем объем самого слоя сохраняется; избыточный осадок непрерывно сбрасывается в водосток.

**Фильтрование.** В большинстве технологических схем водоподготовки фильтрование является завершающим этапом обработки воды. Фильтры бывают с зернистой загрузкой (слой зерен различных материалов),

сетчатые (используются также для предочистки воды), намывные (фильтрующий слой образуется из введенных в воду порошков, накапливающихся на каркасе фильтра), с использованием объемных пористых материалов – пористой керамики и т. д. Доминирующее распространение в коммунальном водоснабжении получили фильтры с зернистыми загрузками.

В зависимости от скорости фильтрации бывают фильтры медленные, быстрые и сверхбыстрые. Медленные фильтры, для которых нужны большие площади и скорость фильтрации в которых чрезвычайно мала, сегодня потеряли свое значение.

В настоящее время наиболее распространены так называемые быстрые фильтры, условием работы которых является обязательная предварительная коагуляция воды. Эти фильтры бывают открытыми, или безнапорными, и напорными. Открытые фильтры используются на крупных городских станциях водоснабжения, движение воды через фильтрующий слой осуществляется благодаря давлению столба воды. В напорных фильтрах воду в движение приводит насос, эти компактные сооружения применяются для автономного водоснабжения отдельных объектов.

Следует выделить фильтровальные сооружения, получившие название контактных осветлителей. В этих аппаратах фильтрация воды происходит в направлении уменьшения крупности зерен фильтрующей среды за счет восходящего фильтрации, снизу вверх. Использование контактных осветлителей в ряде случаев позволяет очищать воду в одну ступень, без сооружений предварительной очистки (отстойников, флотаторов и т. д.). Коагулянт вводят в воду непосредственно перед ее фильтрацией, и процесс коагуляции заканчивается уже в толще фильтрующей загрузки.

Если быстрые фильтры могут работать нормально при содержании взвеси в поступающей воде порядка 5–15 мг/дм<sup>3</sup>, то контактные осветлители справляются с содержанием взвеси в очищаемой воде порядка 120 мг/дм<sup>3</sup> и при цветности 120 град.

В природных водах встречаются загрязнения, для удаления которых не нужна или необязательна обработка коагулянтами. Их убирают обычными зернистыми фильтрами (например, обезжелезивание подземных вод), сорбционными и ионообменными фильтрами (в частности, удаление фенолов, гербицидов). Так, получил распространение простой способ удаления железа – фильтрация с упрощенной системой аэрации, когда доокисление железа происходит не в свободном объеме

воды, а в фильтрующем слое. Аэрация одновременно помогает убрать марганец и сероводород. Фильтры-сорбенты, каталитические и ионообменные фильтры в последние годы активно применяются в водоподготовке.

**Обеззараживание.** Предварительное хлорирование, коагуляция, фильтрование не способны полностью удалить болезнетворные микроорганизмы. Для удаления бактерий в воду вводят дезинфицирующее вещество (например, озон при озонировании воды или соединения хлора при хлорировании).

Самый распространенный метод обеззараживания – **хлорирование** воды. На водоочистных комплексах используют для этого хлорную известь, хлор и его производные. Однако хлор как реагент водоподготовки имеет ряд существенных *недостатков*:

1) хлор и хлорсодержащие соединения обладают высокой токсичностью, что требует строгого соблюдения повышенных требований техники безопасности;

2) хлор воздействует, в основном, на вегетативные формы микроорганизмов. Вирусы, споры и цисты простейших и яйца гельминтов обладают высокой резистентностью к действию хлора;

3) необходимость транспортировки, хранения и применения на водопроводных станциях значительного количества жидкого хлора, а также сбросы этого вещества и его соединений в окружающую среду обусловили высокую экологическую опасность;

4) хлор обладает высокой коррозионной активностью;

5) наиболее существенный недостаток хлора был обнаружен в 1974 г. Он заключается в способности хлора взаимодействовать с органическими веществами природных вод, что приводит к образованию значительного количества высокотоксичных хлорорганических соединений с канцерогенной, мутагенной и тератогенной активностью. Среди них хлороформ, четыреххлористый углерод, бромдихлорметан, дибромхлорметан и другие хлорсодержащие соединения. При хлорировании природных вод образуется 235 только идентифицированных хлорсодержащих органических соединений. Основное количество хлорорганических токсикантов образуется на стадии первичного хлорирования и определяется, в основном, дозами хлора и содержанием органических веществ в природной воде. Основным источником образования хлорорганических соединений в воде на этой стадии являются гуминовые и фульвокислоты, танины, производные фенола, анилина, продукты метаболизма водорослей и др.

Попытки видоизменить технологии хлорирования не привели к существенному исправлению ситуации. В свое время прямой хлорирующий агент был заменен такими соединениями хлора, как диоксид хлора, хлорамин и т. д. Но за 80 лет отношение к методу хлораминизации менялось от сильного всплеска популярности (в 1930-е гг.) до запрещения. Причина в том, что обеззараживающий потенциал хлорамина на порядок ниже, чем у активного хлора. Хотя хлораминизация проходит при небольших концентрациях активного хлора (только в таких условиях можно избежать образования хлороформа и вместе с тем достичь обеззараживания), при снижении температуры воды хлорамин примерно в 5 раз теряет свой биоцидный потенциал (абсолютно неактивен против вирусов, не работает против простейших). Нельзя сказать, что такая вода надежно обеззаражена и эпидемиологически безопасна.

**Озонирование** – метод более дорогой, чем хлорирование. Для обеззараживания используются аппараты – озонаторы, работающие на токе промышленной частоты, а также более компактные и менее металлоемкие высокочастотные озонаторы. Основанием для рассмотрения озона как альтернативы хлору послужили некоторые *преимущества* этого реагента по сравнению с другими окислителями, применяемыми в технологии водоподготовки:

- высокая биоцидная активность озона, особенно к хлоррезистентным бактериям, спорам, вирусам и цистам простейших, что гарантирует высокий уровень обеззараживания воды;

- высокий окислительный потенциал озона позволяет одновременно с обеззараживанием воды снизить ее цветность, содержание железа, марганца, а также устранить запахи и привкусы;

- компактность озонаторных установок и возможность автоматизировать процесс обработки воды.

Однако анализ опыта и результатов использования озона в процессе водоподготовки выявил и существенные *недостатки* этой технологии:

- 1) озонирование природных вод с высоким содержанием органических примесей приводит к образованию продуктов их окисления – более токсичных, чем изначальные загрязнители природных вод. Продукты взаимодействия озона с органическими примесями природной воды, их мутагенность и токсичность вообще недостаточно изучены;

- 2) при озонировании на станциях водоподготовки получают биологически нестабильную воду. Это интенсифицирует рост микроорганизмов в сетях распределения, что значительно ухудшает качество воды,

которая поступает к потребителю: увеличивается цветность, мутность, появляются гнилостные запахи, обусловленные продуктами жизнедеятельности микроорганизмов;

3) из-за того, что озон быстро разлагается в воде и не имеет эффекта длительного действия, при озонировании предусматривается первичное хлорирование природной и обработка хлором очищенной воды. Хлорирование же предварительно озонированной воды сопровождается образованием большого количества высокотоксичных хлорорганических соединений;

4) высокие энергоемкость и стоимость озонаторного оборудования обуславливают высокую стоимость озонированной воды;

5) сам по себе озон более токсичен, чем хлор. Кроме того, он вызывает активную коррозию оборудования, трубопроводов и требует использования более стойких материалов.

**Ультрафиолетовое обеззараживание** воды в последнее время применяется достаточно широко. Недостаток этого метода заключается в том, что эффект обеззараживания кратковременен. Установки ультрафиолетового излучения полезны при их монтаже «на выходе», у потребителя, например, в гостиницах, учреждениях, на предприятиях. Централизованное использование ультрафиолетового обеззараживания неэффективно.

На рис. 17 приведена технологическая схема водоподготовки.

Вода поступает в смеситель перегородчатого типа, где происходит ее смешивание с реагентами: хлором (первичное хлорирование), коагулянтом, известью. На выходе из смесителя в воду дозируется флокулянт. В камерах хлопьеобразования, встроенных в горизонтальные отстойники, осуществляется формирование хлопьев коагулянта. После прохождения камер хлопьеобразования вода направляется в горизонтальные отстойники, где она освобождается от основной массы взвешенных веществ, находящихся в ней.

Осветленная вода из отстойников поступает на фильтрование для окончательной очистки. Тип фильтров – скорые, безнапорные. В качестве загрузки фильтров используется кварцевый песок.

Фильтрованная вода направляется по общему водоводу в контактные камеры блока озонирования, где происходит окисление оставшихся в воде органических соединений. После цикла вторичного озонирования обеззараженная вода приобретает вкус, запах, цветность, свойственные питьевой воде.

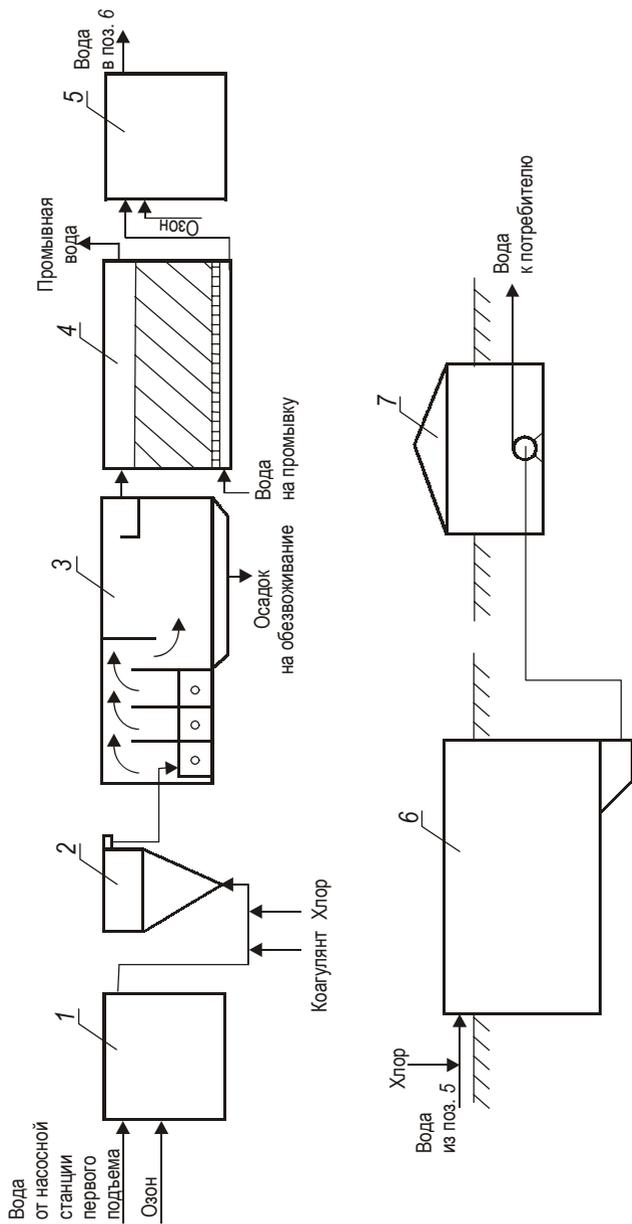


Рис. 17. Технологическая схема подготовки питьевой воды:  
 1 — контактный резервуар первого озонирования; 2 — смеситель; 3 — горизонтальный отстойник со встроенной камерой хлопьеобразования; 4 — скорый фильтр; 5 — контактный резервуар второго озонирования; 6 — резервуар чистой воды; 7 — насосная станция второго подъема

Озонированная вода поступает в резервуар чистой воды. Перед поступлением в резервуар производится контакт воды с хлором (вторичное хлорирование). После этого параметры воды соответствуют требованиям санитарных норм и правил. Из резервуара чистая вода подается в разводящую городскую водопроводную сеть.

### **6.3. Биосорбционная очистка природных и сточных вод**

Поверхностные водоемы все в большей степени загрязняются биорезистентными синтетическими соединениями, часто токсичными, не поддающимися деструкции на биоочистных сооружениях.

В середине 90-х гг. XX в. было объявлено о разработке принципиально нового биотехнологического метода очистки природных и сточных вод, который обеспечивает интенсивное и глубокое удаление биорезистентных и биоразлагаемых органических загрязнений до показателей, не достижимых известными способами биологической очистки.

Новый метод заключается в совмещении в пространстве и во времени процессов сорбции загрязнений на активном сорбенте с их биологическим окислением. Такой процесс получил название биосорбционной очистки, а аппараты для его реализации названы биосорберами. Первоначально этот метод был разработан для глубокой доочистки биологически очищенных сточных вод, обработка которых в биосорбере обеспечивала снижение загрязненности по БПК с 15–20 до 1–2 мг/дм<sup>3</sup> (по нефтепродуктам – до 0,05 мг/дм<sup>3</sup>, по СПАВ – до 0,01–0,05 мг/дм<sup>3</sup>) при времени обработки около 0,4 ч и окислительной мощности биосорбера 1,2–1,4 кг/(м<sup>3</sup> · сут). Последующие широкомасштабные исследования, проведенные более чем с 20 видами промышленных и городских сточных вод, с природными водами, а также с индивидуальными веществами различной степени биоразлагаемости, показали высокую эффективность биосорберов для очистки природной воды от консервативных и биоокисляемых органических загрязнений, а также для интенсивной очистки сточных вод.

Экспериментальные исследования и технологические испытания показали, что биорезистентные загрязнения эффективно удаляются только в присутствии активированного угля. Инертные загрузочные материалы, не обладающие адсорбционной активностью и развитой

микропористой структурой, не обеспечивают деструкцию биорезистентных соединений.

Биосорбционный процесс очистки сточной воды протекает через следующие стадии: адсорбция загрязнений из воды в микропористой структуре сорбента; биохимическая модификация адсорбированных трудноокисляемых веществ в биоразлагаемую форму экзоферментами, иммобилизованными в микропористой структуре активированного угля; десорбция биоразлагаемых продуктов к поверхности частиц сорбента; биологическое окисление этих продуктов на поверхности частиц сорбента микроорганизмами биопленки, которые обеспечивают постоянное биологическое восстановление сорбента, что исключает необходимость его термической регенерации или замены.

Общий эффект биосорбционной очистки сточной воды превышает суммированные эффекты последовательно проведенных операций по сорбционной и биохимической очистке. Количество загрязнений, изъятых активированным углем в процессе биосорбции, часто в 2–10 раз превышает максимальную сорбционную емкость угля в статических условиях. Основным механизмом, ответственным за удаление как биоразлагаемых, так и биорезистентных соединений, является биологическое окисление. Биохимические превращения происходят только с адсорбированным в микропористой структуре сорбента трудноокисляемым субстратом при участии иммобилизованных в этой же структуре экзоферментов микроорганизмов. Отмытые от активированного угля функционирующего биосорбера микроорганизмы теряют способность в свободном состоянии окислять биорезистентные вещества, которые они активно деструктурировали, будучи иммобилизованными на поверхности носителя.

В качестве микроорганизмов-деструкторов загрязнений в биосорберах могут быть использованы специально подобранные штаммы, предварительно закрепленные на сорбенте, или спонтанно развивающиеся в сточной воде микроорганизмы активного ила.

Разработанные конструкции биосорберов колонного типа базируются на применении псевдооживленного слоя частиц активированного угля. В частности, предложен биосорбер в виде колонного реактора (рис. 18), разделенного по высоте на зону псевдооживленного слоя и зону фильтрации в слое гранулированного материала. Биосорбер такой конструкции обладает высокими массообменными характеристиками, обеспечивает устойчивость загрузки против коагуляции, эффективное отделение очищенной воды от загрузочного материала и взвешенных

веществ. Основной процесс деструкции органических загрязнений осуществляется в псевдооживленном слое частиц активированного угля (0,2–1,0 мм) аэробными или анаэробными микроорганизмами, иммобилизованными на поверхности частиц.

После прохождения псевдооживленного слоя жидкость разделяется: циркулирующий поток сточной воды отводится средним водосборным устройством (поз. 5) и через аэратор возвращается в нижнюю водораспределительную систему (поз. 9); очищенная вода (транзитный поток) проходит сквозь щель корпуса и фильтруется через плотный слой частиц угля, где происходит удаление взвешенных и окончательное окисление органических веществ.

Разделение грузочного материала на плотный и псевдооживленный слои осуществляется в динамических условиях при соответствующей организации гидравлических потоков распределения и отбора жидкости в объеме аппарата. По мере накопления в фильтрующем слое взвешенных веществ автоматически производится его промывка с отдельным сбором и отводом промывной воды.

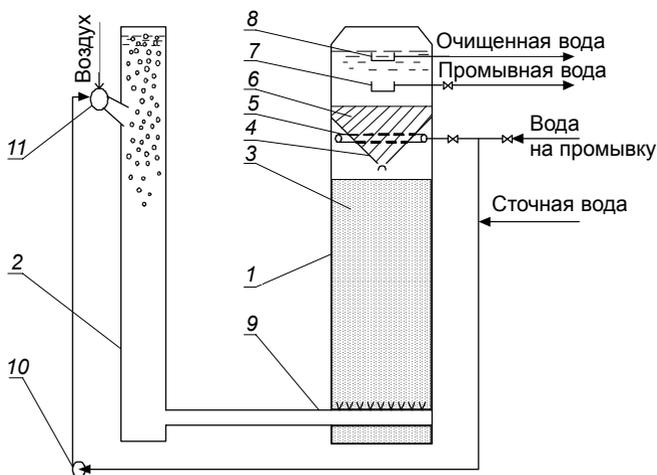


Рис. 18. Схема биосорбера:

1 – биосорбер; 2 – аэрационная колонна; 3 – псевдооживленный слой угля; 4 – конус; 5 – водосборное устройство; 6 – фильтрующий слой угля; 7 – лоток для отвода промывной воды; 8 – лоток для очищенной воды; 9 – водораспределительное устройство; 10 – циркуляционный насос; 11 – эжекционная камера

Устойчивый псевдооживленный слой образуется при линейной скорости движения жидкости в сечении аппарата 30–40 м/ч. Степень расширения слоя загрузочного материала составляет 30–40%. Благодаря наличию на поверхности частиц биопленки не происходит механического истирания угля и обеспечивается интенсивная биологическая регенерация сорбента. Добавка активированного угля в биосорбер не превышает 1% от общей массы сорбента в год.

Применение биосорберов в качестве ступени предварительной очистки природных вод на станции водоподготовки позволяет получить гарантированное качество очистки как от загрязнений природного происхождения (цветность, мутность), так и от специфических веществ антропогенного характера (нефтепродукты, фенолы, пестициды, хлорорганические соединения и др.), что невозможно при использовании традиционных сооружений водоподготовки. Предварительная биосорбционная очистка снижает нагрузку на основные сооружения (особенно в паводковый период), уменьшает расход реагентов, применяемых при водоподготовке, в том числе хлорсодержащего реагента, расходующего на обеззараживание воды. Процессы биологического окисления в микропористой структуре активированного угля могут протекать при низкой температуре (до 1°С).

Биосорберы могут быть использованы в качестве самостоятельных сооружений для биологической очистки сточной воды. При этом окислительная мощность биосорберов в 5–8 раз превышает аналогичный показатель для аэротенков при равной или более высокой степени очистки стоков.

## **Глава 7. ОСНОВЫ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

### **7.1. Обеспечение асептики производства**

В самом общем виде биотехнологический процесс представляет собой превращение субстрата в продукт при участии биологических агентов. Предметом рассмотрения экологической биотехнологии являются такие процессы, в которых:

- субстрат является отходом производства, из которого можно получить ценные продукты (сульфитный щелок, молочная сыворотка, послеспиртовая и ацетонобутиловая барда, отходы растениеводства и животноводства и т. д.);

- субстрат является загрязняющим веществом, уже попавшим в окружающую среду (нефтяные разливы при транспортировке, пестициды, бытовые отходы);

- продуктами являются нетоксичные, поддающиеся деградации в природных условиях соединения, которые могут стать альтернативой химически синтезированным (биопестициды);

- биологические агенты – штаммы микроорганизмов, выделенные из специфических мест обитания, адаптированные к высоким концентрациям токсичных соединений либо полученные методами генетической рекомбинации или геной инженерии. Они способны с высокой эффективностью осуществлять деструкцию ксенобиотиков и поллютантов.

подавляющее большинство продуктов микробного синтеза получают культивированием микроорганизмов в асептических условиях, т. е. когда в ферментационной среде отсутствуют жизнеспособные микроорганизмы (вегетативные клетки, споры), кроме производственного штамма – продуцента целевого метаболита. В связи с этим в асептических биотехнологических производствах обязательными и весьма ответственными являются технологические операции по стерилизации питательных сред, воздуха, оборудования и коммуникаций.

**7.1.1. Стерилизация питательных сред.** Известен ряд способов стерилизации питательных сред: термической обработкой, ультразвуком, ультрафиолетовым светом, гамма-излучением, потоком ускоренных электронов, ультрафильтрацией, токами сверхвысокой частоты, химическими

агентами. Выбор способа стерилизации определяется экономическими факторами (затратами на стерилизацию), лабильностью компонентов питательной среды, сложностью аппаратного оформления процесса, уровнем микробной загрязненности исходной среды. В производственной практике доминирует термическая стерилизация сред, но большие затраты энергии на процесс и высокая термолабильность компонентов питательных сред все чаще обуславливает применение методов «холодной» стерилизации (ультрафильтрация, ионизирующее излучение).

Микроорганизмы сильно различаются по устойчивости к воздействию высоких температур. Вегетативные клетки быстро погибают при температуре 70–100°C, споры бактерий могут выдерживать температуру 120°C в течение нескольких десятков минут. Высокая термическая устойчивость особенно характерна для бактерий рода *Bacillus*. В связи с этим расчет режимов стерилизации питательных сред и оборудования производят по скорости отмирания спор наиболее термически устойчивого штамма *Bacillus stearothermophilus*-1518.

Отмирание клеток (спор) микроорганизмов под воздействием высокой температуры описывается уравнением

$$\frac{dN}{d\tau} = -kN,$$

где  $N$  – число живых клеток в объеме стерилизационной среды ко времени  $\tau$ ;  $\frac{dN}{d\tau}$  – скорость отмирания в данный момент времени;  $k$  – константа скорости отмирания клеток, показывающая, какая часть клеток, выживших ко времени  $\tau$ , отмирает за секунду (отрицательный знак свидетельствует об убыли живых клеток),  $\text{с}^{-1}$ .

При изотермических условиях стерилизации  $k = \text{const}$  и в результате интегрирования уравнения получают выражение для расчета времени стерилизации:

$$\tau = \frac{1}{k} \ln \frac{N_0}{N},$$

где  $N_0$  – уровень микробной загрязненности исходной среды (число клеток и спор в 1 мл среды).

Из формулы следует, что если  $N \rightarrow 0$ , то  $\tau \rightarrow \infty$ , поэтому в расчетах условно принимают уровень нестерильности  $N = 0,01$  (из ста операций по стерилизации среды одна нестерильна).

Расчет констант гибели спор *Bacillus stearothermophilus*-1518 показал, что с повышением температуры стерилизации константа стремительно растет. Например, при повышении температуры со 120 до 130°C константа отмирания увеличивается на порядок. Рост константы гибели спор значительно опережает рост констант реакций разложения термолабильных компонентов питательных сред (витаминов, аминокислот, углеводов и др.). Следовательно, для максимального сохранения полезных компонентов среды стерилизацию необходимо проводить при высоких температурах и коротком времени термообработки. В производственных условиях чаще всего используют температурный режим 120–135°C при продолжительности термообработки среды в установке непрерывной стерилизации (УНС) 10–30 мин. Стерилизация при температуре более 140°C экономически нецелесообразна из-за возрастающих затрат на оборудование, теплоноситель и охлаждающую воду.

Применяют два метода стерилизации: периодический и непрерывный. Периодическим методом стерилизуют небольшие объемы питательных сред (до 10 м<sup>3</sup>) непосредственно в ферментаторах. Этот метод широко используют при накоплении чистой культуры в инокуляторах и посевных аппаратах, когда востребовано главное достоинство метода – высокая надежность стерилизации. Из-за длительности процессов нагрева и охлаждения среды, приводящих к ухудшению ее качества, периодический метод непригоден для стерилизации больших объемов сред. В этом случае применяют непрерывную стерилизацию в специальной установке (УНС), основными элементами которой являются нагреватель, выдерживатель и теплообменник для охлаждения среды (рис. 19). Компоненты среды смешивают в емкости, обогреваемой глухим паром, при температуре 80–85°C, ускоряющей растворение веществ в воде. Необходимое условие успешной стерилизации – тщательная гомогенизация среды: в крупных частицах из-за медленного прогрева могут сохраниться споры, способные инфицировать культуральную жидкость. Такие частицы задерживаются фильтром.

Нагреватель предназначен для быстрого (в течение нескольких секунд) непрерывного нагревания среды до температуры стерилизации путем прямого смешения с острым паром.

Выдерживатель трубчатого типа (диаметр труб 0,4–0,6 м) обеспечивает движение среды в режиме идеального вытеснения и пребывания ее при температуре стерилизации в течение заданного времени. Общая длина труб выдерживателя определяется временем стерилизации среды.

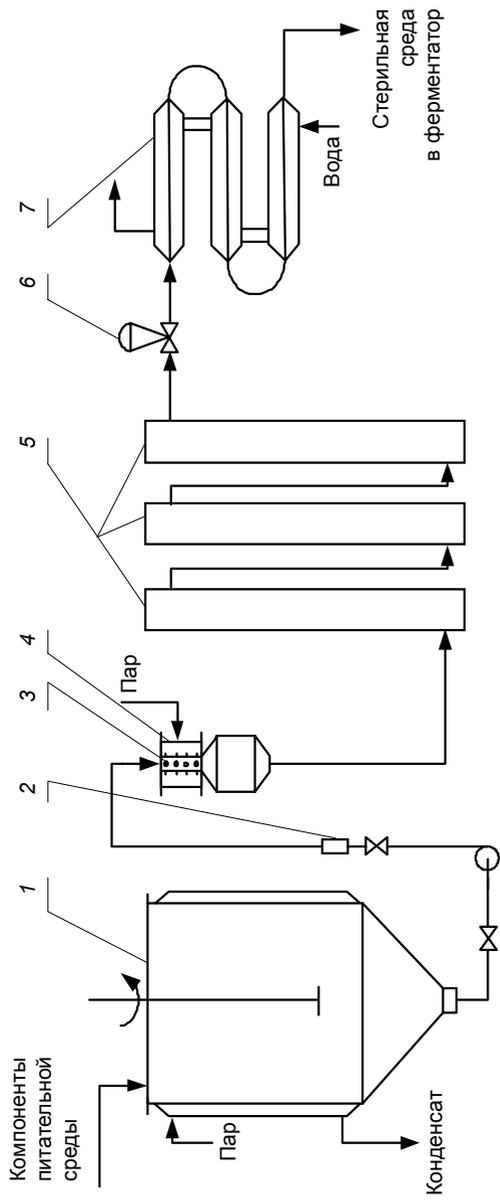


Рис. 19. Установка непрерывной стерилизации питательной среды.

1 – емкость для приготовления среды; 2 – сетчатый фильтр; 3 – перфорированный цилиндр нагревателя; 4 – нагреватель; 5 – выдерживатель; 6 – регулятор давления; 7 – холодильник

Главное требование к теплообменнику для охлаждения среды – герметичность, гарантирующая сохранение стерильности. Этому требованию в наибольшей степени соответствует теплообменник типа «труба в трубе», который имеет минимальное количество разъемных соединений, являющихся потенциальными точками проникновения инфекции. Сохранение стерильности настолько важно, что серьезные недостатки трубчатого теплообменника: низкий коэффициент теплопередачи, громоздкость при малой пропускной способности – в расчет не принимаются.

Типовые конструкции УНС рассчитаны на производительность по стерильной среде 5, 10, 20, 50, 100 и 300 м<sup>3</sup>/ч. Стерилизацию среды осуществляют непосредственно при загрузке ее в ферментатор. Производительность установки выбирают такой, чтобы продолжительность загрузки ферментатора не превышала часа.

Термообработка сложных по составу сред может привести в некоторых случаях к взаимодействию компонентов (например, аминокислот с углеводами) с образованием продуктов (в данном примере меланоидинов), не ассимилируемых микроорганизмами и даже ингибирующих их рост. В этом случае растворы взаимодействующих компонентов готовят в отдельных емкостях и стерилизуют их поочередно.

Следует отметить, что жиры, масла и синтетические поверхностно-активные вещества, используемые в составе питательных сред в качестве пеногасителей, обволакивают споры и клетки микроорганизмов и повышают их термостабильность в 2–3 раза. Учитывая это обстоятельство, пеногасители не вводят в состав исходной среды, а стерилизуют в отдельном аппарате (бачке), обогреваемом глухим паром, в жестких условиях: при температуре 140°C в течение 1,5–2,0 ч. Охлажденный стерильный пеногаситель хранят под давлением стерильного воздуха и при необходимости передают непосредственно в ферментатор.

**7.1.2. Получение стерильного воздуха.** В аэробных ферментационных процессах воздух не только обеспечивает потребность культивируемых микроорганизмов в кислороде, но и отводит газообразные продукты метаболизма и тепло, выделяемое микроорганизмами в процессе жизнедеятельности, а также осуществляет гомогенизацию питательной среды и микробной суспензии. Кроме того, стерильный сжатый воздух используется как транспортирующий агент при передаче питательных сред и микробных суспензий из одной емкости в другую.

В асептических производствах очистке от микроорганизмов подлежит не только воздух, подаваемый в ферментатор, но и отработанный воздух, удаляемый из ферментационной системы.

В 1 м<sup>3</sup> атмосферного воздуха содержится в среднем 0,2–1,0 мг/м<sup>3</sup> мелкодисперсных частиц органического и неорганического происхождения, в том числе 1000–10 000 клеток и спор микроорганизмов. Содержание микроорганизмов в воздухе зависит от времени года, погодных условий, высоты и ряда других факторов. В зимнее время и с увеличением высоты микробная загрязненность воздуха убывает.

Подаваемый в ферментатор воздух должен быть полностью очищен от частиц и микроорганизмов размером до 1 мкм. Большинство известных методов очистки и стерилизации газов («мокрая» очистка, электрофильтры, термообработка и др.) не могут гарантировать такую глубокую очистку воздуха. В зарубежной и отечественной практике получил распространение метод фильтрации воздуха через волокнистые (синтетические ткани, стекловолокно, картон), пористые (поливиниловый спирт, фторопласт) и зернистые (металлокерамика) материалы. Фильтрующий материал должен отвечать следующим требованиям: гидрофобность, устойчивость к температуре при стерилизации, высокая эффективность очистки воздуха, относительно небольшое гидравлическое сопротивление и невысокая стоимость. Наиболее распространенные фильтрующие материалы представлены в табл. 17.

Таблица 17

Свойства фильтрующих материалов

Материал	Диаметр волокон или пор, мкм	Масса 1 м <sup>3</sup> , кг	Термостойкость, °С	Гидравлическое сопротивление, Па	Эффективность по масляному туману, %
Стекловолокно	2,5–3,0	0,40	400	8	98,56
Базальтовое супер-тонкое волокно	1	0,56	600	100	99,92
Картон базальтовый	1	0,30	150	61	99,93
Картон целлюлозный	20	0,36	150	59	94,10
Фторопласт	25	3,60	260	200	99,97
Полиэтилен	50	2,25	80	58	94,80
Поливиниловый спирт (фильтр «Эко», Япония)	25	1,07	150	139	99,00

Технология получения стерильного воздуха (рис. 20) включает трехступенчатую фильтрационную очистку с отделением сконденсированных в охлажденном сжатом воздухе паров влаги.

Атмосферный воздух забирается на высоте 6–20 м и для защиты нагнетателя от преждевременного износа очищается от крупных частиц пыли в фильтре предварительной очистки. Сжимаемый нагнетателем воздух (давление 0,2–0,3 МПа) разогревается до 100–180°С. Часть горячего воздуха охлаждается в воздушном (или водяном) теплообменнике до 30–35°С, в результате чего конденсируются содержащиеся в воздухе водяные пары. Конденсат удаляется из системы, и общее содержание влаги в воздухе уменьшается на 50–70%. Ресивер сглаживает колебания расхода воздуха. В головном фильтре воздух очищается от микробных клеток не менее чем на 98% (число клеток не должно превышать 10 на 1 м<sup>3</sup> очищенного в фильтре воздуха). Окончательная стерилизующая очистка воздуха осуществляется в индивидуальных фильтрах тонкой очистки (ФТО), которыми оснащен каждый ферментатор.

Фильтры каждой ступени очистки воздуха имеют различное устройство. На стадии предварительной очистки используют кассетные сухие (или промасленные) фильтры. Единичный фильтр имеет прямоугольный корпус с площадью рабочего сечения 0,22 м<sup>2</sup>, в котором закреплены 10–15 слоев гофрированной стальной сетки (фильтр Рекке). Пропускная способность фильтра 1540 м<sup>3</sup>/ч. Из единичных фильтров можно собрать фильтрующие панели на любую производительность по очищаемому воздуху.

Пылеемкость и производительность фильтров увеличиваются, если стальные сетки покрывают масляной пленкой. Но регенерация масляных фильтров требует значительных затрат ручного труда. Мельчайшие капельки масла уносятся воздухом в виде тумана, воздух приобретает запах, что часто недопустимо в микробиологических производствах.

На заводах большой мощности отдают предпочтение рулонным автоматическим фильтрам производительностью 20–120 тыс. м<sup>3</sup>/ч, в которых фильтрующий материал в виде упругого слоя из стекловолокна поступает непрерывно с малой скоростью (или периодически через определенные паузы в автоматическом режиме) с одной катушки, а загрязненный наматывается в таком же режиме на другую катушку. Один рулон может быть рассчитан на работу в течение года.

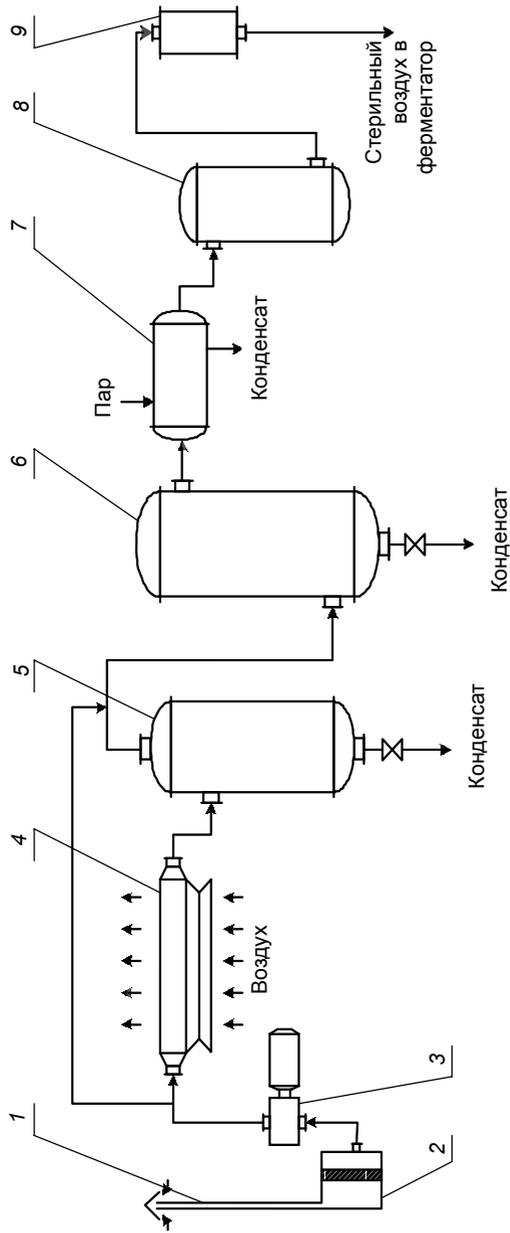


Рис. 20. Технологическая схема очистки и стерилизации воздуха:  
 1 – воздухозаборник; 2 – фильтр предварительной очистки; 3 – нагреватель воздуха; 4 – воздушный холодильник;  
 5 – влагоотделитель; 6 – ресивер; 7 – подогреватель; 8 – головной фильтр; 9 – индивидуальный фильтр

Головной фильтр представляет собой вертикальную цилиндрическую емкость со съемной крышкой и установленными внутри опорной (нижней) и прижимной (верхней) решетками, между которыми помещается волокнистый фильтрующий материал – стекловолокно или базальтовое волокно (или слои из этих волокон). Базальтовое волокно получают из магматической горной породы, оно отличается более высокой термостойкостью, большей механической прочностью и меньшим раздражающим действием на кожу человека. Производительность типовых головных фильтров по воздуху составляет 110, 380 и 550 м<sup>3</sup>/мин.

При набивке фильтра используют средства индивидуальной защиты, а фильтрующий материал смачивают водой, чтобы уменьшить пыление. После набивки фильтр стерилизуют острым паром при температуре 125–135°С в течение 1,5–2,0 ч, а затем подсушивают горячим очищенным воздухом в течение 3 ч. В процессе эксплуатации головные фильтры стерилизуют не реже 1 раза в месяц, а перенабивку фильтров производят не реже 1 раза в год (фильтрующий материал не регенерируется). При проектировании обязательно предусматривают резервный головной фильтр.

Фильтры тонкой очистки устанавливают к каждому ферментатору. Они обеспечивают стерильность воздуха. В последние годы получили распространение ФТО со сменными фильтрующими элементами, изготовленными из фторопласта, базальтового картона, многослойной термостойкой ткани.

Перспективно использование фильтрующих патронов из металлокерамики, прессованного металлического порошка (нержавеющая сталь, титан). Конструкция фильтров позволяет быстро заменить фильтрующий элемент, имеющий небольшие размеры (диаметр 200–400 мм, высота 400–800 мм). ФТО стерилизуется острым паром одновременно со стерилизацией ферментатора перед каждой загрузкой аппарата. Типовой ряд фильтров – ФТО-60, ФТО-100, ФТО-500, ФТО-750, ФТО-1000, ФТО-2000, где цифры указывают производительность по воздуху (м<sup>3</sup>/ч).

Температура воздуха на выходе из ФТО должна составлять 40–60°С. При необходимости очищаемый воздух подогревается в теплообменнике (см. рис. 20). Повышенная температура воздуха в совокупности с операцией по частичному удалению из сжатого воздуха водяных паров должна исключить конденсацию влаги в головных и индивидуальных фильтрах, так как при увлажнении фильтрующего материала резко снижается эффективность очистки воздуха.

## 7.2. Очистка отработанного воздуха, выводимого из ферментаторов

Удаляемый из ферментатора воздух обладает влажностью около 100% и имеет в своем составе капельную влагу в количестве 40–60 г/м<sup>3</sup>, содержащую живые клетки микроорганизмов – продуцентов биологически активных веществ. Современные требования по охране труда и окружающей среды предписывают очистку отработанного воздуха перед выбросом в атмосферу от микробных клеток.

Отделение от воздуха капельной влаги приводит к удалению с жидкостью до 90% микробных клеток. В связи с этим на практике для очистки отработанного воздуха используют систему «циклон + фильтр сетчатый». Циклон выполняет функции каплеотделителя, а фильтр, представляющий собой многослойный тканевый патрон из тонких стальных нитей, обеспечивает доочистку воздуха.

При очистке отработанного воздуха, имеющего высокую влажность, хорошо зарекомендовали себя металлокерамические фильтры, которые применяются в виде парного автоматизированного комплекса: один фильтр рабочий, другой – регенерируется продувкой паром. Переключение фильтров осуществляется в автоматическом режиме при увеличении гидравлического сопротивления фильтра до определенной (заданной) величины. Каждый ферментатор оборудуется автономной системой очистки отработанного воздуха, что исключает передачу инфекции по коммуникациям из одного ферментатора в другой.

## 7.3. Ферментация

В промышленной биотехнологии микроорганизмы культивируют поверхностным или глубинным (суспензионным) методами. Поверхностный метод отличается трудоемкостью, из-за чего получил ограниченное распространение. Чаще всего этим методом выращивают мицелиальные грибы (в тонком слое сыпучих или жидких сред), используемые для получения лимонной кислоты и ферментных препаратов.

При глубинном культивировании клетки суспендированы и находятся во взвешенном состоянии в объеме жидкой питательной среды. Глубинный метод пригоден для выращивания как аэробных, так и анаэробных культур и имеет ряд очевидных *преимуществ* перед поверхностным:

1) позволяет исключить непроизводительный ручной труд и значительно уменьшить производственные площади под ферментационные аппараты;

2) обеспечивает высокий уровень стерильности процесса;

3) улучшает гигиену труда;

4) упрощает автоматизацию производства;

5) дает возможность осуществлять непрерывный процесс ферментации;

6) обеспечивает более полное использование питательных веществ среды.

Аппараты для глубинного культивирования микроорганизмов отличаются большим разнообразием конструкций, что особенно характерно для производств по выращиванию продуцентов белка. Тем не менее существуют типы ферментаторов, которые занимают доминирующее положение в отрасли. Например, в производстве кормовой биомассы микроорганизмов на средах с растворенным субстратом широко применяются малоэнергоёмкие ферментаторы эрлифтного типа, в которых перемешивание среды (диспергирование газовой и жидкой фаз) происходит только за счет энергии вводимого воздуха с использованием принципа эрлифта, обеспечивающего циркуляцию жидкости вокруг направляющего диффузора (или циркуляционной трубы) благодаря разности плотностей между увлекаемой (насыщенной) воздухом жидкостью внутри диффузора и дегазированной жидкостью (вне диффузора).

В асептических производствах широко применяются ферментаторы барботажного типа с механическим перемешиванием ферментационной среды. На отечественных предприятиях используют ферментаторы объемом до 100 м<sup>3</sup> (15, 50, 63, 100 м<sup>3</sup>), за рубежом – до 300 м<sup>3</sup>. В связи с необходимостью строгого соблюдения требований стерильности ферментацию осуществляют в периодическом режиме со стерилизацией ферментатора и коммуникаций после каждой операции по выращиванию микроорганизмов. Выбор объема аппарата определяется не только мощностью производства по целевому метаболиту, но и достигнутым уровнем асептики производства. Нестерильная операция в ферментаторе большой емкости приводит к потере значительного количества питательной среды, часто содержащей дорогостоящие компоненты.

Ферментатор представляет собой герметичную цилиндрическую емкость из нержавеющей стали со сферическими крышкой и дном.

(рис. 21). Аппарат оборудован перемешивающим устройством в виде 1–3-ярусной мешалки (чаще турбинного типа), барботером для подачи воздуха и коммуникациями для ввода питательной среды, посевного материала, пеногасителя, нейтрализующего агента и вывода обработанного воздуха.

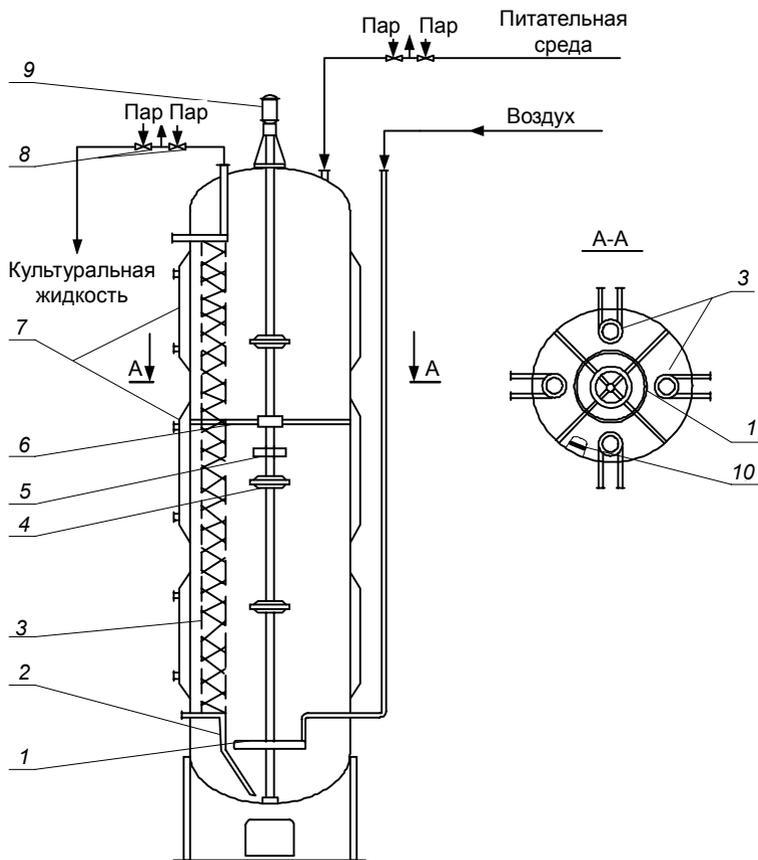


Рис. 21. Ферментатор емкостью 100 м<sup>3</sup>:

- 1 – кольцевой барботер; 2 – пережимная труба; 3 – змеевиковый теплообменник;  
 4 – турбинная мешалка; 5 – соединительная муфта; 6 – крепление вала;  
 7 – секционная водяная рубашка; 8 – паровый затвор; 9 – электропривод; 10 – лестница

В процессе ферментации выделяется большое количество тепла в результате жизнедеятельности микроорганизмов (биологическое тепло) и за счет работы мешалки. Охлаждение среды до оптимальной температуры производится с помощью наружной секционной водяной рубашки ферментатора и внутренних змеевиковых теплообменников. При необходимости охлаждающие устройства используются в качестве греющих при стерилизации ферментатора и питательной среды. Современные ферментаторы укомплектованы регулируемыми устройствами и контрольно-измерительными приборами (автоматическое регулирование температуры, рН ферментационной среды, расхода воздуха, уровня пены, а также контроль давления, уровня жидкости, температуры и рН среды).

Перед каждой загрузкой ферментатора питательной средой производят подготовку его к работе, которая включает ряд последовательных операций.

После слива культуральной жидкости ферментатор промывают водой с помощью специальной моечной машинки, прогревают острым паром до температуры 100°С и охлаждают до 30–40°С. Используя люк-лаз, производят внутренний технический осмотр аппарата: проверяют состояние соединительных муфт вала, мешалок, барботера и устраняют обнаруженные дефекты. Затем ферментатор герметизируют и создают воздушное давление в аппарате 0,10–0,15 МПа. С помощью мыльного раствора проверяют на герметичность все фланцевые соединения, сварные швы и сальниковые уплотнения запорной арматуры. Если аппарат и прилегающие коммуникации герметичны, то осуществляют их стерилизацию. Ферментатор нагревают путем подачи острого пара через все входные и выходные коммуникации до 100–104°С при открытом выходе на линии отработанного воздуха, затем закрывают вентиль на выходе воздуха и продолжают нагрев до температуры 130–135°С, при которой производят выдержку в течение 1–2 ч. Одновременно с ферментатором стерилизуют фильтр тонкой очистки воздуха и пеногаситель в бачке.

Эффективность стерилизации оборудования оценивают по величине критерия Дейндорфера:

$$D = k\tau,$$

где  $k$  – константа скорости отмирания микроорганизмов, мин<sup>-1</sup>;  $\tau$  – продолжительность стерилизации аппарата в изотермическом режиме, мин.

Условия стерилизации выбирают такими, чтобы величина критерия Дейндорфера составляла не менее 80.

По окончании стерилизации в ферментатор подают стерильный воздух, а в охлаждающие системы – холодную воду. Через УНС в ферментатор загружают стерильную питательную среду. В аппарате постоянно поддерживают давление воздуха 20–30 кПа, чтобы исключить проникновение инфекции в ферментатор с наружным воздухом. С этой же целью все незадействованные в процессе ферментации коммуникации защищаются паровыми затворами.

Коэффициент заполнения питательной средой геометрического объема ферментатора составляет 0,6–0,7. Свободное пространство используется для компенсации повышения уровня среды за счет увеличения газосодержания при аэрации и для регулирования уровня пены. В процессах ферментации наличие пены, с одной стороны, способствует интенсификации массообмена и увеличивает концентрацию кислорода в среде. С другой стороны, интенсивное пенообразование уменьшает полезный объем ферментатора. На практике уровень пены в аппарате постепенно возрастает от 0 до максимально допустимой величины, при достижении которой автоматически включается система пеногашения.

Наибольшее распространение получили химические и механические способы пеногашения. Механические методы основаны на ударном воздействии на пену твердой поверхности (вращающийся гладкий диск, «беличье» колесо, пакет конических тарелок). В качестве химических пеногасителей применяют растительные масла (соевое, арахисовое), жиры животного происхождения (рыбий и свиной жир), синтетические поверхностно-активные вещества, например, органический полиэфир – пропинол Б-400. Для гашения пены в ферментаторах чаще всего используют предварительно простерилизованные химические пеногасители (пропинол Б-400), которые автоматически дозируются в ферментационную среду в виде водной эмульсии (соотношение пеногаситель : вода = 1 : 5–1 : 8) по сигналу датчика уровня пены в аппарате.

Несмотря на непрерывное совершенствование конструкции, современные биореакторы обладают такими недостатками, как недостаточно высокая скорость растворения кислорода в ферментационной среде, ограниченные возможности по отводу биологического тепла.

#### **7.4. Концентрирование, выделение и сушка продуктов микробного синтеза**

Культуральная жидкость представляет собой сложную смесь, содержащую микробные клетки, продукты метаболизма, остатки компонентов питательной среды, пеногаситель.

Технология получения продуктов микробного синтеза из культуральной жидкости зависит от происхождения и товарной формы биопрепарата. Различают следующие группы препаратов: на основе инактивированной биомассы клеток (кормовые препараты белков, аминокислот, антибиотиков и т. д.), на основе очищенных продуктов метаболизма микроорганизмов (ферменты, антибиотики, витамины, органические кислоты и др.), препараты в виде жизнеспособных микроорганизмов (бактериальные удобрения, средства защиты растений, закваски и др.). Товарными формами биопрепаратов являются жидкие концентраты (45–50% сухого вещества), пасты (20–40% влаги), кристаллические вещества (1,5–5,0% свободной влаги), сухие порошкообразные и гранулированные продукты (8–11% влаги). Себестоимость жидких концентратов и паст значительно ниже, чем сухих продуктов.

Целевым продуктом биосинтеза может быть непосредственно микробная масса либо продукты метаболизма микроорганизмов, растворенные в межклеточной жидкости или находящиеся внутри клеток. Иногда целевые метаболиты могут находиться одновременно и внутри клеток, и в межклеточной жидкости.

Низкая концентрация биомассы и метаболитов в культуральной жидкости обуславливает необходимость проведения ряда последовательных операций по концентрированию и очистке целевого компонента. Количество операций возрастает с повышением требований к чистоте продукта. Общая схема переработки культуральной жидкости представлена на рис. 22.

В большинстве производств переработка культуральной жидкости начинается с отделения микробной массы. Для этого применяют осаждение в поле центробежных сил (сепарацию, центрифугирование); фильтрацию; флотацию; обработку культуральной жидкости коагулянтами ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), флокулянтами полисахаридной природы или синтетического происхождения (высокомолекулярными полиэлектролитами), гелеобразующими агентами (суспензия  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_3\text{PO}_4$ ) с последующим отделением осадка фильтрованием.

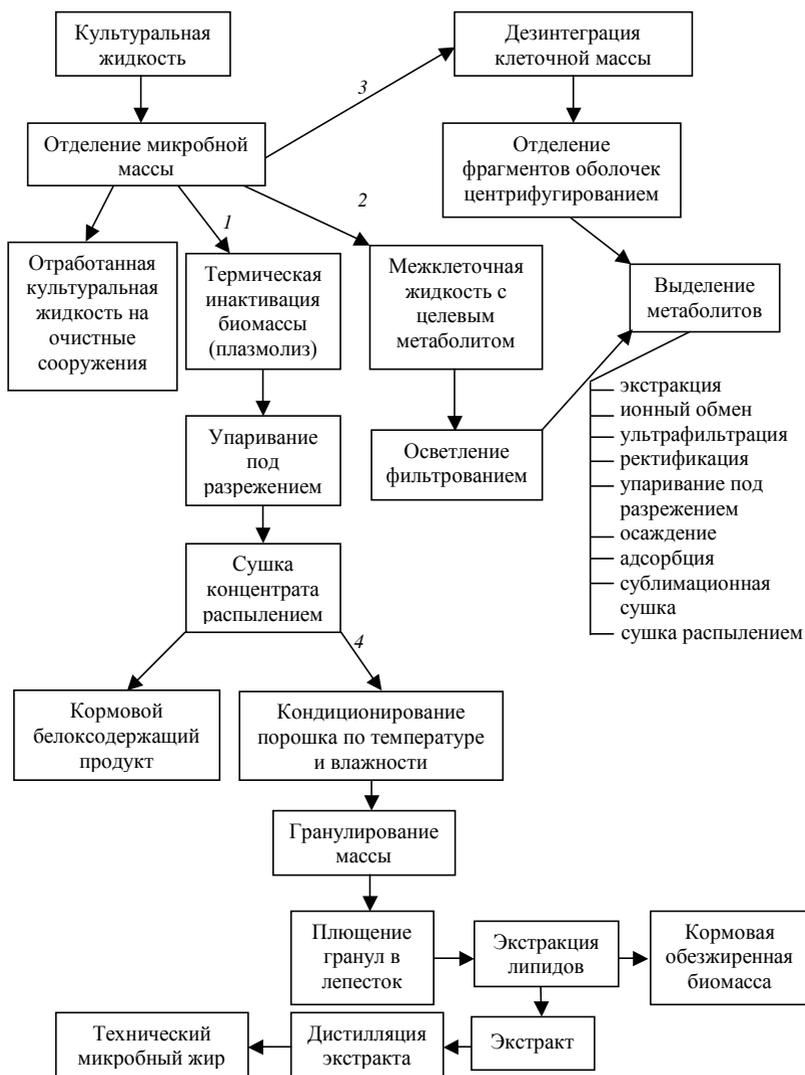


Рис. 22. Общая схема переработки культуральной жидкости:  
 1 – производство кормовой биомассы; 2 – целевой продукт – экзометаболит;  
 3, 4 – целевой продукт – эндометаболит

По современным представлениям поверхность клеток микроорганизмов имеет мозаичную структуру, сформированную из катионных и анионных групп. На одну клетку приходится  $10^6$ – $10^7$  положительных и  $10^7$ – $10^8$  отрицательных зарядов, т. е. клетки большинства микроорганизмов имеют избыточный отрицательный заряд. Высокие значения плотности поверхностного заряда клеток приводят к их электростатическому отталкиванию, что является одной из причин агрегативной устойчивости микробных суспензий, которые можно рассматривать как биокolloидные системы. Кроме того, клетки микроорганизмов являются типичными лиофильными объектами, для которых характерно взаимодействие с дисперсионной средой, приводящее к образованию сольватных оболочек, что также обуславливает агрегативную устойчивость биокolloидов.

Обработка микробной суспензии коагулянтами, флокулянтами, гелеобразующими агентами позволяет не только дестабилизировать биокolloидную систему и осадить клетки, но и очистить содержащую целевой метаболит межклеточную жидкость от балластных примесей (белков, красящих веществ и др.).

Фильтруемость культуральной жидкости зависит от ряда факторов: вида микроорганизма-производителя (размера и структуры клеточных образований), состава питательной среды и степени потребления компонентов, длительности ферментации. Присутствие в значительном количестве неассимилированных питательных веществ, жиров, применяемых в качестве пеногасителя, а также лизис клеток в результате продолжительного культивирования негативно влияют на скорость фильтрации.

Мицелий грибов, имеющий нити диаметром 10–40 мкм, отделяется от жидкой фазы фильтрованием без особых затруднений. Тонкие (0,2–1,0 мкм) нити мицелия актиномицетов забивают поры фильтрующего материала и образуют осадок с высоким гидравлическим сопротивлением. Поэтому культуральные жидкости после выращивания актиномицетов, бактерий подвергают специальной обработке. Наиболее распространенные приемы улучшения фильтруемости – тепловая коагуляция при 70–75°C (вызывает денатурацию и коагуляцию белков, что снижает сопротивление осадка), обработка полиэлектролитами, добавление реагентов, образующих малорастворимые осадки ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_3\text{PO}_4$ ), предварительное нанесение на фильтрующий материал намывного слоя из перлита или древесной муки толщиной 5–50 мм.

Чаще других применяются барабанные вакуум-фильтры и фильтр-пресс ФПАКМ. Важнейшим достоинством фильтр-пресса является низкая влажность получаемого осадка (около 60%).

Широкое распространение получил сепарационный метод концентрирования микробных (прежде всего дрожжевых) суспензий. Он позволяет с высокой скоростью обрабатывать большие объемы трудно-фильтруемой культуральной жидкости.

Заслуживает внимания флотационный способ сгущения дрожжевой суспензии, при котором концентрирование дрожжей достигается за счет перехода клеток в пену в результате продувки суспензии мелко-диспергированным воздухом. Флотационный способ концентрирования дрожжей имеет ряд преимуществ перед сепарационным: простота и доступность оборудования, низкие энергозатраты на процесс, повышение качества продукта за счет отделения нефлотирующихся примесей. Однако не все дрожжевые культуры обладают достаточной флотационной способностью, которая зависит от физиологических особенностей штамма и химического состава культуральной жидкости. В связи с этим флотация находит ограниченное применение, например, для концентрирования дрожжей *Candida scottii* (продуцентов белка), выращенных на гидролизном сусле.

При производстве биопрепаратов на основе инактивированной биомассы клеток широко используют упаривание культуральной жидкости в трех-, четырехкорпусных выпарных установках до содержания сухих веществ в концентрате 20–45%. Целевые продукты микробного синтеза термолабильны, поэтому упаривание осуществляют под разрежением и при режимах, обеспечивающих минимальные потери биологической активности продуктов. Как правило, температура кипения жидкости в первом корпусе выпарной установки составляет 80–85°C, в последнем – 50–55°C. Наибольшее распространение получили трехкорпусные выпарные установки со стекающей пленкой, которые отличаются компактностью, высокой производительностью по испаряемой влаге и небольшим временем пребывания упариваемой жидкости в аппарате.

При необходимости сгущения концентрата до высокого содержания сухих веществ (60–65%) применяют роторные испарители.

Целевыми продуктами микробного синтеза могут быть внутриклеточные биополимеры (нуклеиновые кислоты, белки, липиды), а также эндометаболиты (антибиотики, витамины, ферменты). Некоторые

компоненты можно извлечь без предварительного разрушения клеточной стенки (например, экстракцией), в других случаях (для выделения внутриклеточных биополимеров) требуется дезинтеграция клеточной массы, которую осуществляют различными методами. При химической дезинтеграции клеточную суспензию обрабатывают агентами (щелочью, глицерином, толуолом, пероксидом водорода), которые повышают проницаемость клеточных стенок. Биологические способы разрушения оболочки основаны на действии собственных гидролитических ферментов (автолиз) или специальных ферментных препаратов (лизозим, зимолиза и др.). Наибольшее промышленное значение имеют физические методы, которые более экономичны, чем химические и ферментативные. Чаще всего применяют обработку клеточной массы ультразвуком. Могут быть использованы такие приемы, как растирание с кварцевым песком, замораживание – оттаивание, продавливание массы через узкие отверстия под высоким давлением, декомпрессия (сжатие клеточной суспензии с последующим резким снижением давления). Фрагменты клеточных стенок отделяют центрифугированием или фильтрованием.

Выделение целевых компонентов из сложной смеси дезинтеграторов клеток – трудоемкий и дорогостоящий процесс, который целесообразен в производстве только очень ценных биологически активных веществ. В биотехнологии предпочтение отдают использованию штаммов микроорганизмов, экскретирующих целевой компонент. В этом случае технология получения чистых препаратов существенно упрощается.

Распространенными промышленными методами выделения экзо-метаболитов из культуральной жидкости являются: ионный обмен с использованием сухих и жидких ионообменных смол – катионитов и анионитов (производство аминокислот); экстракция органическими растворителями (производство антибиотиков); осаждение из растворов солями и органическими растворителями (ферментные препараты); кристаллизация (витамины, антибиотики, аминокислоты). Выделить целевой продукт с высокой степенью чистоты одним методом практически невозможно. В производственных условиях применяют комбинации различных методов.

В последние десятилетия сформировалось новое и исключительно перспективное для биотехнологии направление – мембранные методы разделения сложных смесей, главная отличительная особенность которых – наличие полупроницаемой мембраны, обладающей избирательной

проницаемостью по отношению к компонентам разделяемой смеси. Мембранные технологии обладают явными *преимуществами* перед традиционными методами разделения:

- осуществление процесса при температуре окружающей среды без фазовых превращений и подвода тепла, что позволяет уменьшить потери термостойких биологически активных веществ;

- малая энергоемкость;

- возможность одновременной очистки от низкомолекулярных примесей и концентрирования продуктов;

- исключение применения химических реагентов, что снижает стоимость процессов и уменьшает загрязнение сточных вод;

- универсальность – использование одной и той же установки для получения различных препаратов.

Среди мембранных методов преимущественное применение в биотехнологии получила ультрафильтрация, которая обеспечивает селективное концентрирование органических молекул и ионов. Промышленные ультрафильтрационные мембраны изготавливаются из различных материалов (ацетат целлюлозы, полиамид, полиакрилонитрил, фторопласт и др.). Они имеют существенный недостаток – невысокую водопроницаемость, которая составляет обычно 50–300 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч). Этот недостаток можно компенсировать только большой удельной поверхностью мембран в промышленных установках.

Принципиальное отличие ультрафильтрации от обычного фильтрования – отсутствие гетерогенности. Исходная смесь, а также продукт, прошедший через мембрану, – пермеат и продукт, оставшийся над мембраной, – концентрат находятся в жидкой фазе и различаются лишь составом, т. е. соотношением количеств компонентов. Образование осадка на поверхности мембраны резко ухудшает условия ее работы и недопустимо.

По способу укладки мембран различают установки с плоскими мембранными элементами, с трубчатыми, со спиральными, с мембранами в виде полых волокон. Установки с полыми волокнами имеют очень большую удельную поверхность фильтрования и, следовательно, высокую производительность. Ультрафильтрационный метод незаменим при концентрировании растворов ферментов, которые весьма чувствительны к воздействию повышенных температур.

В тонких биотехнологических процессах производства высокоактивных и дорогостоящих соединений применяют такие современные методы

разделения веществ, как гель-хроматография, аффинная и препаративная жидкостная хроматография, хроматография на «молекулярных ситах».

В технологии получения биопрепаратов на основе жизнеспособных микроорганизмов наиболее ответственной операцией является обезвоживание биомассы, в результате которого клетки резко замедляют жизнедеятельность на длительное время, но сохраняют жизнеспособность. Для обезвоживания живых микроорганизмов (а также концентрата высокоактивных термолабильных метаболитов) наиболее пригодна сублимационная сушка, т. е. высушивание материала из замороженного состояния при температуре не выше 28°C без оттаивания при глубоком разрежении (влага переходит из твердого состояния в газообразное, минуя стадию жидкой фазы). Сублимационной сушке подвергают концентрат суспензии микроорганизмов, в который предварительно вводят криозащитные вещества, например, глицерин, мелассу, раствор глюкозы. Криопротекторы предотвращают механическое повреждение клеточных структур кристаллами льда, уменьшают концентрирование внутриклеточных электролитов, вызывающих денатурацию белка. На выживаемость клеток большое влияние оказывают скорость замораживания и остаточная влажность препарата, которые уточняют для данного объекта экспериментальным путем.

Сублимационная сушка является энергоемким и дорогостоящим процессом, но в производстве ряда биопрепаратов (прежде всего для медицинских целей) она незаменима.

В крупнотоннажных производствах сушку концентрированных суспензий микроорганизмов производят в высокопроизводительных распылительных сушилках при прямом контакте диспергированной до капелек суспензии с горячим воздухом или топочными газами от сжигания природного газа. Температура сушильного агента на входе в сушилку колеблется в пределах 150–350°C в зависимости от термоустойчивости продукта. Короткое время сушки (5–25 с) и низкая температура высушиваемого продукта (не более 45°C) позволяют избежать существенных потерь биологически активных веществ и использовать метод для сушки термолабильных продуктов, в том числе ферментных препаратов.

## Глава 8. BIOTEХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

### 8.1. Переработка отходов целлюлозного производства

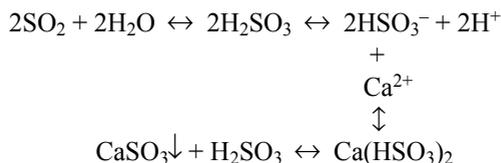
Основу процесса производства целлюлозы составляет растворение и удаление лигнина (делигнификация) и получение из древесины волокон целлюлозы в наименее поврежденном виде с оптимальным выходом. Существует 2 *способа* варки целлюлозы: сульфатный и сульфитный.

1. **Сульфатная варка целлюлозы.** Заключается в обработке древесины варочным раствором (белым щелоком) при температуре 165–175°C и давлении 0,7–1,2 МПа. В белом щелоке содержатся преимущественно соединения натрия: гидроксид, сульфид, карбонат и сульфат, в небольшом количестве – другие соединения, например, тиосульфат.

Достоинством сульфатного способа является достаточно совершенная система регенерации химикатов. После варки образуется черный щелок в количестве 7–10 м<sup>3</sup> на 1 т целлюлозы. Из него выделяют сульфатное мыло, которое перерабатывают с получением фитостерина, талового масла, талового лигнина и других продуктов. Черный щелок с массовой долей сухих веществ 1,5% и ниже сбрасывают на очистные сооружения.

В ходе сульфатной варки осуществляются сдувки летучих компонентов. Сдувочные конденсаты содержат неприятнопахнущие и токсичные метилсернистые соединения (метилмеркаптан, диметилсульфид, диметилсульфоксид), сероводород, метанол, терпеновые углеводороды. По загрязнению воздушного и водного бассейнов сульфатно-целлюлозное производство занимает одно из первых мест. В табл. 18 приведены предельно допустимые концентрации основных компонентов сдувочных газов в воде и в атмосфере.

2. **Сульфитная варка целлюлозы.** В этом случае нецеллюлозные компоненты извлекаются из растительной ткани под действием водных растворов сернистой кислоты и ее солей. Варочный раствор в общем виде представляет собой смесь гидросульфита, свободной сернистой кислоты и молекулярно растворенного диоксида серы. Это сложная равновесная система:



Диоксид серы не стабилен и легко окисляется кислородом как в газовой фазе, так и в водном растворе в серный ангидрид:



В результате в варочном растворе неизбежно присутствует серная кислота, которая вызывает гидролиз целлюлозы. Катион гидросульфита выполняет роль нейтрализующего агента и получил название основания варочного раствора.

Таблица 18

**Предельно допустимые концентрации основных компонентов сдвучных газов сульфатно-целлюлозного производства в воде водоемов и в атмосфере**

Компонент	Значение ПДК	
	в атмосфере населенных мест, мг/м <sup>3</sup>	в воде водоемов, мг/дм <sup>3</sup>
Сероводород	0,008	–
Метилмеркаптан	$9 \cdot 10^{-6}$	0,0002
Диметилсульфид	0,07	0,01
Диметилсульфоксид	0,7	0,04
Скипидар	2,0	0,2
Метанол	1,0	0,1

**8.1.1. Характеристика сульфитного щелока.** В процессе варки лигнин взаимодействует с гидросульфитом, образуя твердую лигносульфовую кислоту. Основание варочного раствора нейтрализует лигносульфовую кислоту с образованием растворимой соли (лигносульфонатов). Одновременно гидролизуются гемицеллюлозы. Полученный раствор (сульфитный щелок) имеет сложный состав и содержит, %: моносахариды – 2,7–3,2; лигносульфонаты – 6–9; альдоновые кислоты (продукты окисления моносахаридов) – 0,6–0,8; летучие органические кислоты – 0,3–0,4; метанол – 0,05–0,07; серо-содержащие соединения – 0,3–0,5.

Лигносulfонаты в сульфитном щелоке находятся в коллоидно-растворенном состоянии и определяют его поверхностное натяжение и вязкость.

Практический выход моносахаридов при сульфитной варке древесины составляет 14–16% (около 40% сахаров распадается и окисляется в альдоновые кислоты).

Щелоки хвойных пород древесины содержат в основном гексозы (маннозу, глюкозу, галактозу) и могут использоваться для получения и спирта, и кормовых дрожжей. Щелоки лиственных пород преимущественно содержат пентозы (до 85% – ксилозу) и применяются только для получения кормовых дрожжей.

При сульфитной варке целлюлозы количество отбираемого щелока составляет 8–9 м<sup>3</sup> на 1 т товарной целлюлозы.

БПК<sub>полн</sub> щелока, полученного при варке древесины хвойных пород, составляет около 40 тыс. мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Для щелока древесины лиственных пород, содержащего повышенное количество сахаров и уксусной кислоты, значение БПК<sub>полн</sub> достигает 60–70 тыс. мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Органические вещества щелока представлены легкоокисляемыми (сахара, органические кислоты) и трудноокисляемыми (лигносульфонаты) компонентами. При попадании сульфитного щелока на очистные сооружения легкоокисляемые компоненты способствуют интенсивному развитию нитчатых бактерий и грибов, наблюдается недостаток кислорода и функционирование сооружений нарушается. Окисление лигносульфонатов протекает 100–150 сут, поэтому очистные сооружения они проходят без изменений, но при этом изменяют физико-химические свойства воды: она приобретает темную окраску, снижается поверхностное натяжение, а следовательно, усиливается пенообразование, затрудняются процессы флокуляции.

Переработка сульфитного щелока – один из первых примеров биотехнологической переработки отходов промышленности. В СССР в 1935 г. на Сясьском ЦБК начал работать цех по получению этилового спирта. В годы Великой Отечественной войны на Соликамском ЦБК была осуществлена комплексная переработка сульфитного щелока с выработкой этилового спирта и кормовых дрожжей.

**8.1.2. Подготовка сульфитного щелока к биохимической переработке.** В сульфитном щелоке в значительном количестве содержатся различные соединения SO<sub>2</sub>. При концентрации свободного SO<sub>2</sub>

0,015% и более дрожжи прекращают жизнедеятельность. Кроме того, соединения  $\text{SO}_2$  могут вступать во взаимодействие с моносахаридами с образованием карбонилгидросульфитных соединений, не утилизируемых дрожжами. По степени связывания в карбонилгидросульфитные соединения и их стойкости моносахариды сульфитного щелока располагаются в следующем ряду: арабиноза > ксилоза > манноза > галактоза > глюкоза. Реакционная способность каждого моносахарида обусловлена долей его открытой формы в растворе. Карбонилгидросульфитные соединения находятся в равновесии со свободным  $\text{SO}_2$ . Чем выше температура щелока, тем меньше растворимость  $\text{SO}_2$  и тем ниже стойкость карбонилгидросульфитных соединений.

Наиболее простой прием удаления  $\text{SO}_2$  и разрушения карбонилгидросульфитных соединений – продувка щелока воздухом. При этом расход воздуха должен составлять  $5 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ , продолжительность продувки – 2–3 ч, температура щелока – не ниже  $80^\circ\text{C}$  (при температуре  $<50^\circ\text{C}$  продувка воздухом практически бесполезна).

Наиболее эффективным способом удаления  $\text{SO}_2$  является обработка щелока в тарельчатой ректификационной колонне (20–25 тарелок). Этот способ обеспечивает практически полное удаление свободного  $\text{SO}_2$ . Оптимальный расход пара 45–50  $\text{кг}/\text{м}^3$  щелока. Глубокая отдувка  $\text{SO}_2$  приводит к повышению pH щелока до 3,0–3,2. Однако для некальциевых сульфитных щелоков обработка паром недостаточна, так как в этих щелоках содержится значительное количество растворимого сульфита (например, сульфита магния). Растворимые сульфиты удаляют продувкой щелока воздухом, в результате которой они окисляются в сульфаты, безопасные для дальнейшей микробиологической переработки щелока.

Исходный сульфитный щелок имеет температуру  $85\text{--}90^\circ\text{C}$  и pH 1,0–1,5, подготовка его к биохимической переработке включает ряд операций (рис. 23).

Цель инверсии – гидролиз олигосахаридов, в результате чего увеличивается содержание усваиваемых микроорганизмами сахаров. Инверсия осуществляется выдержкой горячего щелока при температуре  $85\text{--}90^\circ\text{C}$  в течение 6–8 ч. Целесообразность проведения инверсии щелока определяется для каждого конкретного производства по приросту содержания моносахаридов.

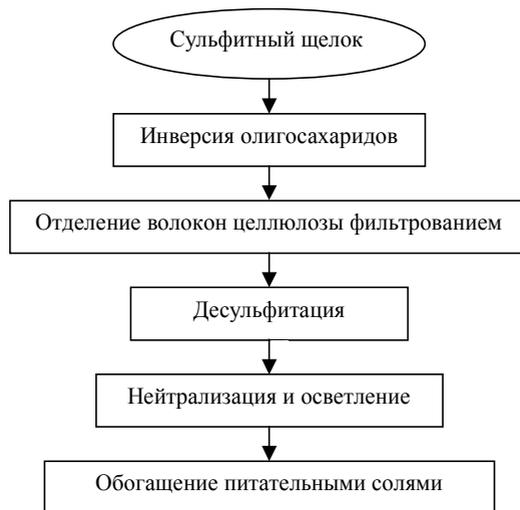


Рис. 23. Схема подготовки сульфитного щелока к биохимической переработке

Целлюлозные волокна отделяют при содержании их в щелоке более  $0,05 \text{ г/дм}^3$ . Если переработка сульфитного щелока ограничивается только производством этилового спирта, то присутствие целлюлозных волокон оказывается полезным. Спиртообразующие дрожжи сорбируются на волокнах и по окончании процесса брожения легко осаждаются, что позволяет возвращать биомассу в производство, не прибегая к сепарационному выделению клеток.

Соединения диоксида серы удаляют обработкой щелока паром в тарельчатых колоннах с конденсацией летучих продуктов. Полученный конденсат, содержащий диоксид серы, используют для приготовления варочного раствора. По мере удаления свободного диоксида серы в результате нарушения равновесия в системе происходит разрушение карбонилгидросульфитных соединений с высвобождением моносахаридов.

Глубокая отдувка диоксида серы с повышением pH до 3,0–3,2 позволяет произвести нейтрализацию щелока до pH 4,2–4,4 аммиачной водой.

Питательные соли (источники азота, фосфора, калия) в виде раствора вводят непосредственно в дрожжерастильный аппарат через труб-

чатый смеситель. В спиртовом производстве необходимо учитывать общее содержание азота в подготовленном щелоке. Оптимальной является концентрация 70–100 мг/дм<sup>3</sup>. Предельное значение – 700 мг/дм<sup>3</sup>, выше которого наблюдается «азотное отравление» спиртообразующих дрожжей (снижается спиртообразующая способность).

**8.1.3. Производство этилового спирта.** Для получения этилового спирта используют щелок сульфитной варки хвойных пород древесины, в котором не менее  $\frac{2}{3}$  моносахаридов представлено гексозами.

Брожение осуществляется в анаэробных условиях культурами дрожжей *Saccharomyces* и *Schizosaccharomyces*. Непрерывный процесс брожения (рис. 24) разделен на две стадии: главное брожение в головном бродильном аппарате и дображивание в хвостовом. На первой стадии утилизируются легкосбраживаемые глюкоза и манноза, на второй – дображивается галактоза. Оптимальные условия брожения: температура 30–32°C, значение pH 4,0–4,5, концентрация дрожжей в бродильных аппаратах 20–25 г/дм<sup>3</sup>.

Суммарно процесс брожения описывается уравнением



согласно которому из 100 кг сброженного сахара можно получить 64,79 л (51,14 кг) этанола.

Катаболизм сахаров осуществляется по пути Эмбдена – Мейергофа – Парнаса с образованием из одной молекулы сахара двух молекул пировиноградной кислоты. Последние под действием пируватдекарбоксилазы превращаются в ацетальдегид, который восстанавливается до этанола. Этот процесс катализируется алкогольдегидрогеназой. В качестве побочного продукта в небольшом количестве образуется глицерол.

В результате реакций дезаминирования и декарбоксилирования аминокислот образуется комплекс спиртов (бутиловый, изобутиловый, пропиловый, изоамиловый, амиловый), который называют сивушным спиртом. Его количество составляет около 0,5% от массы этанола. В качестве примеси также присутствует метанол (0,05%), который накапливается в щелоке еще во время сульфитной варки.

Таким образом, при брожении протекает ряд побочных процессов, выход спирта снижается, а в бражке накапливаются примеси. На конструктивный метаболизм дрожжей и побочные реакции расходуется около 5% сахаров.

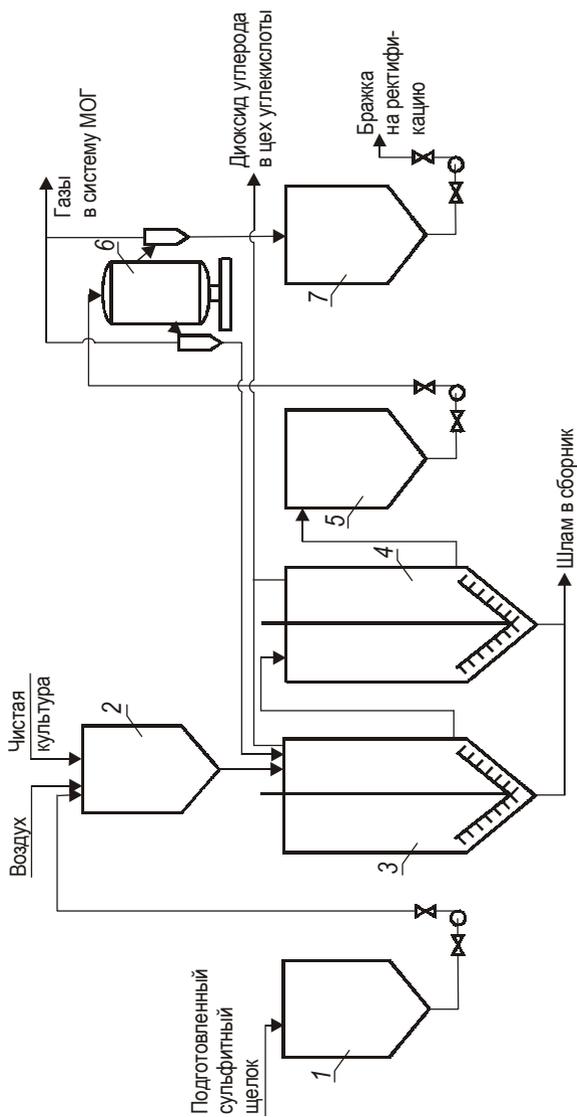


Рис. 24. Технологическая схема сбраживания сульфитного щелока:

1 – сборник подготовленного сульфитного щелока; 2 – дрожжанка; 3 – головной бродительный аппарат;

4 – хвостовой бродительный аппарат; 5 – сборник бражки; 6 – сепаратор; 7 – сборник отсепарированной бражки

Практический выход спирта из 100 кг сброженного сахара составляет при применении дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* 55–57 л, *Schizosaccharomyces pombe* – 57–59 л. При содержании в щелоке редуцирующих веществ (РВ) 2,8% массовая доля этанола в бражке составляет около 1,1%.

Дрожжевая масса отделяется от бражки сепарацией и возвращается в бродильный аппарат в виде концентрата с содержанием дрожжей 120–150 г/дм<sup>3</sup>, а спиртовая бражка направляется на ректификационную установку для выделения этанола и очистки его от примесей. После выделения этанола и летучих примесей остается сульфитно-спиртовая барда, которая содержит остаточные сахара (пентозы), уксусную кислоту и может быть использована для получения кормовых дрожжей.

Для улавливания диоксида углерода бродильные аппараты герметизированы, СО<sub>2</sub> после очистки и компримирования направляют на получение жидкой углекислоты. Спиртовому брожению можно подвергать частично упаренный под вакуумом (до значения РВ 3,5–4,0%) сульфитный щелок. При более значительном концентрировании возрастающее осмотическое давление на дрожжевые клетки приводит к снижению их спиртообразующей способности. При сбраживании упаренного щелока сокращаются эксплуатационные затраты, расход пара на ректификацию, и уменьшается количество образующейся после ректификации сульфитно-спиртовой барды.

**8.1.4. Производство кормовых дрожжей.** В данном случае может быть использован щелок, полученный при сульфитной варке древесины как хвойных, так и лиственных пород.

Производство кормовых дрожжей на сульфитном щелоке включает выращивание дрожжей рода *Candida*, концентрирование дрожжевой суспензии и получение из концентрата сухого продукта (рис. 25). Основной культурой является *Candida utilis*, ее доля составляет более 90%, в качестве примесей встречаются дрожжи *C. arborea*, *C. tropicalis*.

Предельное содержание сахаров в перерабатываемом щелоке ограничивается рядом *факторов*:

- недостатком кислорода;
- возрастанием осмотического давления на клетки и ингибированием их жизнедеятельности;
- накоплением большого количества продуктов метаболизма.

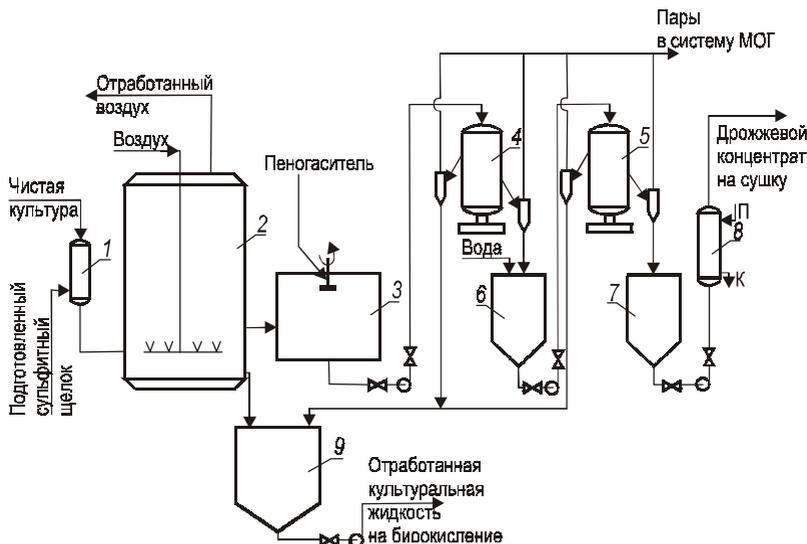


Рис. 25. Технологическая схема производства кормовых дрожжей на сульфитном щелоке:

- 1 – трубчатый смеситель; 2 – ферментатор; 3 – дегазатор; 4 – сепаратор I ступени;
- 5 – сепаратор II ступени; 6 – промежуточный сборник;
- 7 – сборник дрожжевого концентрата; 8 – теплообменник-плазмолизатор;
- 9 – сборник отработанной культуральной жидкости

Для уменьшения содержания РВ сульфитный щелок разбавляют. Степень разбавления зависит от того, какие биохимически утилизируемые соединения в нем присутствуют. Если в качестве сырья применяется ель, то не менее  $\frac{2}{3}$  сахаров представлено гексозами, уксусная кислота составляет не более 15% от массы сахаров. При использовании древесины лиственных пород сахара щелока на 85% состоят из пентоз, а количество уксусной кислоты доходит до 40% от массы сахаров. В первом случае оптимальная доля РВ составляет 1,8–2,0%, во втором – из-за высокого содержания уксусной кислоты концентрация РВ поддерживается на более низком уровне 1,4–1,6%. В ассимиляции субстрата, содержащего уксусную кислоту и углеводы, большую роль играет величина рН. Если значение рН ферментационной среды  $< 5$ , в первую очередь утилизируется уксусная кислота. Хотя скорость роста дрожжей на уксусной кислоте в 1,5 раза выше, чем на ксилозе, выход биомассы дрожжей ниже. Перевод основной массы уксусной кислоты

в солевую форму, достигаемый в диапазоне pH 5,0–5,5, обеспечивает одновременную утилизацию уксусной кислоты и сахаров дрожжами рода *Candida*.

Концентрация биомассы дрожжей в ферментаторе составляет 30 г/дм<sup>3</sup> (7,5 г/дм<sup>3</sup> по абсолютно сухой биомассе).

## 8.2. Переработка отходов молочной промышленности

**8.2.1. Характеристика молочной сыворотки.** Молоко – один из самых ценных пищевых продуктов (табл. 19). Белки, жиры, углеводы и минеральные вещества в нем находятся в сбалансированном соотношении. Белки молока содержат все незаменимые аминокислоты и являются самыми полноценными из животных белков. Биологическая ценность молочного жира обусловлена наличием полиненасыщенных жирных кислот, фосфолипидов, жирорастворимых витаминов. Кроме того, в молоке содержатся ферменты, гормоны, почти весь комплекс витаминов. Переработка такого полноценного продукта должна быть комплексной. Однако полностью все составные части молока используются лишь при получении цельномолочных продуктов (пастеризованного и стерилизованного молока, кисломолочных напитков).

Таблица 19  
Содержание основных питательных веществ в молоке и молочной сыворотке, %

Компонент	Содержание	
	в молоке	в молочной сыворотке
Сухие вещества	11,0–13,0	4,5–7,2
Белки	3,0–4,0	0,5–1,1
Жиры	2,8–5,0	0,3–0,5
Сахара	4,5–5,0	3,9–4,9
Минеральные вещества	0,7–0,8	0,3–0,8

При производстве творога и сыров в готовый продукт переходит только половина сухих веществ, содержащихся в молоке, другая половина остается в сыворотке. Технология производства сливочного масла предусматривает использование лишь жировой части, остальные компоненты остаются в обезжиренном молоке и пахте.

Молочная сыворотка – ценное пищевое сырье, включающее все компоненты молока. Состав углеводов молочной сыворотки аналогичен составу углеводов молока: моносахариды (глюкоза, галактоза и др.), их производные, дисахарид – лактоза и более сложные олигосахариды. Основной углевод – лактоза.

В сыворотку переходят сывороточные белки молока ( $\alpha$ -лактальбумин,  $\beta$ -лактоглобулин, иммуноглобулины). Это наиболее ценная часть белков молока, так как они содержат больше незаменимых аминокислот, чем казеин. Кроме того, сыворотка имеет в своем составе 0,1–0,6% казеиновой пыли. Это частицы казеина размером менее 1 мкм, образующиеся при дроблении сырного зерна. В следовых количествах в сыворотке присутствуют ферменты.

Содержание жира в сыворотке зависит от вида вырабатываемого сыра, от исходного сырья и режимов технологического процесса. Молочный жир в сыворотке более диспергирован, чем в молоке, что положительно влияет на его усвояемость.

Минеральные вещества сыворотки находятся в растворимом, коллоидном и нерастворимом состоянии. Из катионов преобладают:  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ . Из органических кислот присутствуют молочная, лимонная и летучие кислоты – уксусная, муравьиная, пропионовая.

В молочную сыворотку из молока в большей степени переходят водорастворимые витамины, чем жирорастворимые. Специфический желтовато-зеленый цвет сыворотки обусловлен наличием рибофлавина. При хранении сыворотки содержание витамина резко снижается.

Энергетическая ценность сыворотки составляет 36% энергетической ценности молока, однако биологическая ценность примерно такая же.

Количество сыворотки с учетом потерь составляет около 80% перерабатываемого молока. Только в Республике Беларусь ежегодно образуется около 1 млн. т сыворотки. По свидетельству Международной молочной федерации, до 50% молочной сыворотки сливается в канализацию.

**8.2.2. Основные направления использования молочной сыворотки.** Можно выделить четыре основных направления применения молочной сыворотки:

- использование в натуральном виде;
- переработка и применение в виде концентратов;

- выделение и использование наиболее ценных компонентов;
- биотехнологическая переработка.

**Использование натуральной сыворотки.** Значительная часть сыворотки без обработки возвращается на сельскохозяйственные предприятия, ее применяют в качестве добавки к кормам. Это позволяет несколько повысить биологическую ценность кормов, однако транспортирование сыворотки не окупается приростом сельскохозяйственной продукции.

Натуральную сыворотку используют в хлебопечении. При этом хлеб и хлебобулочные изделия обогащаются полноценным белком, улучшается внешний вид изделий, замедляется черствение. Натуральную сыворотку применяют в производстве кондитерских изделий (вафель, печенья, пряников), что позволяет уменьшить в рецептуре этих изделий количество сахара.

**Применение концентратов сыворотки.** Сгущение и сушка – наиболее рациональный способ сохранения сыворотки с целью ее дальнейшего использования в производстве пищевых продуктов. В сгущенную и сухую сыворотку переходят практически полностью все ценные компоненты. Ультрафильтрация является более рациональным способом сгущения, чем вакуум-упаривание, поскольку при этом полнее сохраняются биологически активные вещества сыворотки.

Концентраты сыворотки применяются в производстве хлебобулочных, кондитерских, колбасных и мясных изделий, плавленых сыров, напитков, комбикормов.

**Выделение ценных компонентов.** Наиболее ценные компоненты сыворотки, представляющие интерес для выделения, – белки, молочный жир, лактоза.

Белки можно выделить из сыворотки разными методами. Традиционный – тепловая коагуляция с последующим отстаиванием и подпрессовкой, второй метод – сепарирование. Полученные белковые массы используют в качестве белкового обогатителя других продуктов, для получения белковых гидролизатов.

Молочный жир из сыворотки выделяют сепарированием в виде подсырных сливок. Они отличаются по составу и свойствам от обычных, применяются при выработке сыров, мороженого, масла.

Лактозу выделяют с выработкой нескольких видов продукции в зависимости от степени очистки: молочный сахар-сырец, кристаллизат, рафинированный, фармакопейный.

### Биотехнологическая переработка молочной сыворотки.

**Получение сброженной и гидролизованной сыворотки.** На рис. 26 приведена схема получения сброженной и гидролизованной сыворотки. В результате молочнокислого брожения повышается пищевая, биологическая и кормовая ценность сыворотки либо увеличивается ее усвояемость вследствие гидролиза лактозы. Вместе с тем эти процессы требуют высоких затрат энергии и распространения не получили.

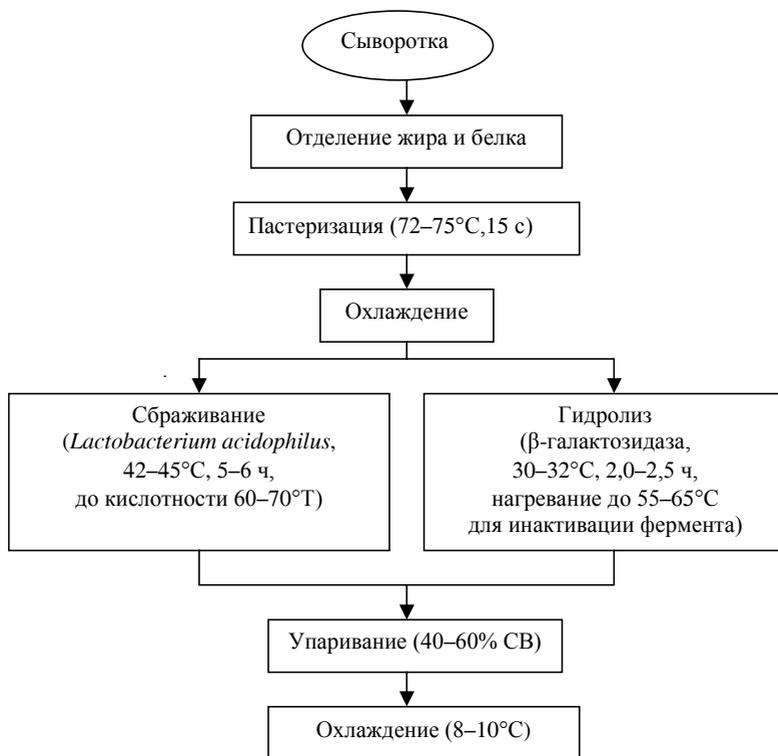


Рис. 26. Схема получения сброженной и гидролизованной сыворотки

**Получение молочной кислоты.** Практический интерес представляет производство молочной кислоты (рис. 27) в связи с широким применением ее в пищевой, химической, фармацевтической и других отраслях промышленности. Натуральная молочная сыворотка подвергается

концентрированию в 2–3 раза с последующим сбраживанием лактозы молочнокислыми бактериями. При сбраживании в ферментационную среду добавляют мел или известь для связывания молочной кислоты. Брожение проводят до остаточной концентрации лактозы 0,2–0,5%. По завершении брожения бражку подогревают и осуществляют окончательную нейтрализацию кислоты. Образовавшийся лактат кальция разлагают серной кислотой с освобождением молочной кислоты и образованием гипса. Обработкой активированным углем удаляют красящие вещества. Гипс и активированный уголь отфильтровывают, фильтрат после осветления отстаиванием используют для получения товарной молочной кислоты.

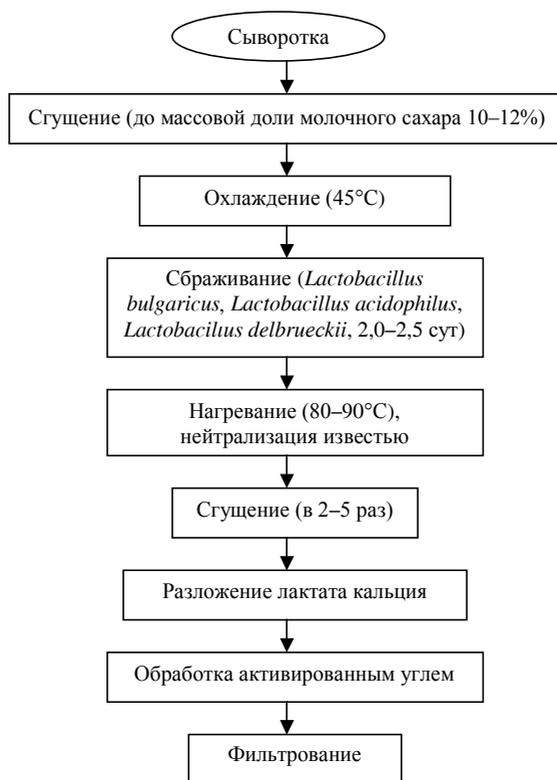


Рис. 27. Схема получения молочной кислоты

**Получение этилового спирта.** Способностью сбраживать лактозу обладает ограниченное количество микроорганизмов. Для получения этилового спирта сбраживанием сыворотки применяют дрожжи: *Torulla cremoris*, *Candida pseudotropicalis*, *Kluveromyces fragilis*, *Kluveromyces marxianus*. Из 1 т сыворотки можно получить 20 л этилового спирта (в пересчете на абсолютный). Предварительное сгущение сыворотки до массовой доли лактозы 10–12% позволяет более эффективно использовать оборудование и уменьшить количество образующегося отхода – послеспиртовой барды. Из 1 т концентрированной сыворотки получают 50 л спирта. Микробиологическая переработка требует предварительной подготовки сыворотки (рис. 28).

Сыворотку хранят при температуре 6–8°C. Подогретую до 45°C для снижения вязкости сыворотку направляют на сепаратор для отделения молочного жира. Обезжиренную сыворотку подогревают сначала до 70–75°C в теплообменнике, затем – до 90–95°C в паровом эжекторе для коагуляции белков, которые отделяются сепарированием. Растворенные белки могут быть выделены из сыворотки без предварительной термообработки методом ультрафильтрации.

Часть подготовленной сыворотки после пастеризации используют в отделении чистой культуры для размножения дрожжей, оставшееся количество охлаждают до температуры 30–32°C и направляют в бродильный аппарат. Длительность сбраживания натуральной сыворотки – 16–24 ч, содержание спирта в бражке – 2%, при сбраживании концентрированной сыворотки в течение 48–72 ч в бражке накапливается до 6% этанола. Отсепарированные дрожжи возвращают в бродильный аппарат, бражку направляют на ректификацию. Спирт выделяют из бражки в периодически действующей тарельчатой колонне с последовательным отбором фракций: головной, промежуточной (возвращается на ректификацию), технического этанола. Сивушные спирты остаются в кубовой фракции. Технический этанол очищают повторной ректификацией.

Спирт этиловый из сыворотки соответствует ГОСТ 5962-67 по всем требуемым показателям и характеризуется значительно более низким содержанием альдегидов и сивушных спиртов, но несколько более высоким – эфиров по сравнению со спиртом, полученным из зернокартофельного сырья.

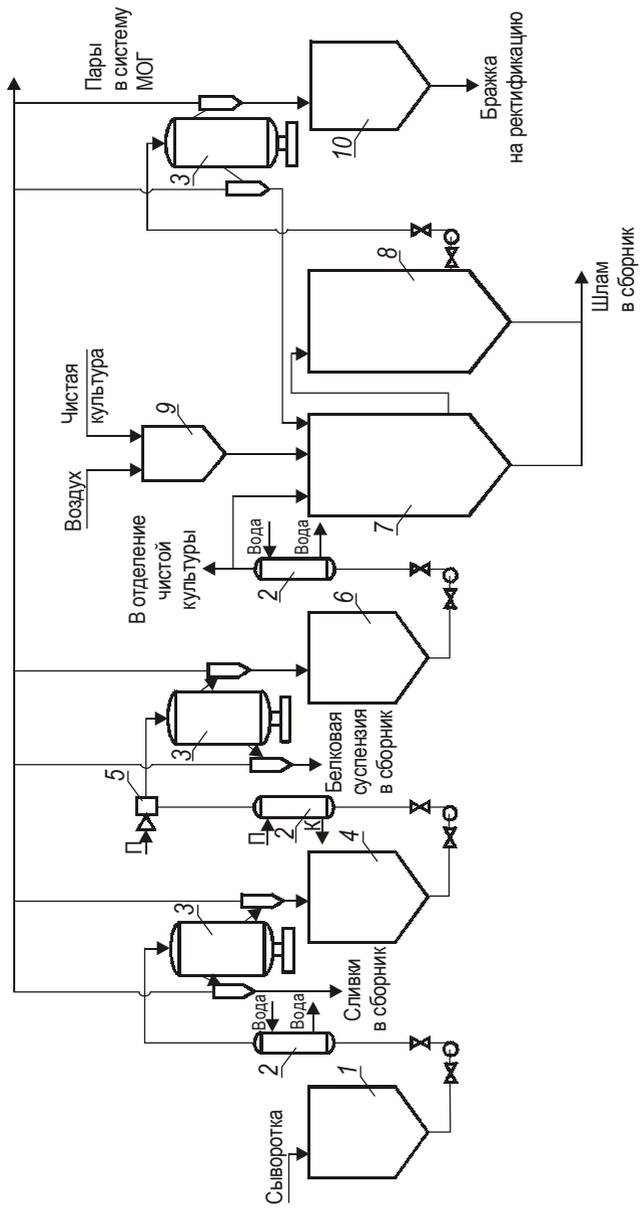


Рис. 28. Технологическая схема получения этанола из молочной сыворотки:

1 – сыворотка; 2 – теплообменник; 3 – сепаратор; 4 – сборник обезжиренной сыворотки; 5 – паровый эжектор; 6 – сборник подготовленной сыворотки; 7 – головной бродительный аппарат; 8 – хвостовой бродительный аппарат; 9 – дрожжанка; 10 – сборник бражки

В Республике Беларусь технология переработки сыворотки в этанол реализована на Пружанском молочном комбинате Брестской области, Шумилинском сырзаводе Витебской области и Минском гормолзаводе № 3.

### **8.3. Переработка отходов спиртового и ацетонобутилового производства**

**8.3.1. Характеристика послеспиртовой и ацетонобутиловой барды.** Для производства этилового спирта используется крахмалсодержащее (картофель, зерно злаковых культур), сахарсодержащее (меласса – отход свеклосахарного производства), инулинсодержащее сырье (топинамбур) и гидролизаты древесных и растительных отходов.

В Республике Беларусь более 80 заводов перерабатывают в этанол крахмалсодержащее сырье, главным образом, пшеницу. Зерно измельчают, смешивают с водой, разваривают для разрушения клеток и клейстеризации крахмала, охлаждают, осахаривают ферментными препаратами микробного происхождения или солода и сбраживают спиртообразующими дрожжами *Saccharomyces cerevisiae*. В бражке накапливается 10–11% об. спирта, который выделяется ректификацией. Из 1 т зерна пшеницы получается 64,0–66,5 дал этанола, после извлечения которого из бражки остается послеспиртовая барда. Количество барды составляет 0,12–0,14 м<sup>3</sup>/дал спирта.

Сырьем для ацетонобутилового производства является меласса и кукурузная мука. Заваренную муку и простерилизованную мелассу смешивают, полученную смесь (затоп) охлаждают и сбраживают. Возбудителем ацетонобутилового брожения являются бактерии *Clostridium acetobutylicum*. Процесс брожения имеет двухфазный характер: в первой фазе происходит интенсивный рост культуры с накоплением в культуральной среде органических кислот (уксусной, масляной); при снижении значения рН до 4,5–5,0 начинается вторая фаза – культура меняет метаболизм и переходит к накоплению нейтральных продуктов: этанола, ацетона и бутанола в соотношении 1 : 3 : 6. Общее содержание растворителей в бражке составляет 1,8–2,0%. После извлечения их из бражки ректификацией остается ацетонобутиловая барда.

И послеспиртовая (зерновая, картофельная, мелассная), и ацетонобутиловая барда содержат от 3,5 до 10% сухих веществ, среди которых моно- и дисахариды, крахмал, органические кислоты, минеральные вещества, аминокислоты, витамины. В послеспиртовой барде, кроме того, присутствует побочный продукт спиртового брожения – глицерол, а в барде, полученной при использовании мелассного сырья, – бетаины. Последние представляют собой органические основания (внутренние соли аминокислот, например, бетаин глицина –  $\text{CH}_3\text{N}^+\text{CH}_2\text{COO}^-$ ), которые составляют до 15–20% от сухих веществ мелассы и микроорганизмами не усваиваются.

Зерновую барду применяют в натуральном виде в качестве кормовой добавки, однако перевариваемость сырого протеина в этом случае не превышает 52%. Этот показатель может быть увеличен до 85–89% обогащением барды белком культивируемых микроорганизмов. При высушивании натуральной барды увеличивается срок хранения продукта, но распылительная сушка барды затруднена из-за налипания материала на внутренние поверхности аппарата. Существуют примеры использования упаренной барды как удобрения в смеси с суперфосфатом, в качестве пластификатора при производстве цемента и бетона.

Наиболее рациональной является биотехнологическая переработка барды. Являясь хорошей средой для выращивания микроорганизмов, барда может быть использована для получения кормовой белково-витаминной добавки и кормового препарата витамина В<sub>12</sub>.

**8.3.2. Технология кормовой белково-витаминной добавки.** Зерновая послеспиртовая барда содержит 6–8% сухих веществ, в том числе 26–28% сырого протеина (мертвые клетки продуцентов этанола), 6,0–7,5% жира, 12,8–13,4% клетчатки, 7,6–7,8% минеральных веществ, а также органические кислоты, витамины, спирты и др.

В качестве продуцентов белка на зерновой послеспиртовой барде применяют дрожжи родов *Candida*, *Cryptococcus*, *Rhodotorula*, *Trichosporon*. Наиболее пригоден штамм *Trichosporon cutaneum* ВКР У-495, который характеризуется способностью к гидролитическому расщеплению углеводных компонентов зерновой барды и высокой степенью их ассимиляции. Этот штамм устойчив при непрерывном культивировании без соблюдения условий асептики, продуктивность его по биомассе достигает 2,2 г/(дм<sup>3</sup> · ч).

Накопление посевного материала *Trichosporon cutaneum* производят в лабораторном ферментаторе и в дрожжерастильных аппаратах

отделения чистой культуры (малая дрожжанка, инокулятор) с использованием разбавленной в 2 раза водой и обогащенной питательными солями зерновой барды. Дрожжи выращивают при температуре 33–35°C.

Технология кормовой белково-витаминной добавки на зерновой послеспиртовой барде предусматривает выращивание дрожжей на натуральной барде (рис. 29) или после предварительного отделения дробины (частиц оболочек зерна).

Горячая зерновая барда поступает из брагоректификационного отделения с температурой 95–98°C в приемник-стерилизатор 1, в котором выдерживается в течение 30–40 мин для более полного уничтожения микробиоты. Приемник оборудован перемешивающим устройством, предотвращающим осаждение мертвых дрожжей-продуцентов этанола и взвешенных веществ барды.

После выдержки горячая зерновая барда охлаждается в кожухотрубчатом теплообменнике 3 до температуры 60–65°C и поступает в сборник-смеситель 4, в котором смешивается с раствором питательных солей. Для обеспечения роста продуцента белка зерновая барда обогащается азотом (1,5 г/дм<sup>3</sup> NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) и калием (0,3 г/дм<sup>3</sup> KCl).

В сборнике-смесителе барда при необходимости разбавляется водой. Разбавление зерновой барды повышает удельную скорость роста культуры, уменьшает пенообразование, однако одновременно увеличивает объем жидкостного потока подлежащей концентрированию дрожжевой суспензии.

Выращивание дрожжей осуществляется при pH питательной среды 4,0–4,4. Корректировка величины pH среды серной кислотой производится в дрожжерастильном аппарате путем подачи кислоты в трубчатый смеситель 6.

Доохлаждение питательной среды до температуры ферментации (33–35°C) осуществляется в кожухотрубчатом теплообменнике 3.

Дрожжи выращивают в ферментаторе эрлифтного типа 7 с децентрализованной системой воздухораспределения. Расход воздуха составляет 50–60 м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup> · ч). В процессе культивирования дрожжей на зерновой барде pH среды повышается за счет потребления органических кислот. Требуемую величину pH поддерживают серной кислотой. Продуктивность культуры *Trichosporon cutaneum* ВКР У-495 по биомассе на зерновой барде составляет 1,8–2,0 г/(дм<sup>3</sup> · ч). Концентрация абсолютно сухой биомассы в дрожжевой суспензии 8–12 г/дм<sup>3</sup>.

Значительное количество поверхностно-активных веществ (белков, аминокислот) придает суспензии способность к интенсивному пено-

образованию, поэтому она поступает в деэмульгатор 8, в котором производится отделение и гашение пены с использованием механического и химического пеногасителей.

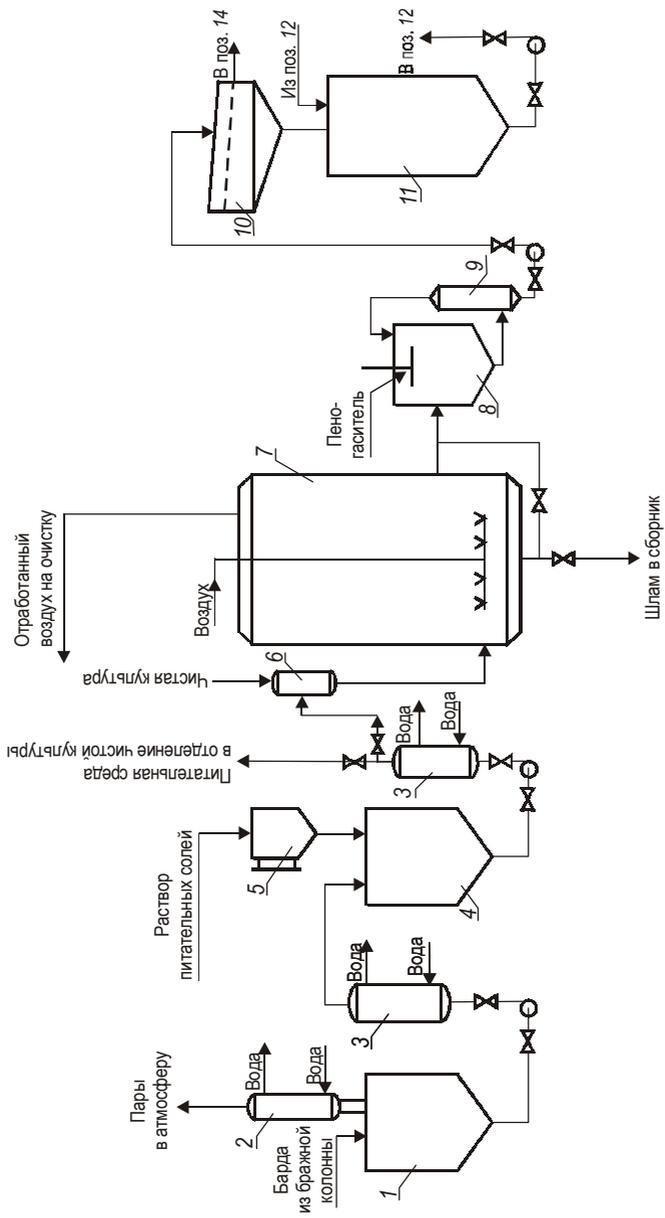
Наличие в барде твердых включений в виде дробины затрудняет сепарационное концентрирование дрожжевой суспензии. Дробина отделяется на вибросите с отверстиями размером 0,22–0,25 мм. Освобождение барды от дробины до осуществления стадии выращивания дрожжей менее целесообразно по причине значительных потерь субстрата с отделяемой фракцией. Сход с вибросита (дробина) смешивается с дрожжевым концентратом, поступающим на термолиз. Выход фильтрата составляет 75–85% от дрожжевой суспензии.

Дрожжевую суспензию концентрируют сепарацией в две ступени. При этом сепараторы второй ступени работают по методу круговой сепарации со сгущением суспензии до 300–400 г/дм<sup>3</sup> по биомассе 75%-ной влажности. Термолиз дрожжевого концентрата производят в течение 45 мин при 80–85°C в плазмоллизаторе 14, обогреваемом глухим паром. Сушку термолизованного дрожжевого концентрата в смеси с дробинной осуществляют в распылительной сушилке с дисковым распылителем 16. Следует отметить, что присутствие дробины может способствовать накоплению отложений на внутренних поверхностях сушилки.

Для обеспечения охраны окружающей среды технологической схемой предусматривается оснащение приемника-стерилизатора барды и сборника-плазмоллизатора обратными холодильниками. Газовые выбросы из ферментаторов, от сепараторов и сборников дрожжевой суспензии, а также отработанный теплоноситель из сушилки очищают в установках «мокрой» очистки газов.

Жидкий отход производства белково-витаминной добавки – отработанная культуральная жидкость со станции сепарации – частично может быть использован для приготовления питательной среды в основном производстве или направляется для очистки на локальные очистные сооружения предприятия.

**8.3.3. Технология кормового препарата витамина В<sub>12</sub>.** Витамин В<sub>12</sub> имеет самое сложное строение среди неполимерных соединений. Молекула витамина включает корриновое кольцо из четырех 5-членных азотсодержащих гетероциклов, связанных с атомом кобальта четырьмя координационными связями. Все разнообразие аналогов витамина В<sub>12</sub> связано с природой верхнего и нижнего лигандов атома кобальта.



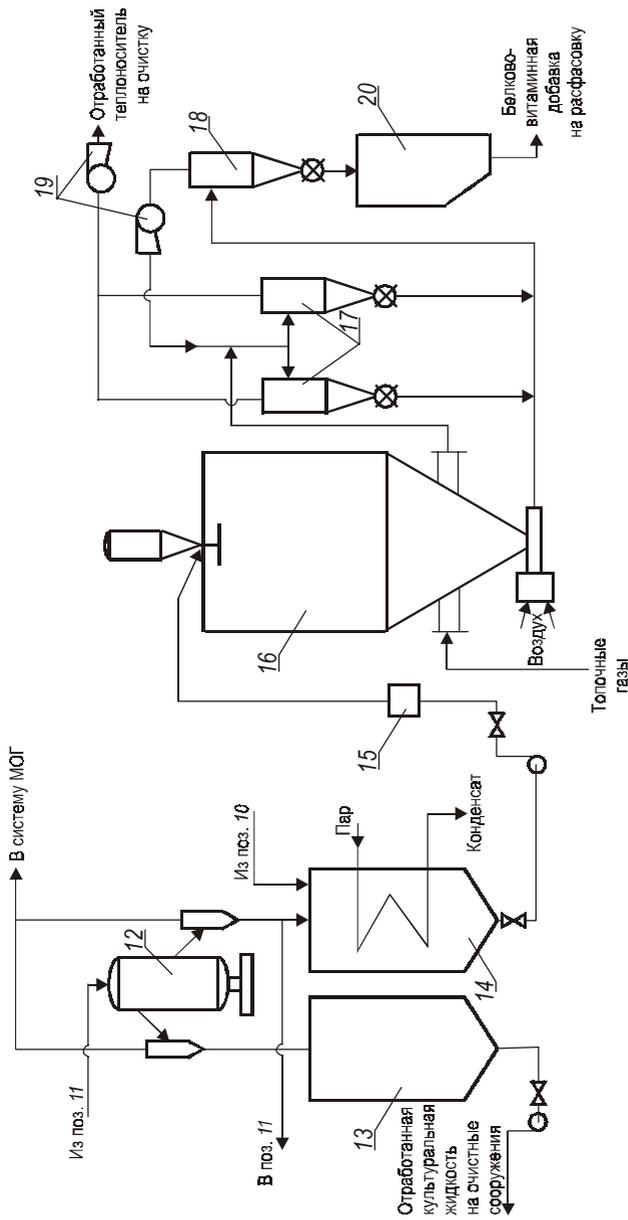


Рис. 29. Технологическая схема производства белково-витаминной добавки на натуральной зерновой послеперитовой барде:  
 1 – приемник-стерилизатор барды; 2 – поверхностный конденсатор; 3 – теплообменники; 4 – сборник питательной среды; 5 – мерник раствора солей; 6 – трубочатый смеситель; 7 – ферментатор; 8 – дезульгатор; 9 – дегазатор; 10 – вибросито; 11 – сборник дрожжевой суспензии; 12 – сепаратор; 13 – сборник отработанной культуральной жидкости; 14 – плазмоллизатор; 15 – фильтр сетчатый; 16 – сушилка распылительная; 17 – основная группа циклонов; 18 – продуктовый циклон; 19 – вентилятор; 20 – бункер

В истинном витамине В<sub>12</sub> (цианкобаламине) верхним лигандом является цианогруппа. Ее место могут занимать другие заместители: группа -ОН – оксикобаламин, -СН<sub>3</sub> – метилкобаламин, 5-дезоксидезозил – аденозилкобаламин и др. При этом образуются производные витамина, обладающие биологической активностью для животных и человека.

Нижним лигандом атома кобальта в молекуле витамина В<sub>12</sub> является специфическое азотистое основание – 5,6-диметилбензимидазол (5,6-ДМБ), которое в природе встречается только в этом соединении. Непосредственным предшественником 5,6-ДМБ считается рибофлавин. Микроорганизмы могут синтезировать производные витамина, содержащие в качестве нижнего лиганда другие заместители: 5-оксibenzимидазол (фактор III), 5-метоксибензимидазол (фактор III<sub>m</sub>), метиладенин (фактор А), аденин (псевдовитамин В<sub>12</sub>). Нижний лиганд может отсутствовать (фактор В). Биологической активностью обладают лишь формы, содержащие в качестве нижнего лиганда 5,6-ДМБ. В меньшей степени биологически активны фактор III и фактор III<sub>m</sub>. Псевдовитамин В<sub>12</sub> и фактор А активностью не обладают.

Организм животных (и человека) не способен к самостоятельному синтезу витамина В<sub>12</sub>. Его продуцируют микроорганизмы, прежде всего, бактерии, в том числе микробиота кишечника. Активными продуцентами витамина В<sub>12</sub> являются представители рода *Propionibacterium*, актиномицеты. Получены мутантные штаммы *Propionibacterium shermanii* М-82 и *Nocardia rugosa*, накапливающие соответственно до 58 и 18 мг/дм<sup>3</sup> витамина В<sub>12</sub>. В США для промышленного производства применяют мутантный штамм *Pseudomonas denitrificans*, образующий на оптимизированной среде до 59 мг/дм<sup>3</sup> кобаламина.

Высокой способностью к синтезу корриноидов обладают метаногенные бактерии. В активном иле, полученном при анаэробной очистке сточных вод, содержится большое количество производных и аналогов витамина В<sub>12</sub>, однако содержание форм, обладающих биологической активностью зависит от состава сточных вод и условий их очистки. Установлено образование кобаламинов в чистой культуре таких термофильных метаногенных бактерий, как *Methanosarcina barkeri*, *Methanobacterium formicum*, *Methanobacterium thermoautotrophicum*.

Мировое производство витамина В<sub>12</sub> составляет около 10 т в год, из которых 6,5 т расходуется на медицинские цели. Химический синтез витамина В<sub>12</sub> сложный, и основным способом его промышленного получения является микробиологический синтез.

Кормовой препарат витамина В<sub>12</sub> для нужд животноводства получают термофильным сбраживанием ацетонобутиловой и спиртовой барды спонтанно развивающейся ассоциацией метаногенных бактерий. Технологическая схема представлена на рис. 30.

Для метанового брожения используют декантат барды. Осадок взвешенных веществ, содержащий мертвые клетки продуцентов органических растворителей (этанола, ацетона, бутанола), применяют в качестве кормовой добавки.

Декантированную барду охлаждают со снижением температуры от 100 до 55–57°C (температура метанового сбраживания). Выход корриноидов значительно увеличивается при добавлении к барде метанола (5 кг/м<sup>3</sup>) и хлорида кобальта (5 г/м<sup>3</sup>). Процесс непрерывного сбраживания барды осуществляют в анаэробных биореакторах по одно- или двухступенчатому режиму. При двухступенчатом процессе наблюдается специализация бактерий, развивающихся в аппаратах первой и второй ступеней, в соответствии с фазами брожения и продолжительность процесса уменьшается с 3,0–3,5 (сбраживание в одну ступень) до 2,5–3,0 сут (две ступени сбраживания). Процесс метанового брожения протекает устойчиво и не нуждается в условиях асептики.

Сброженный раствор содержит 4–5 г/м<sup>3</sup> корриноидов, из которых в среднем 50% приходится на истинный витамин В<sub>12</sub>, 30% – на фактор III.

В процессе брожения образуется биогаз (в среднем 20 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> жидкой среды), имеющий следующий усредненный состав, % об.: СН<sub>4</sub> – 65; СО<sub>2</sub> – 30; Н<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>S – 5.

Сброженная барда имеет величину рН 7,5–8,0. В щелочной среде витамин В<sub>12</sub> неустойчив, поэтому для стабилизации витамина метановую бражку подкисляют до рН 5,5–6,0 и вводят 0,2–0,3% сульфита натрия. Перед подачей на упаривание бражку подвергают дегазации нагреванием в теплообменнике до 90–95°C с последующим отделением газов в объемном сепараторе. Дегазированную бражку сгущают до 20% сухих веществ упариванием в трех- или четырехкорпусных вакуум-выпарных установках. Концентрат высушивают в распылительной сушилке при температуре теплоносителя на входе в сушилку 280°C.

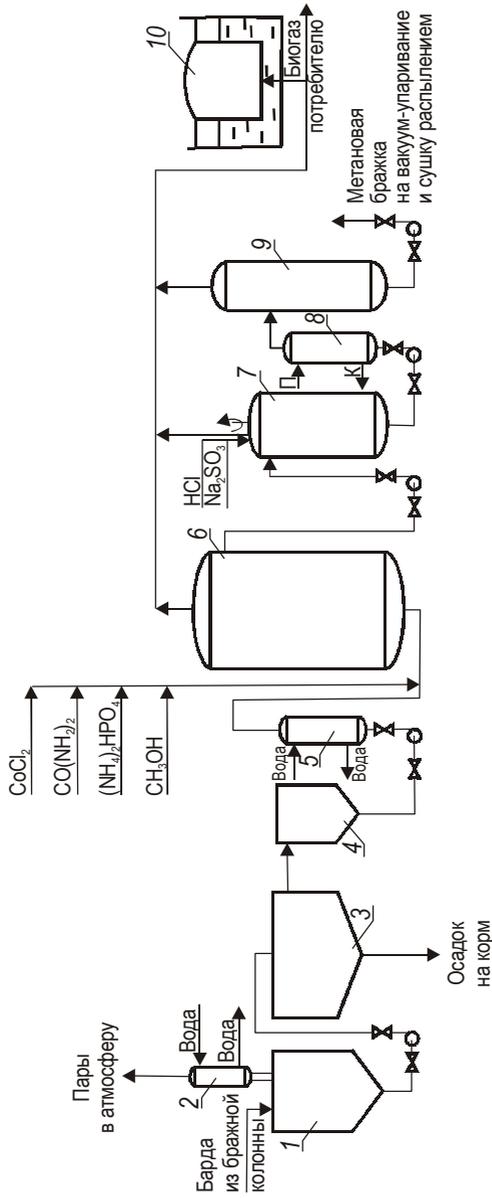


Рис. 30. Технологическая схема получения кормового концентрата витамина В<sub>12</sub> из послеспиртовой барды:

1 – сборник барды; 2 – поверхностный конденсатор; 3 – декантатор;

4 – сборник декантата; 5 – теплообменник; 6 – анаэробный реактор; 7 – стабилизатор бражки; 8 – теплообменник;

9 – газоделиТЕЛЬ; 10 – газольдер

Продукт – кормовой препарат витамина – представляет собой порошок коричневого цвета и содержит витамин В<sub>12</sub> в количестве не менее 100 мг/кг, а также сырой протеин – не менее 25%. При использовании его в качестве кормовой добавки улучшается усвоение белка и повышается прирост массы животных на 10–15%.

#### **8.4. Биотехнологическое использование отходов производства сахара и крахмала**

**8.4.1. Характеристика и использование отходов производства сахара из сахарной свеклы.** В корнеплодах сахарной свеклы содержится 20–25% сухих веществ, из которых сахароза составляет 14–18%. Кроме сахарозы, в соке сахарной свеклы содержатся азотистые и безазотистые органические и минеральные вещества. Выделение сахарозы из сока осуществляют путем многократного упаривания, кристаллизации сахарозы и отделения кристаллов центрифугированием. После трех ступеней такого выделения дальнейшее получение сахарозы становится экономически неоправданным, поскольку образуется малое количество сильнозагрязненных кристаллов. Остается отход производства – меласса.

Меласса – густая жидкость темно-коричневого цвета с острым запахом и неприятным вкусом, содержащая 76–80% сухих веществ, из которых до 50% – сахароза. Азотистые вещества мелассы представлены аммонийными солями, амидами, аминокислотами (глутамин, аспарагин, лейцин, изолейцин, глицин, валин, аланин и др.), бетаином и протеином, минеральные вещества – карбонатами, сульфатами, нитратами, фосфатами калия, натрия, цинка, марганца, меди и других металлов. В мелассе содержатся витамины (биотин, тиамин, рибофлавин, пиридоксин и др.), красящие вещества состоят из продуктов щелочного распада сахаров, меланоидинов, продуктов карамелизации.

Таким образом, меласса содержит компоненты, необходимые для развития микроорганизмов, и находит широкое применение в биотехнологии. На основе мелассы готовят питательные среды в производстве хлебопекарных и кормовых дрожжей, аминокислот, органических кислот. Мелассные среды сбраживают в этанол, используют в ацетонобутиловом брожении, при производстве средств защиты растений.

**8.4.2. Характеристика и использование отходов производства кукурузного крахмала.** Кукурузное зерно содержит, % от массы сухого вещества: крахмал – около 70; белок – 10–13; жир – 6–7. Крахмал связан с белком, что затрудняет его выделение. Для размягчения зерна и ослабления этих связей проводят замачивание кукурузного зерна в воде с добавлением сернистой кислоты для предотвращения прорастания зерна. При этом в замочную воду переходят около 6,5% сухих веществ зерна, прежде всего, минеральные вещества, растворимые углеводы, азотистые вещества. В то же время зародыш зерна теряет до 60% своей массы, а значит, вода имеет в своем составе большое количество биологически активных веществ (витаминов, аминокислот). Эту воду (кукурузный экстракт), содержащую 8–9% сухих веществ, упаривают до 50% по сухим веществам, получают густую непрозрачную жидкость от желтого до темно-коричневого цвета с характерным для кукурузы запахом.

Используют кукурузный экстракт в биотехнологии как источник факторов роста при приготовлении питательных сред в производстве аминокислот, витаминов, антибиотиков, хлебопекарных дрожжей и некоторых других продуктов.

## Глава 9. БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

### 9.1. Характеристика и методы переработки растительного сырья

Прирост органического вещества на Земле оценивается цифрой  $2 \cdot 10^{11}$  т в год, в том числе целлюлозы –  $4 \cdot 10^9$  т в год. Основными потребителями этой биомассы являются сельское, лесное хозяйство, деревообрабатывающие предприятия.

Производство сельскохозяйственной продукции приводит к образованию огромного количества отходов. При уборке и переработке этой продукции в отходы уходят: солома злаковых культур (прежде всего пшеничная, рисовая, в меньшем количестве ржаная, овсяная, ячменная), отходы переработки сахарной свеклы и сахарного тростника, стержни кукурузных початков, подсолнечная и рисовая лузга, гречневая шелуха, стебли и шляпки подсолнечника, костра лубяных культур (льна, конопли), обрезь виноградной лозы и фруктовых деревьев, отходы переработки овощей и фруктов.

Большая часть этих отходов и отходов животноводства разлагается в природных условиях, повышая плодородие почвы. Однако в условиях интенсивного сельскохозяйственного производства отходы территориально сконцентрированы, и количество их слишком велико для естественного потенциала биodeградации.

Растительные отходы (древесные) образуются также при лесопилении и деревообработке. Это ветви, вершины, пни, щепы, опилки, кора, древесная мука.

Основу растительных отходов составляет целлюлозолигнинный комплекс (табл. 20), который характеризуется высокой кристаллическостью целлюлозы и прочной ее связью с лигнином. По этой причине для биотехнологической переработки целлюлозолигнинных отходов необходима их предварительная обработка либо создание благоприятных условий для действия целлюлозоразрушающих микроорганизмов.

Выделяют 3 основных *направления* переработки растительного сырья:

- 1) гидролитическая подготовка с последующим получением из гидролизата этилового спирта и кормовых дрожжей;

2) твердофазная ферментация (получение ферментов, органических кислот, обогащение целлюлозосодержащих отходов микробным белком, силосование, компостирование);

3) анаэробная переработка с получением биогаза (см. гл. 13).

Таблица 20

**Состав целлюлозолигнинного комплекса растительного сырья**

Сырье	Содержание, %			
	целлюлозы	гемицеллюлозы	лигнина	других компонентов
Древесина:				
твердых пород	45–75	28–35	15–20	4–5
мягких пород	30–51	25–40	24–30	3–4
Солома:				
риса	32–53	21–24	12–25	–
пшеницы	31–51	23–28	18–21	–
Стебли кукурузы	38	26	19	17
Костра лубяных культур	26–30	12–16	27–33	–

## **9.2. Гидролитическая и биотехнологическая переработка растительного сырья**

Предварительная обработка растительного сырья направлена на удаление лигнина, разрыхление кристаллической структуры и гидролиз целлюлозы. Методы предварительной обработки делят на физические (растирание, размальвание, пропаривание, замораживание и оттаивание, СВЧ и радиоактивное облучение) и химические (применение кислот, щелочей, растворителей, газов).

Наибольшее распространение получил кислотный гидролиз, на котором основана целая отрасль промышленности – гидролизная. Основная продукция гидролизных заводов – технический этанол, кормовые дрожжи, фурфурол и фурановые соединения, ксилит, продукты на основе лигнина. В Республике Беларусь такую продукцию производят Бобруйский и Речицкий гидролизные заводы.

**9.2.1. Основные методы гидролиза.** Разнообразие методов гидролиза растительного сырья связано со значительным числом факторов, которые влияют на кинетику этого процесса: технологические свойства

сырья, активность и концентрация катализатора, температура, конструкция оборудования.

Технологические свойства сырья определяются его химическим и гранулометрическим составом, физическими свойствами. Важное значение имеет насыпная плотность сырья, от величины которой зависит количество загружаемого в гидролизаппарат сырья, и гранулометрический состав, обуславливающий гидравлическое сопротивление сырья, увеличение которого снижает скорость перколяции. Прочная физическая структура костры, например, позволяет применять ее в качестве «подушки» при гидролизе легкоразваривающегося сырья.

**Перколяционный гидролиз.** Наиболее часто в качестве катализатора используются сильные неорганические кислоты, прежде всего – серная. Возможно применение слабых органических ( $\text{HCOOH}$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) и неорганических ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) кислот. При перколяционном гидролизе используются растворы с массовой долей серной кислоты 0,5–0,8%.

В зависимости от температурного режима различают:

– низкотемпературный гидролиз (25–45°C) концентрированными кислотами;

– гидролиз разбавленными кислотами при повышенных температурах (100–190°C);

– высокотемпературный гидролиз (200–250°C).

В присутствии воды при температуре 200–240°C в результате деацелирования гемицеллюлоз образуется уксусная кислота, которая является катализатором. В этом случае говорят об автогидролизе.

Гидромодуль процесса (соотношение жидкой и твердой фаз) влияет на скорость гидролиза и выход моносахаридов. При маломодульном гидролизе происходит частичная нейтрализация кислоты неорганическими (зольными) компонентами растительного сырья. Чем выше гидромодуль, тем ниже содержание сахаров (РВ) в гидролизате.

Наиболее высокая производительность оборудования в непрерывном процессе. Однако для аппарата, работающего под давлением, сложно в техническом отношении организовать непрерывную подачу сырья и выгрузку негидролизованного остатка (технического лигнина). Поэтому чаще всего проводят перколяционный гидролиз в периодическом режиме: в гидролизаппарат загружают смоченное раствором кислоты сырье, прогревают его паром,

а затем осуществляют непрерывную подачу раствора кислоты с одновременным отбором гидролизата (этот процесс называют перколяцией) до полного гидролиза полисахаридов. Лигнин удаляют из аппарата под давлением в специальный приемник.

Важное значение при перколяционном гидролизе имеет время пребывания моносахаридов в зоне реакции. Для сокращения этого времени используют современные методы перколяции: совмещенную перколяцию с центральной подающей трубой и перколяцию с восходящим потоком жидкости через слой гидролизуемого материала. Конструкции устройств для подачи раствора катализатора и отбора гидролизата обеспечивают смешанное (вертикально-горизонтальное) направление движения жидкостных потоков при совмещенной перколяции, что исключает уплотнение гидролизуемого материала и снижение скорости отбора гидролизата. Еще более благоприятные гидродинамические условия создаются при перколяции с восходящим потоком жидкости.

**Ферментативный гидролиз.** Гидролиз может осуществляться под действием целлюлолитических ферментов грибного происхождения. Активными продуцентами этих ферментов являются грибы *Trichoderma viride*, представители родов *Aspergillus*, *Fusarium* и др.

*Достоинствами* ферментативного гидролиза являются:

- специфичность катализатора, обуславливающего избирательный гидролиз гликозидных связей полисахаридов;
- отсутствие деструкции образующихся моносахаридов;
- возможность проведения процесса при 40–50°C без значительных энергетических затрат.

Вместе с тем существует ряд *факторов*, сдерживающих применение ферментативного гидролиза:

1) невысокая скорость вследствие того, что глобулярные макромолекулы ферментов с трудом проникают в межмолекулярные области упорядоченных структур;

2) ингибирование ферментов конечными продуктами – глюкозой и целлобиозой;

3) влияние лигнина, которое заключается в адсорбции ферментов, их ингибировании низкомолекулярными ароматическими продуктами его деструкции (фенол, гваякол, *n*-гидроксibenзойная кислота) и экраннующем действии.

На скорость ферментативного гидролиза оказывает влияние влажность материала. Оптимальной является относительная влажность

сырья 400%, при меньшей влажности возрастает ингибирующее действие продуктов, при большей – снижается скорость ферментативной реакции.

### **9.2.2. Превращение основных компонентов растительной ткани в условиях гидролиза.**

**Превращения полисахаридов.** Основная цель гидролиза – расщепление гликозидных связей, соединяющих остатки моносахаридов в молекуле полисахарида. Эта реакция по возможности не должна сопровождаться вторичными превращениями образующихся моносахаридов.

В качестве основных продуктов гидролиза целлюлозы образуется комплекс растворимых в условиях реакции олигосахаридов: целлобиоза, целлотриоза и т. д. Скорость гидролиза олигосахаридов гораздо выше скорости гидролиза целлюлозы, и основным продуктом реакции является D-глюкоза.

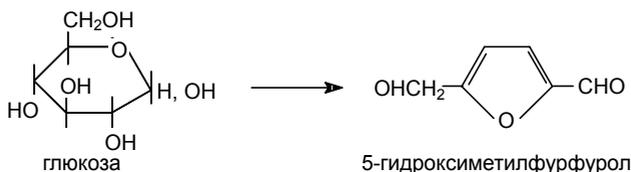
От химического строения гемицеллюлоз зависит их реакционная способность и углеводный состав гидролизатов. Основной полисахарид гемицеллюлоз древесины хвойных пород галактоглюкоманнан, соотношение остатков D-галактозы : D-глюкозы : D-маннозы в котором составляет 1 : 1 : 3. Основные полисахариды гемицеллюлозной части лиственной древесины – глюкуроноксиан и глюкоманнан. Растительные отходы сельскохозяйственного производства также являются ксиланами. Пектиновые вещества, содержание которых в древесине составляет 0,5–1,5%, представляют собой полиурониды, состоящие в основном из остатков частично метилированной D-галактуриновой кислоты.

Для гемицеллюлоз характерно образование растворимых олигомерных продуктов неполного гидролиза (степень полимеризации 2–10), в основном ксилобиозы. Для превращения их в моносахариды проводят дополнительный гидролиз в мягких условиях – инверсию.

Таким образом, основными продуктами гидролиза целлюлозы и гемицеллюлоз являются D-ксилоза, D-манноза, D-галактозы, L-арабиноза, D-глюкоза, уроновые кислоты и их эфиры. В результате отщепления O-ацетильных групп (деацетилирование) от макромолекул ксиланов и маннанов образуется уксусная кислота, при отщеплении O-метильных групп (деметоксилирование) от остатков уроновых кислот – метанол.

Состав этой смеси усложняется в результате дальнейших превращений моносахаридов.

**Вторичные превращения углеводов.** Распад сахаров приводит к снижению их выхода и образованию фурановых производных и других ингибиторов биохимических процессов. При дегидратации гексоз образуется 5-гидроксиметилфурфурол, при дегидратации пентоз – фурфурол.

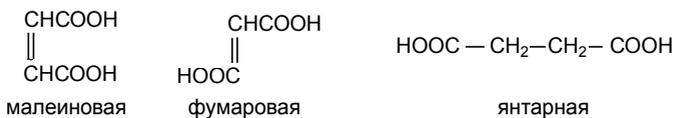


Уроновые кислоты в присутствии кислотных катализаторов подвергаются декарбоксилированию с образованием пентоз и далее – фурфурола, однако скорость декарбоксилирования невелика, и выход фурфурола из уроновых кислот ниже, чем из пентоз.

Фурановые соединения в условиях гидролиза могут претерпевать дальнейшие превращения с образованием низкомолекулярных и полимерных соединений.

В результате поликонденсации молекул фурфурола образуются темноокрашенные соединения – гуминовые вещества. По химической структуре это высокомолекулярные оксикарбоновые ароматические кислоты, содержащие также карбонильные и метоксильные группы. И фурфурол, и продукты его конденсации могут взаимодействовать с растворенным лигнином с образованием лигногуминовых веществ, придающих гидролизату темную окраску.

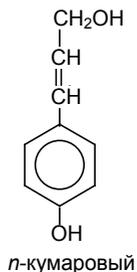
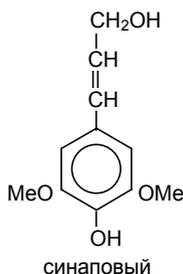
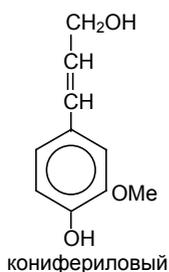
Из низкомолекулярных продуктов расщепления фурановых соединений в гидролизате присутствуют органические кислоты: фумаровая, янтарная, малеиновая.



При распаде 5-гидроксиметилфурфурола образуются муравьиная и левулиновая ( $\text{CH}_3\text{CO}(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$ ) кислоты, а также высокомолекулярные продукты его поликонденсации.

Таким образом, в результате вторичных превращений углеводов в гидролизате дополнительно появляются: фурфурол, 5-гидроксиметилфурфурол, органические моно-, ди- и кетокрбоновые кислоты.

**Превращения лигнина.** Биосинтез лигнина заключается в дегидратационной полимеризации трех основных предшественников – производных коричневого спирта: кониферилового (4-гидрокси-3-метокси-коричного), синапового (4-гидрокси-3,5-диметоксикоричного) и *п*-кумарового (4-гидроксикоричного) спиртов.



В макромолекуле лигнина фенилпропановые структурные звенья связаны между собой разнообразными химическими связями. Кроме того, макромолекулы лигнина связаны между собой поперечными связями в различных направлениях, и образуется трехмерная пространственная сетка. На свойства лигнина и его реакционную способность оказывают также влияние межмолекулярные водородные и лигнуглеводные связи.

При гидролизе растительного сырья протекают следующие основные превращения лигнина:

- растворение низкомолекулярной фракции лигнина, содержащейся в исходном сырье и образующейся в результате гидролитического расщепления наименее прочных связей между фенилпропановыми структурными звеньями;

- кислотная конденсация макромолекул лигнина, а также их конденсация с продуктами превращений древесины карбонильной природы с образованием сетчатой сшитой структуры. Это приводит к потере реакционной способности лигнина, снижению его растворимости.

При повышении кислотности преобладают реакции второго направления, с повышением температуры ускоряются реакции обоих направлений.

В условиях промышленного гидролиза в коллоидно-растворенное состояние переходит до 10% лигнина древесины хвойных пород, 10–20% лигнина древесины лиственных пород и до 40% лигнина, содержащегося в стержнях кукурузных початков.

**Преращения экстрактивных веществ.** Экстрактивные вещества – это в основном низкомолекулярные соединения, которые в зависимости от метода выделения делят на три *группы*:

– эфирные масла – экстрактивные вещества, отгоняемые с водяным паром (терпены, некоторые фенолы, простые эфиры, альдегиды, кетоны и лактоны);

– древесные смолы – вещества, извлекаемые органическими растворителями (смоляные кислоты, эфиры органических кислот с терпеновыми и алифатическими спиртами, а также нейтральные вещества: спирты, стерины, воски, жиры);

– водорастворимые вещества – углеводы, таниды, фенольные соединения, аминокислоты, полипептиды.

К экстрактивным веществам обычно относят и неорганические (зольные) вещества растительного сырья.

Суммарное содержание экстрактивных веществ в растительном сырье составляет 5–15%, причем более высокое их содержание характерно для древесины хвойных пород.

Основными превращениями экстрактивных веществ при гидролизе являются изомеризация и полимеризация терпенов, причем полимерные продукты и нерастворимые смоляные кислоты удаляются вместе с лигнином.

Таким образом, в результате протекающих в условиях кислотного гидролиза превращений растительного сырья получается раствор сложной смеси компонентов – гидролизат (табл. 21).

Гидролизат выходит из гидролизаппарата с температурой 160–180°C, имеет значение pH 1,2–1,5, содержит токсичные вещества: фурфурол (0,02–0,12%), 5-гидроксиметилфурфурол (0,03–0,18%), фенолы (50–500 мг/л) и др. В таком виде он не пригоден для биохимической переработки и должен пройти подготовку.

### **9.2.3. Подготовка гидролизата к биохимической переработке.**

Технология подготовки гидролизата к биохимической переработке включает следующие *операции*:

1. Три ступени самоиспарения, в результате которых температура снижается до 105–110°C. Вторая ступень может быть совмещена с инверсией (130°C, 0,27–0,30 МПа, 30 мин). В результате гидролиза олигосахаридов концентрация РВ повышается на 0,2%, что дает увеличение выхода дрожжей на 3–5%.

Химический состав гидролизата растительного сырья

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, мг/л
РВ	3,0–3,8	Метанол	20–400
Моносахариды	2,8–3,3	Этанол	5–25
Олигосахариды	0,1–0,4	Формальдегид	50–150
Фурфурол	0,02–0,12	Ацетальдегид	0,5–5,0
5-Гидроксиметилфурфурол	0,03–0,18	Ацетон	0,4–2,0
Кислоты:		Пропионовый альдегид	0,7–1,2
левулиновая	0,1–0,3		
муравьиная	0,03–0,1		
уксусная	0,2–0,5		
пропионовая	0,01–0,03	Терпены	0,1–5,0
аминокислоты	0,02–0,04	Фенолы	50–500
Серная кислота	0,4–0,7	Лигногуминовые вещества, %	0,15–0,25
Неорганические соли	0,1–0,3		

2. Нейтрализация до значения pH 3,5–5,0 в две ступени: на первой – известковым молоком с концентрацией нейтрализующего агента 150 г/дм<sup>3</sup>, на второй – аммиачной водой. Нейтрализация проводится при температуре 80°C, при этом образуется двухводный гипс CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O, растворимость которого ниже чем у других кристаллогидратных форм. Гидролизат обогащают солями P, N и K, необходимыми для жизнедеятельности дрожжей. В гидролизаты растительных отходов сельскохозяйственного сырья, имеющих повышенную зольность, соединения K не вносят. Шлам отделяется в отстойнике, промывается водой для снижения потерь сахаров и направляется на фильтр-пресс.

3. Охлаждение осветленного нейтрализата путем последовательно четырехступенчатого вакуум-испарения. Давление снижается по ступеням: 0,03 > 0,015 > 0,01 > 0,006–0,008 МПа, температура на последней ступени 45°C. На вакуум-охладительной установке уменьшается содержание в гидролизате фурфурола, 5-гидроксиметилфурфурола, терпенов, ингибирующих жизнедеятельность дрожжей. Разрежение на каждой ступени обеспечивается с помощью парожекторных вакуум-насосов.

4. Аэрация воздухом для дестабилизации коллоидной системы и коагуляции лигногуминовых веществ, которые удаляются в отстойнике. При выращивании дрожжей эти вещества могут сорбироваться на поверхности клеток, нарушать обменные процессы и загрязнять

продукцию. Влияние лигногуминовых веществ на спиртообразующие дрожжи невелико, и если гидролизат используется для производства спирта, аэрацию можно не осуществлять.

5. Разбавление гидролизата для снижения концентрации редуцирующих веществ (с 3,0–3,2 до 1,2–1,6%) и вредных примесей. В случае глубокой очистки гидролизата от примесей и применения ферментаторов с интенсивным массообменном разбавление можно не проводить.

**9.2.4. Производство дрожжей на гидролизате.** Производство кормовых дрожжей на гидролизате растительного сырья включает следующие *стадии*:

- ферментацию;
- концентрирование дрожжевой суспензии;
- сушку дрожжевого концентрата.

**Ферментация.** Осуществляется непрерывным способом в условиях аэрации без соблюдения асептики. В ферментаторах развиваются ассоциации микроорганизмов, в которых в качестве основных культур и примесей могут быть дрожжи родов *Candida*, *Trichosporon*, *Torulopsis*: *C. scottii*, *C. tropicalis*, *C. utilis*, *C. mesenterica*, *C. parapsilosis*, *C. guilliermondii*, *C. melinii*; *Tr. cutaneum*, *Tr. pullulans*; *T. candida*, *T. holmii* и др. На большинстве заводов основу ассоциаций составляют дрожжи *Candida scottii*.

В качестве инфекции может присутствовать бактериальная микрофлора, плесневые грибы. Для борьбы с инфекцией используют подсев чистой культуры, регулирование параметров культивирования, отклонение их от оптимальных для большинства микроорганизмов. Так, значение pH поддерживается на уровне 4,2–4,4, температура культивирования 36–38°C. Концентрация биомассы дрожжей в культуральной жидкости составляет 30 г/дм<sup>3</sup>.

**Концентрирование дрожжевой суспензии.** В производстве применяются сочетания различных *методов* концентрирования дрожжевой суспензии:

- флотация > сепарация > вакуум-упаривание > сушка;
- флотация > сепарация > сушка;
- сепарация > вакуум-упаривание > сушка.

После флотации получается суспензия с концентрацией дрожжей 120–150 г/дм<sup>3</sup>, после сепарации первой ступени – 300–400 г/дм<sup>3</sup>, второй ступени – 500–600 г/дм<sup>3</sup>.

Отработанная культуральная жидкость после флотации и двух ступеней сепарации имеет значение ХПК 4–10 г O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. В ней содержатся органические кислоты, моно- и олигосахариды, лигногуминовые и фенольные соединения, терпены, продукты метаболизма дрожжей. Содержание биологически окисляемых компонентов оценивается величиной БПК<sub>5</sub>, которая составляет 1,5–3,0 г O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Это свидетельствует о целесообразности проведения второй ступени ферментации (так называемое биоокисление отработанной культуральной жидкости). В составе ассоциации микроорганизмов на этой ступени преобладают дрожжи рода *Trichosporon*, активно потребляющие органические кислоты.

Вакуум-упаривание дрожжевой суспензии осуществляют до содержания сухих веществ 20–25%.

**Сушка.** Сушат концентрат до влажности продукта не более 10%.

Выход дрожжей составляет 50–55% от РВ, или 180–210 кг из 1 т абсолютно сухого сырья. Кормовые дрожжи получают в виде порошка или в гранулированном виде, по показателям качества их делят на четыре группы. Массовая доля белка по Барнштейну (%) должна быть не менее 44, 41, 36 и 32 для I, II, III и IV групп соответственно. Такие дрожжи содержат весь комплекс незаменимых аминокислот, используются в качестве белковой добавки с высоким содержанием витаминов группы В при производстве комбикормов и кормосмесей для сельскохозяйственных животных, птицы, рыбы, пушных зверей.

**9.2.5. Производство этанола на гидролизате.** Основные отличия в получении и подготовке гидролизата для производства этанола:

- используют древесину хвойных пород;
- проводят гидролиз при более низком гидромодуле;
- не проводят аэрацию нейтрализованного гидролизата;
- гидролизат не требует разбавления.

В спиртовом производстве применяют спиртообразующие дрожжи родов *Saccharomyces* и *Schisosaccharomyces*: *Sacch. vini*, *Sacch. paradoxus*, *Sacch. cerevisiae*, *Sacch. casei*; *Schisosacch. pombe*. Сбраживание гидролизного сусла ведут непрерывно, без соблюдения условий асептики. В виде инфекции могут развиваться молочно-, уксусно- и маслянокислые бактерии, дрожжи и грибы, для борьбы с которыми проводят дезинфекцию оборудования, подкисление бродящей среды до pH 3,5–3,7. Перспективными продуцентами этанола считают дрожжи *Pichia stipitis*,

которые сбраживают ксилозу и могут использоваться для получения этанола на гидролизатах растительных отходов сельскохозяйственного сырья, бактериальные культуры *Zygomonas mobilis* и *Clostridium saccharolyticum*.

Спиртовая бражка содержит 1,0–1,5% этанола. Ректификацией получают технический ректифицированный спирт высшего, 1 и 2 сорта, с объемной концентрацией этанола не менее 96,2 (для высшего) и 96,0% об. (для 1 и 2 сортов). Выход спирта составляет около 50 л со 100 кг редуцирующих веществ, или 175 л из 1 т абсолютно сухого сырья.

### 9.3. Твердофазная ферментация растительного сырья

Твердофазная ферментация – процесс, протекающий не в водной среде, а в массе измельченного влажного сырья.

В странах Дальнего Востока и Индокитая процессы этого типа используются для приготовления национальных блюд на основе соевых бобов или смесей соевых бобов с пшеницей или рисом. Сначала проводят аэробную ферментацию бобов грибами рода *Aspergillus*, затем сбраживают продукты ферментации в анаэробных условиях дрожжевыми или бактериальными культурами. Другой пример – производство ферментного препарата кодзи, который употребляется японцами в тех же целях, что и солод европейцами. Он представляет собой выращенную на отварном рисе или другом зерне культуру грибов *Aspergillus oryzae*.

К настоящему времени твердофазная ферментация нашла применение в следующих процессах переработки отходов растительного сырья:

- получение ферментов;
- обогащение лигноцеллюлозного сырья белком одноклеточных;
- силосование;
- компостирование.

К достоинствам таких процессов следует отнести невысокие энергетические затраты, а также то, что твердофазная ферментация может функционировать как технология малого масштаба, ориентированная на местное сырье.

**9.3.1. Получение ферментов.** Твердофазной ферментацией получают ферментные препараты в том случае, если продуцентами являются грибы. Основными продуцентами амилолитических ферментов являются грибы родов *Aspergillus*, *Rhizopus*: *Asp. oryzae*, *Asp. awamori*,

*Asp. batatae*, *Rh. delemar*, *Rh. niveus*; протеолитических – грибы родов *Aspergillus*, *Penicillium*: *Asp. flavus*, *Asp. oryzae*, *Asp. niger*, *Asp. awamori*, *Asp. terricola*, *P. chrysogenum*; пектолитических – грибы рода *Aspergillus*: *Asp. awamori*, *Asp. niger*, *Asp. terreus*, *Asp. foetidus*; целлюлолитических – грибы родов *Trichoderma*, *Penicillium*: *Tr. viride*, *Tr. roseum*, *P. notatum*. Природные штаммы грибов синтезируют комплекс ферментов, мутанты – как правило, преимущественно один.

Большинство ферментов микроорганизмов индуцибельны, т. е. требуют для своего синтеза присутствия в среде индукторов. Часто индуктором является субстрат, на который действует данный фермент. Для синтеза ферментов, расщепляющих крахмал, в качестве питательной среды используют пшеничные отруби, соевую муку; для синтеза пектиназ – свекловичный жом; целлюлаз – солому, опилки, отруби; протеиназ – бишопроты масличного сырья.

Твердофазную ферментацию проводят при влажности сырья 55–65%, температуре 35–38°C, значении pH среды 4–5. Расход воздуха на аэрацию рассчитывают на отвод биологического тепла. Культивирование грибов ведут до образования конидий, так как на этой стадии резко снижается продукция ферментов.

Из полученной поверхностной культуры ферменты экстрагируют водой. Экстракт, содержащий 6–12% сухих веществ, упаривают под вакуумом и осаждают ферменты солями или органическими растворителями. Далее в зависимости от требуемой чистоты препарата проводят кристаллизацию, удаление примесей.

**9.3.2. Обогащение растительного сырья белком одноклеточных.** Выше отмечалось, что структура лигноцеллюлозного комплекса устойчива к ферментативному воздействию и в природе не существует микроорганизмов, способных быстро и эффективно разрушать эту структуру.

Вместе с тем данный процесс широко распространен в окружающей среде, следовательно, могут быть подобраны микроорганизмы и определены условия эффективного обогащения лигноцеллюлозного сырья белком одноклеточных. В зависимости от свойств сырья и вида микроорганизмов в сырье остается неиспользованным различное количество лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз. Однако эти остатки либо могут сами потребляться животными как компоненты кормов, либо не оказывают негативного влияния на организм животного. Таким образом,

готовый кормовой препарат представляет собой смесь неиспользованного растительного сырья и биомассы микроорганизмов.

Отбор продуцентов ведут по выходу белка от использованного субстрата, его аминокислотному составу, содержанию витаминов, нуклеиновых кислот, усвояемости белка в желудочно-кишечном тракте сельскохозяйственных животных. При этом учитывается, что эффективность конверсии лигноцеллюлозного комплекса выше при применении ассоциаций микроорганизмов, чем отдельных культур. Так, наибольшей целлюлолитической активностью обладают мицелиальные грибы родов *Trichoderma* и *Chaetomium*: *T. viride*, *T. lignorum*; *C. celluloliticum*, синтезирующие на термообработанной соломе до 12% белка. При выращивании их совместно с дрожжами *Candida lipolytica* или *Endomycopsis fibuligera* содержание белка увеличивается с 12 до 18%.

Шведская сахарная корпорация разработала процесс «Симба», в котором на крахмал- и целлюлозосодержащих субстратах выращивают совместно дрожжи *Candida utilis* как активный продуцент белка и дрожжеподобный гриб *Endomycopsis fibuligera*, синтезирующий гидролитические ферменты. Последний имеет низкую скорость роста, и в конечном продукте преобладают дрожжи *Candida utilis*.

Крахмалсодержащие отходы являются наиболее пригодными для обогащения белком одноклеточных по следующим причинам:

- 1) они не требуют предварительной обработки;
- 2) на таких отходах растут не только грибы, но и более распространенные в производстве кормовых добавок дрожжевые микроорганизмы;
- 3) скорость роста микроорганизмов выше, причем они развиваются не только на поверхности сырья, но и внутри гранул крахмала;
- 4) неиспользованный микроорганизмами крахмал доступен для усвоения животными.

Содержание белка в отходах переработки картофеля после их ферментации достигает 18–20%.

Таким образом, на современном этапе может быть организовано обогащение белком одноклеточных путем твердофазной ферментации таких отходов, как отруби разных видов зерна, картофельная мезга, севловичный жом, верховой торф.

Применение таких процессов сдерживается рядом обстоятельств: – рассредоточенностью сырья и проблемой его хранения для обеспечения бесперебойной работы ферментационных установок;

- сложностью получения и поддержания культуры микроорганизмов (требуются специалисты-биотехнологи);
- непостоянным составом сырья, что усложняет технологию и препятствует получению гарантированных показателей (выход и состав продукта);
- высокой себестоимостью продукта.

**9.3.3. Силосование растительных кормов.** Этот способ сохранения сочных кормов известен тысячи лет.

Растительное сырье (трава, отходы растениеводства) собирают в относительно ранней стадии роста с высоким содержанием сахаров и низким содержанием волокон. Сырье уплотняют и герметизируют для создания анаэробных условий. Размножающиеся молочнокислые бактерии используют сахара, освобожденные из разрушенных растительных клеток. Высокая концентрация молочной кислоты препятствует развитию посторонних микроорганизмов: при значении рН 3,8–4,2 силос надежно консервируется. Концентрация молочнокислых бактерий в нем составляет  $10^9$ – $10^{10}$  клеток на 1 г. В сырье увеличивается содержание белка и витаминов, растительные полимеры становятся более доступными для животных.

Для стимуляции процесса в качестве добавок при силосовании могут вноситься патока, послеспиртовая барда и другие источники углеводов либо культуры бактерий и ферментные препараты.

В Великобритании силосованию подвергают большинство отходов растениеводства, в Венгрии разработан способ силосования яблочных выжимок отдельно или в смеси с сухим свекловичным жомом и сечкой соломы.

#### **9.3.4. Компостирование отходов.**

**Основы процесса компостирования.** Компостированию могут подвергаться отходы растениеводства, животноводства, твердые бытовые отходы, сырой активный ил. Примерный фракционный состав этих отходов приведен в табл. 22.

Компостирование – это процесс биодegradации органических веществ смешанной популяцией микроорганизмов в условиях повышенной температуры и влажности. В результате образуется стабильный гумифицированный конечный продукт – компост. Он содержит наиболее стабильные органические вещества, продукты распада, биомассу

мертвых микроорганизмов, некоторое количество живых микроорганизмов и продукты химического взаимодействия компонентов. Этот продукт представляет ценность для сельского хозяйства и как органическое удобрение, и как средство, улучшающее структуру почвы.

Таблица 22

**Фракционный состав компостируемых отходов**

Фракция	Содержание, %
Водорастворимые соединения (сахара, аминокислоты)	2–30
Соединения, растворимые в органических растворителях (жиры, масла, воски)	1–15
Белки	5–40
Гемицеллюлозы	10–30
Целлюлоза	15–60
Лигнин	5–30
Зола	5–25

В естественных условиях процесс биодegradации протекает медленно, при температуре окружающей среды, в основном в анаэробных условиях. Естественный процесс может быть ускорен, если проводить его таким образом, чтобы сохранить часть выделяющегося тепла.

Процесс компостирования проходит благодаря активной деятельности сообщества микро- и макроорганизмов.

Наиболее многочисленную группу составляют бактерии, численность которых оценивается цифрой  $10^8$ – $10^9$  клеток на 1 г компостируемого материала. Бактерии представлены разными группами: кокки, палочки, нитчатые формы, – велико содержание спорообразующих организмов.

Актиномицеты развиваются при повышенных температурах и пониженной влажности, образуют тонкий разветвленный мицелий. Они имеют меньшую скорость роста, чем бактерии и грибы и на первых порах не составляют им конкуренции. Актиномицетов становится много ( $10^5$ – $10^8$  клеток на 1 г), когда начинается стадия остывания компоста. В поверхностном слое глубиной до 10 см они образуют налет белого или серого цвета.

Грибы, в том числе дрожжеподобные, менее многочисленны ( $10^5$ – $10^8$  клеток на 1 г). В компостируемом материале обнаружено около 50 видов различных грибов, из которых наибольшее значение имеют

термофилы. Грибы играют важную роль в деструкции целлюлозы, состояние компостируемой массы нужно регулировать таким образом, чтобы оптимизировать их активность. При температуре  $>50^{\circ}\text{C}$  грибы гибнут, а после снижения температуры они вновь распространяются из более холодных зон по всему объему.

От общей численности микроорганизмов, развивающихся на разных стадиях компостирования, 20–40% – мезофилы, доля термофилов превышает 40%, и содержание психрофилов достигает 20%.

В условиях высокой влажности материала могут расти водоросли, на организмах-хозяевах развиваются вирусы. Благодаря температурно-временному воздействию численность вирусов существенно снижается.

Микрофауна представлена разными видами простейших, которые питаются бактериями. В неблагоприятных условиях простейшие создают цисты.

Высшие грибы на поверхности компостируемых лигноцеллюлозных отходов образуют плодовые тела.

Когда температура компоста снижается до температуры окружающей среды, он становится доступным для почвенных животных. Клещи, черви, муравьи, термиты, пауки, жуки осуществляют перемешивание компоста, разрушают структуру материала. При этом увеличивается его удельная поверхность, ускоряется потребление компонентов микроорганизмами.

В начале процесса отходы находятся при температуре окружающей среды, имеют слабокислое значение pH. Присутствующие в них микроорганизмы начинают быстро размножаться, потребляя легкодоступные источники углерода. За счет выделяющегося тепла отходы подогреваются, скорость процессов окисления возрастает, кислотность увеличивается, так как накапливаются органические кислоты.

При достижении температуры  $40^{\circ}\text{C}$  мезофильные микроорганизмы начинают отмирать, распространение получают термофилы, температура поднимается еще выше (до  $60^{\circ}\text{C}$ ). В этих условиях грибы отмирают и процесс продолжают спорообразующие бактерии и актиномицеты. При распаде белков выделяется аммиак, происходит подщелачивание.

В течение термофильной стадии быстро потребляются легкоразлагаемые сахара, белки, жиры, в процесс вовлекаются более устойчивые субстраты, скорость окисления начинает падать. В это время тепловыделения снижаются и становятся равными теплотерям, фиксируется

максимальная температура, после чего компост вступает в стадию остывания. В некоторых случаях, часто при компостировании старых отходов, может быть несколько температурных максимумов.

Компостируемый материал достигает стабильного состояния, когда легкодоступные субстраты уже потреблены, соединения S и N связаны либо удалены, материал перестает дурно пахнуть, привлекать насекомых. Термофильные грибы из более холодных зон вновь распространяются на весь объем, вместе с актиномицетами потребляют полисахариды, целлюлозу, гемицеллюлозы. Поскольку выделения тепла небольшие, материал остывает до температуры окружающей среды, значение рН медленно падает, но остается щелочным.

Все эти изменения проходят в течение нескольких дней или недель. Далее начинается созревание компоста, которое длится месяцами. В это время происходит гумусообразование – совокупность процессов деструкции органических веществ, минерализации и гумификации, которая представляет собой процессы окислительного кислотообразования, конденсации, ароматизации, гидролитического расщепления.

Состав гумуса гетерогенный, в него входят различные по стадиям гумификации компоненты: гуминовые и фульвокислоты. В свою очередь каждая из этих групп гетерогенна по составу, свойствам, размерам молекул.

Гуминовые кислоты – наиболее активная и ценная часть гумуса, составляющая 75–80% его органической массы. Они хорошо растворяются в слабых растворах щелочей, оксалатов, фосфатов, фторидов натрия и аммония, в некоторых органических растворителях; из растворов хорошо осаждаются органическими кислотами. Гуминовые кислоты входят в состав органической массы торфов (до 60%), бурых углей (20–40%), некоторых почв (до 10%). По химической структуре это высокомолекулярные конденсированные ароматические соединения, в которых установлено наличие фенольных гидроксильных, карбоксильных, карбонильных и ацетильных групп, простых эфирных связей. Элементный состав, %: С – 52–62; Н – 2,8–5,8; О – 31–39; N – 1,7–5,0. С увеличением длительности гумификации гуминовые кислоты обогащаются карбоксильными группами, в них возрастает содержание кислорода. Молекулярная масса гуминовых кислот колеблется от 4000–6000 до 50 000–100 000 Да.

Фульвокислоты – более дисперсная фракция гумусовых веществ. Они растворяются в воде, кислотах, многих разбавленных щелочных

растворах, в ряде растворителей. В этой фракции выше доля кислорода и ниже углерода, высоко содержание карбоксильных и фенольных групп. Благодаря сильнокислотной реакции и хорошей растворимости в воде фульвокислоты энергично разрушают минеральную часть почвы. В отличие от гуминовых кислот, которые накапливаются в месте своего образования, фульвокислоты легко мигрируют в почве.

Групповой состав гумусовых веществ зависит от химического состава компостируемого материала. Отходы, богатые белками, дают максимальный выход гумусовых веществ, в составе которых доминируют гуминовые кислоты. Растительные остатки, основу которых составляет лигноцеллюлозный комплекс с волокнистым строением ткани, гумифицируются медленно и образуют значительно меньше гумусовых веществ.

Гумус играет значительную роль в почвообразовании и развитии плодородия почвы. Он способен в течение длительного времени удерживать питательные вещества и отдавать их в окружающую среду постепенно, создавая благоприятные условия для жизнедеятельности растений. Особенно большое значение имеет минерализация органических форм азота, входящего в состав гумусовых веществ и переходящего в доступные для растений минеральные формы.

#### **Параметры, влияющие на процесс компостирования.**

**Состав сырья.** Сырье должно содержать максимум органического материала и минимум неорганического.

Потребность в макро- и микроэлементах в основном удовлетворяется за счет сырья, иногда требуется корректировка соотношения C : N и содержания P. Оптимальное соотношение C : N = 25. Более высокое содержание C приводит к удалению его в виде CO<sub>2</sub>, иногда при недостатке азота на поздних стадиях компостирования в мезофильных условиях могут развиваться азотфиксаторы. Многие растительные отходы, сырой активный ил имеют низкое содержание C, в этом случае азот удаляется в виде аммиака.

**Добавки.** Для ускорения достижения термофильной стадии можно добавлять некоторое количество готового компоста.

**Дисперсность частиц.** Чем меньше размер частиц, тем выше их удельная поверхность, а значит, выше скорость микробиологической деструкции. Вместе с тем материал со слишком малым размером частиц имеет высокую плотность и узкие поры. Это ограничивает диффузию кислорода и диоксида углерода и замедляет процесс. Рекомендуемый

размер частиц: около 50 мм для систем с естественной аэрацией и 12–13 мм – в случае принудительной.

**Влажность.** Оптимальная влажность отходов для компостирования 50–60%. При более высокой влажности некоторые отходы (бумага) теряют структурную устойчивость, материал слеживается, нарушаются условия аэрации. При использовании носителей с жесткой структурой или в условиях принудительной аэрации влажность может быть и выше. При влажности отходов <30% скорость биологических процессов падает, при 20% они полностью прекращаются.

Следует учитывать, что при перемешивании либо при принудительной аэрации влажность отходов может уменьшаться, вплоть до их пересыхания.

**Аэрация.** Может быть естественной и принудительной. Естественной диффузии кислорода может оказаться недостаточно, особенно на ранних стадиях, когда потребность в нем самая высокая. В этом случае для предупреждения развития зон анаэробнозона в толще материала необходимо его перемешивание.

Принудительная аэрация позволяет увеличить скорость биодegradации и исключить необходимость перемешивания материала. Она может осуществляться с помощью специальных воздухопроводных каналов или труб, проложенных под компостируемым материалом, либо за счет отсасывания воздуха из этих каналов, либо за счет нагнетания.

**Тепловыделения.** При окислении различных органических соединений выделяется разное количество тепла. Теплота сгорания белков составляет 16,7 кДж/кг, углеводов – 15,7 кДж/кг, жиров – 37,7 кДж/кг. Поскольку состав отходов, как правило, гетерогенный, оценить теплоту, выделяющуюся при их разложении, сложно. В любом случае количество выделившегося тепла очень значительно и при компостировании больших масс можно достигнуть температуры 80–90°C. Регулировать температуру материала можно интенсивностью аэрации либо перемешиванием.

**Перемешивание.** Перемешивание необходимо, во-первых, для предотвращения зон анаэробнозона, во-вторых, для диспергирования крупных фрагментов сырья, увеличения его удельной поверхности. Управление процессом перемешивания обеспечивает переработку большей части отходов в термофильных условиях.

Избыточное перемешивание приводит к охлаждению и пересыханию материала, к разрывам мицелия грибов и актиномицетов. Кроме того, при этом возрастают энергетические затраты.

### **Системы для компостирования.**

**Компостные ряды и ямы.** Компостные ряды с естественной аэрацией должны иметь треугольную в сечении форму, ширину основания 2,5 м, высоту 1,5 м и любую длину. В таких рядах материал можно несколько раз перемешать, а иногда он может и не требовать перемешивания, если структура материала обеспечивает нормальную аэрацию, температура не поднимается выше 60°C. В компостных рядах может быть организована принудительная аэрация.

Компостные ямы можно устраивать глубиной до 1,2 м, но при этом они должны иметь вертикальные отверстия для аэрации. В Китае, например, при укладывании материала для компостирования его перекладывают горизонтальными бамбуковыми палками, связанными с вертикальными. Через сутки палки извлекают и образуются каналы для аэрации.

**Механизированные процессы.** Собранные отходы с помощью специальных транспортеров, ковшей или погрузчиков загружаются в закрытые силосы. В них происходит более равномерное прогревание, и активная биодegradация завершается за несколько дней.

Простейший пример – вертикальный, круглый в сечении силос с перфорированным днищем для аэрации. Перемешивание осуществляется с помощью вертикального шнека либо горизонтальных лопастей.

Более сложная система – многодонный силос. Днища имеют сегменты, при открытии которых материал перемещается в нижнюю секцию. Аэрация осуществляется либо через днища, либо через лопасти.

**Применение компоста.** При компостировании теряется до 30–40% массы материала в виде воды и диоксида углерода. Содержание устойчивых органических веществ в готовом компосте в зависимости от природы исходного материала составляет от 25 до 80%. Элементный состав компоста, %: С – 8–50; N – 0,5–3,5; P – 0,1–1,6; K – 0,4–1,6; Ca – 0,7–1,5. Компост представляет собой в первую очередь средство для улучшения структуры почвы и, в некоторой степени, удобрение.

Клейкие вещества, а также мицелий грибов и актиномицетов способствуют агрегированию частиц почвы. За счет этих факторов повышается устойчивость почвы к ветровой и водной эрозии. Органические компоненты компоста благоприятствуют увеличению способности почвы удерживать влагу. Во Франции и Германии компост применяется в основном для укрепления крутых склонов, на которых размещают виноградники.

При добавлении компоста в почву он разрушается, выделяя питательные вещества для растений – источники N, P, K, микроэлементы.

Описаны случаи использования компоста в качестве насадки в биофильтрах для очистки воздуха от дурнопахнущих компонентов.

**9.3.5. Утилизация соломы.** Как отмечалось выше, солома является самым многотоннажным отходом растениеводства. Вследствие устойчивости лигноцеллюлозного комплекса она труднее других отходов подвергается биодegradации в окружающей среде.

Основными направлениями утилизации соломы являются сжигание и запахивание.

Достоинством сжигания является уменьшение количества возбудителей болезней и сорняков. Вместе с тем при этом теряются полезные вещества, которые могут удобрять почву, и загрязняется атмосфера.

Компоненты соломы, запаханной в почву, в конце концов разрушаются в результате химических и биологических процессов. Однако некоторые продукты распада неблагоприятно влияют на рост растений. Многие исследования показывают, что при анаэробной биодegradации соломы образуются соли уксусной, пропионовой и масляной кислот (главным образом уксусной), ингибирующие прорастание и рост злаков. Кроме того, микробная популяция, осуществляющая разложение, поглощает азот, обедняя им почву. Это также является причиной снижения урожайности.

В настоящее время проводятся исследования, направленные на ускорение или переориентацию процесса биодegradации растительных отходов. Например, при внесении в почву целлюлолитических грибов (родов *Trichoderma*, *Penicillium*) разложение соломы ускоряется, раньше достигается токсичный уровень уксусной кислоты, и до сева зерновых она потребляется почвенными микроорганизмами.

Еще лучший эффект дает совместное применение целлюлозоразрушающих и азотфиксирующих микроорганизмов, поскольку утилизация соломы почвенными микроорганизмами может быть замедлена вследствие недостатка азота.

Следует отметить, что реализация этого направления связана с рядом сложностей: необходимостью организации промышленного крупномасштабного производства грибных препаратов, препараты эти должны сохранять активность при высушивании и хранении, должны выдерживать конкуренцию с микробиотой почвы.

## Глава 10. УТИЛИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

### 10.1. Нормы накопления, состав и свойства твердых бытовых отходов

**10.1.1. Нормы накопления твердых бытовых отходов.** Твердые бытовые отходы (ТБО), образующиеся в результате жизнедеятельности людей, относят к отходам потребления. Основные источники их образования: жилые дома, магазины, культурные заведения, предприятия общественного питания, гостиницы, коммунальные службы (снос и ремонт зданий, уборка улиц, зеленое строительство), учреждения (учебные заведения, больницы, тюрьмы).

Под нормой накопления понимают количество отходов (в кг или м<sup>3</sup>), образующихся на расчетную единицу в единицу времени. Расчетная единица – 1 человек для жилого фонда, 1 место в гостинице, 1 м<sup>2</sup> торговой площади и т. д. Единица времени – сутки, год.

На нормы накопления и состав ТБО влияют следующие *факторы*:

- степень благосостояния населения;
- климатические условия;
- степень благоустройства жилого фонда;
- культура торговли;
- развитие общественного питания;
- время года.

В среднем образуется около 0,3 т ТБО на 1 чел. в год, в развитых странах эта цифра может достигать 1 т. В России, например, ежегодное количество ТБО на душу населения составляет 0,195 т, в США – 0,665 т.

Для крупных городов нормы накопления ТБО выше, чем для средних и малых городов.

Нормы накопления ТБО в учреждениях и предприятиях общественного назначения составляют 30–50% от норм накопления в жилых зданиях (табл. 23).

**10.1.2. Состав твердых бытовых отходов.** До 20% и более в составе ТБО, поступающих от населения, составляют упаковочные материалы (бумага, картон, полимерные материалы, дерево). Другая часть отходов – это пищевые отходы, газеты и журналы, текстиль, игрушки и

инструменты, посуда, изношенные шины, батарейки, крупные предметы домашнего обихода (мебель, холодильники, теле- и радиоаппаратура, стиральные машины и т. д.). Морфологический состав отходов приведен в табл. 24.

Таблица 23

**Ориентировочные нормы накопления ТБО, образующихся в жилых зданиях и объектах общественного назначения**

Объект образования отходов	Расчетная единица	Норма накопления ТБО в год		Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>
		кг	м <sup>3</sup>	
Жилые дома: благоустроенные	1 чел.	180–225	0,9–1,1	190–220
		350–450	1,2–1,5	
Гостиница	1 место	120	0,7	170
Детский сад, ясли		95	0,4	240
Учебные заведения		24	0,12	200
Театр, кинотеатр		30	0,2	150
Учреждение	1 сотрудник	40	0,22	180
Продовольственный магазин	1 м <sup>2</sup> торговой площади	160–250	0,8–1,5	160–190
Промтоварный магазин		80–200	0,5–1,3	150–160
Рынок		100–200	0,6–1,3	160–170
Санатории, пансионаты, дома отдыха	1 место	250	1,0	250
Вокзалы, автовокзалы, аэропорты	1 м <sup>2</sup> площади	125	0,5	250
Больницы	1 койка	228	0,69	330
Поликлиники	1 посещение	30	0,156	190

На состав ТБО влияют те же факторы, от которых зависят нормы накопления отходов.

С развитием цивилизации изменяется состав ТБО. Увеличивается приобретение продуктов в упаковке, расширяется ассортимент и возрастает количество применяемых средств гигиены, парфюмерно-косметической продукции, в соответствии с модными тенденциями чаще приобретается одежда и обувь, меняется бытовая техника, распространяется использование предметов одноразового употребления. При этом в составе отходов снижается доля бумаги и картона, пищевых отходов, увеличивается содержание полимерных материалов.

Морфологический состав ТБО

Компонент	Доля данного компонента, %	
	РБ	США
Бумага, картон	20–36	38–42
Пищевые отходы	20–38	7–8
Стекло	5–8	7–8
Металл	2–3	8–9
Полимерные материалы	3–5	7–8
Текстиль	3–6	2–3
Резина, кожа	2–3	2–3
Дерево, листья	1–4	3–4
Другие материалы	20–40	26–34

В южных климатических зонах выше потребление овощей и фруктов, соответственно, возрастает доля пищевых отходов. Содержание пищевых отходов и листьев выше в осеннее время года, в зимнее время года снижается доля уличного смета. В неблагоустроенном жилом фонде в зимнее время года возрастает доля золы и шлака.

**10.1.3. Свойства твердых бытовых отходов.** Твердые бытовые отходы обладают некоторыми особыми свойствами, которые должны учитываться при обращении с ними.

Во-первых, ТБО характеризуются механической (структурной) связанностью за счет волокнистых фракций (текстиль, бумага, картон) и сцепления, обусловленного наличием влажных липких компонентов. Благодаря связанности они обладают способностью к сводообразованию, не просыпаются в решетку с расстояниями между стержнями 20–30 см, налипают на металлические стенки с углом наклона к горизонту 65–70°.

Во-вторых, ТБО обладают абразивностью, т. е. способностью истирать соприкасающиеся с ними поверхности. Это свойство обусловлено наличием фарфора, стекла, камней и др.

В-третьих, ТБО характеризуются слеживаемостью. При длительной неподвижности теряют сыпучесть и уплотняются (с выделением фильтрата) без дополнительного внешнего воздействия.

И, наконец, при длительном контакте ТБО оказывают коррозирующее воздействие на металлы. Это связано с высокой влажностью отходов и наличием в фильтрате растворенных солей.

## **10.2. Обезвреживание и переработка твердых бытовых отходов**

**10.2.1. Система управления отходами.** Системы управления отходами необходимы для предотвращения неконтролируемого распространения их и эмиссии в окружающую среду. Система управления бытовыми отходами включает сбор, транспортировку и переработку.

Основные *мировые тенденции* перспективного развития в системе управления ТБО включают:

1. Селективный сбор ТБО с обязательным разделением органической и минеральной частей и выделением черных и цветных металлов, пластмассы, стекла, бумаги, пищевых отходов и т. д.

В большинстве развитых стран организован раздельный сбор отходов, при котором само население их сортирует. К примеру, после объединения Германии все многоэтажные дома в восточной части лишились мусоропроводов. В Западной Германии к тому времени уже был налажен раздельный сбор отходов, и этот опыт был распространен на восточную часть. В Японии в некоторых городах мусор подразделяют на 32 категории, для каждой из которых существуют специальные приемные пункты. В Египте нет раздельного сбора ТБО, но есть сортировка собранных отходов, после чего более 80% их направляется на переработку.

В нашей республике в последнее время реализован ряд проектов, направленных на раздельный сбор ТБО. Важное значение для реализации таких проектов имеют информационная работа с населением, прежде всего с подрастающим поколением, экономические стимулы, например, доплата дворникам и жильцам за сбор вторичных ресурсов, работа местных властей по организации раздельного сбора, своевременного вывоза заполненных урн. В первую очередь работа проводится с жильцами частного сектора, поскольку из многоэтажных домов организовать раздельный сбор отходов значительно сложнее.

2. Извлечение и переработка ценных компонентов ТБО во вторичное сырье.

Только при наличии такой переработки раздельный сбор ТБО будет обоснован и экономически оправдан.

3. Усиление законодательных мер, направленных на стимулирование отраслей по переработке вторичных продуктов, извлеченных из ТБО.

4. Введение экологического налога на продукцию, для упаковки которой используются материалы, не подлежащие дальнейшей переработке.

К настоящему времени наибольшее распространение получили три основных метода утилизации ТБО: утилизация на полигонах и свалках, термический метод (сжигание и пиролиз) и компостирование (табл. 25).

Таблица 25  
Доля разных методов утилизации ТБО в экономически развитых странах, %

Технология	США	Англия	Франция	Германия	Япония
Утилизация на полигонах и свалках	84	90	55	78	57
Термический метод	15	9	35	20	40
Компостирование	1	1	10	2	3

**10.2.2. Захоронение отходов на полигонах и свалках.** В Нью-Йорке (США) большую часть городских отходов (90%) направляют на одну из крупнейших свалок мира «Фреш Киллс», расположенную на острове Стейн-Айленд, около 24 тыс. т ТБО/сут доставляют на эту свалку круглосуточно двумя баржами. Властями Нью-Йорка была поставлена задача: закрыть свалку в 1991 г., но до сих пор альтернативы не найдено. Аналогичная ситуация сложилась во многих североамериканских городах: около  $\frac{2}{3}$  свалок закрыты, а срок эксплуатации остальных истекает в ближайшие 5 лет.

На европейском континенте мусора производится меньше, однако из-за ограниченности площадей проблема его ликвидации стоит не менее остро. В среднем в Европе на свалки удаляют около 55% образующихся ТБО.

В Японии общую фракцию, оставшуюся после выделения перерабатываемых отходов, в обязательном порядке городские власти заставляют разделять на горючую и негорючую части. Горючий мусор (до 72%) направляют на мусоросжигательные заводы, негорючий – сортируют, плавят и отправляют на переработку. Только 24–25% ТБО направляют для обезвреживания на один из 2411 полигонов, созданных с учетом всех экологических требований. Закрытые свалки после рекультивации используют под спортивные сооружения. Единственным признаком бывшей свалки являются трубы для отвода метана из толщи свалочного грунта.

В Финляндии практически нет свалок, отходы сортируются и идут на переработку.

В Республике Беларусь насчитывается около 200 свалок и полигонов. Самые современные – в Слониме и Ивье. В окрестностях столицы функционируют 3 свалки: Тростеневская (1957 г., 26,7 га, гидроизоляция грунта не предусмотрена, захоронено более 16 млн. т), Северная (1981 г., 25 га, предусмотрена гидроизоляция основания, захоронено около 30 млн. т, использована система защиты грунта) и Прудиче (1968 г., 22 га, без гидроизоляции основания), – которые принимают промышленные отходы.

Современный полигон – это комплекс природоохранных сооружений, предназначенный для складирования, изоляции и обезвреживания ТБО, обеспечивающий защиту от загрязнения атмосферы, почвы, поверхностных и грунтовых вод, препятствующий распространению грызунов, насекомых и болезнетворных микроорганизмов.

При выборе способа обезвреживания ТБО путем складирования их на полигонах и свалках принимают во внимание следующие *обстоятельства*:

1) для достижения минимального загрязнения окружающей среды предусматривают водонепроницаемые защитные экраны, пересыпку ТБО инертными материалами, максимальное уплотнение ТБО, устройство системы удаления и очистки фильтрата, правильную организацию работ по приемке и распределению ТБО на территории полигона;

2) газ, образующийся в процессе эксплуатации, должен проходить специальную очистку, после чего его используют, а территории закрытых полигонов подлежат рекультивации;

3) ценные компоненты ТБО вторично по данной технологии практически не используют;

4) полигоны захоронения отходов устраивают при наличии свободных площадей, предназначенных для этих целей.

Полигоны размещают за пределами городов и населенных пунктов, размер санитарно-защитной зоны должен быть не менее 500 м от жилой застройки до границы полигона. По гидрологическим условиям благоприятными считаются участки с отложениями глины и сулинков и залеганием уровня грунтовых вод на глубине более 2 м.

Нельзя использовать под полигоны участки с выходом грунтовых вод на поверхность в виде ключей, территории, затопляемые водами, участки, расположенные ближе 15 км от аэропортов. Под полигоны отводят отработанные карьеры глин, участки в лесных массивах, овраги.

При отводе участка выдают рекомендации по использованию нарушенной территории после закрытия полигона: создание лесопаркового хозяйства, устройство открытых складов строительных материалов. Капитальное строительство на участках складирования ТБО запрещено из-за выделения ядовитых и взрывоопасных газов в течение длительного времени (свыше 40 лет после закрытия полигона).

На выбранном участке проводят геологические, гидрогеологические и санитарные исследования.

Предусматривают устройство искусственных водонепроницаемых экранов:

- однослойного глиняного, толщиной не менее 0,5 м;
- грунтобитумного, обрабатывая грунт органическими вяжущими материалами или отходами нефтеперерабатывающей промышленности (0,2–0,4 м);
- двухслойного экрана из латекса;
- из полиэтиленовой пленки, стабилизированной сажей и др.

На свалках и полигонах в условиях постоянно накапливающихся отходов происходит сложный комплекс превращений: на начальном этапе главную роль играет аэробная микробиота, далее по мере изоляции и уплотнения создается анаэробная зона, в которой протекают процессы брожения, в том числе метанового, сульфатредукции, деполимеризации, гумификации и др. Вследствие выделения биологического тепла в толще отходов поддерживается температура 30–40°C.

В результате всех этих процессов образуется два продукта, представляющих опасность для окружающей среды: фильтрат и биогаз.

В фильтрующуюся через слой отходов воду переходят органические и минеральные вещества, в том числе токсичные (галогенсодержащие органические соединения, ароматические соединения, тяжелые металлы). Уровень загрязненности фильтрата по ХПК может достигать 35 тыс. мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, по БПК – 15 тыс. мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>.

Уплотнение отходов на свалках снижает их проницаемость, что приводит к уменьшению объема образующегося фильтрата. На современных высоконагружаемых полигонах предусматривают строительство внутренней дренажной системы, а собранный фильтрат направляется на очистку. Наиболее распространенный способ очистки – перекачка в канализационные сети для дальнейшего обезвреживания его вместе с городскими сточными водами. Это допускается, если объем

фильтрата не превышает 5% стока, подаваемого на очистку. Широко применяется технология распределения собранного фильтрата по поверхности складываемого материала для увеличения влажности и ускорения процесса стабилизации отходов. При этом объем фильтрата уменьшается из-за испарения, но концентрация загрязнений в конечном стоке будет более высокой.

В последние годы достаточно широкое распространение получили биологические методы очистки фильтрата в аэробных и анаэробных условиях. В Германии, например, производительность установок по аэробной обработке фильтратов составляет около 4000 м<sup>3</sup>/сут. При биологической очистке содержание металлов в фильтрате снижается на 10–85%.

Биогаз, образующийся в толще свалки, кроме метана и других алканов, содержит ароматические, в том числе галогенированные, углеводороды, хлор, аммиак, сероводород и представляет серьезный источник загрязнения атмосферы. Проникая в подвалы, шахты, колодцы, биогаз создает опасность взрыва. Целесообразно собирать, очищать и использовать биогаз, образующийся на полигонах.

**10.2.3. Термические методы переработки твердых бытовых отходов.** Цель термических методов переработки ТБО – обезвреживание и получение энергии (топлива). Под термическими методами понимают сжигание и пиролиз.

**Сжигание.** В настоящее время мусоросжигание наиболее распространено в Японии, Германии, Франции, Швейцарии, Швеции.

Достоинствами этого метода являются надежное обезвреживание, получение энергии, экономия земельных площадей. Основные недостатки – уничтожение ценных компонентов, высокие капитальные затраты и загрязнение воздушной среды взвешенными частицами золы и недожога, а также вредными газообразными примесями (оксиды серы, азота, углерода, хлорид водорода, фторид водорода, углеводороды, диоксины, фураны и др.). Современные мусоросжигательные заводы (МСЗ) должны быть оборудованы высокоэффективными газоочистными устройствами, стоимость которых достигает 50% общих капиталовложений на строительство.

Вместе с тем отсутствуют системы газоочистки, позволяющие уловить диоксины, ртуть. Поэтому в мировой практике наметилась тенденция отказа от сжигания мусора без предварительной подготовки.

Закрываются старые мусоросжигательные заводы в Финляндии, США, Японии, Германии.

По прогнозам специалистов, все более широкое распространение будет получать сжигание специально подготовленных отходов. С 70-х гг. XX в. в США и Великобритании проводятся работы по переработке ТБО в гранулированное топливо, при сжигании которого снижается негативное воздействие на окружающую среду. При изготовлении такого топлива используются операции дробления, извлечения различных фракций, что повышает капитальные и эксплуатационные затраты, однако позволяет получить топливо более высокого качества.

В России построено 8 МСЗ, в Украине – 3. В Минске, на УП «Эко-рес», в течение 9 лет функционировала мусоросжигательная станция мощностью 4 т/ч, причем утилизация тепла от сжигания не проводилась. Выбросы вредных веществ (оксиды азота, серы, углерода, тяжелые металлы, пыль, сероводород) в атмосферу достигали 400 т в год. По этой причине в 1992 г. станция была выведена из эксплуатации.

Согласно постановлению Совета министров, к 2008 г. в Республике Беларусь необходимо построить 15 заводов по переработке мусора и вторичного сырья, 2 из них – в Минске.

**Пиролиз.** Практика показывает, что наиболее перспективным является способ обезвреживания отходов в две ступени: аэробное биотермическое компостирование органической части с получением компоста и пиролиз некомпостируемой части (резина, кожа, дерево, полимерные материалы и т. д.). При пиролизе в результате термического разложения отходов без доступа кислорода образуются пиролизные газы и твердый углеродистый остаток – пирокарбон. Пиролизные газы подвергают дожигу с утилизацией тепла и очисткой полученных дымовых газов, пирокарбон после охлаждения измельчают, выделяют черные и цветные металлы и используют в качестве топлива. Теплота сгорания пирокарбона составляет 12–13 тыс. кДж/кг.

**10.2.4. Компостирование твердых бытовых отходов.** Различают компостирование на специальных мусороперерабатывающих заводах и полевое.

**Компостирование в промышленных условиях.** Метод механизированного биотермического компостирования в мировой практике начали применять в 20-х гг. прошлого столетия. Такие заводы эксплуатируются

во Франции, Италии, Германии, Нидерландах. В странах бывшего СССР заводы были построены в Москве, Санкт-Петербурге, Минске, Ташкенте, Баку, Алма-Ате и др., однако в настоящее время их эксплуатация возможна только при осуществлении раздельного сбора или сортировки отходов. В противном случае содержание тяжелых металлов в компосте превышает нормативы.

Технологический процесс на мусороперерабатывающих заводах механизирован, схема представлена на рис. 31.

ТБО с мусоровозов перегружаются в бункеры, днища которых выполнены в виде пластинчатых питателей. Отходы из бункеров перегружаются на ленточные конвейеры, по которым они направляются в сортировочный корпус.

Крупные некомпостируемые фракции отделяют с помощью цилиндрического грохота с размером ячеек сит 150–250 мм и направляют в бункер для сбора балласта.

Просеянный материал по конвейерам подается в главный корпус, проходя последовательно электромагнитные сепараторы для выделения черного и цветного металла и аэродинамический сепаратор, выделяющий легкие фракции – пленку и бумагу. Черный металл подвергают прессованию на гидравлических пакетировочных прессах и отгружают потребителю, цветной металл собирается в бункере-накопителе.

Отсортированные отходы по конвейерам подают в загрузочные устройства биотермических барабанов, где протекает компостирование. Биобарабан представляет собой сварной металлический цилиндр, установленный на роликоопорах с уклоном в сторону разгрузочного устройства. Биобарабан снабжен воздуховодами, в которые от вентиляторов подается воздух. Для сокращения теплопотерь поверхность теплоизолирована, внутри барабана в предохранительных стаканах установлены термодатчики.

Ежедневно биобарабан загружают свежими отходами на половину объема, они попадают в среду с активным биотермическим процессом, ускоряется достижение термофильной стадии. Масса разогревается до температуры 60°C, при которой погибают патогенные микроорганизмы, яйца гельминтов, личинки и куколки насекомых, т. е. отходы обезвреживаются. Кроме разложения и обезвреживания отходов, в биобарабане осуществляется их механическое истирание. Выходящий продукт по внешнему виду не похож на исходный мусор, плотность отходов увеличивается в 3–4 раза.

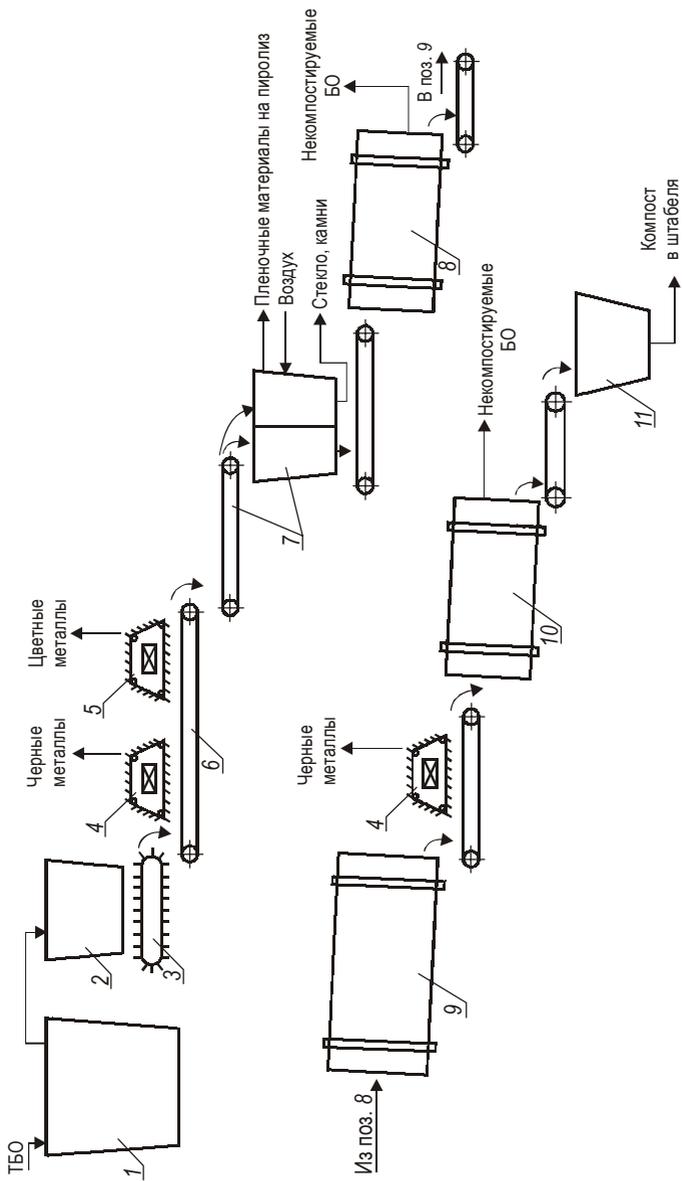


Рис. 3.1. Технологическая схема переработки ТБО с биотермическим компостированием:

1 – приемный бункер; 2 – дозирующий бункер; 3 – пластинчатый питатель; 4 – магнитный сепаратор черных металлов; 5 – магнитный сепаратор цветных металлов; 6 – ленточный транспортер; 7 – баллистический пневмосепаратор; 8 – грохот; 9 – биотермический барабан; 10 – контрольный грохот; 11 – дробилка компоста

После биобарабана отходы проходят баллистический стеклосепаратор с пневмоотсевом пленки. Он представляет собой конвейер с быстрым движением ленты (2–7 м/с), с которого материал сбрасывается в воронку, разделенную перегородкой на два отсека. Тяжелые частицы, обладающие большей инерцией (стекло, камни), отбрасываются в дальний отсек, а легкие фракции (компост) ссыпаются в ближний. В верхней части воронки встроен всасывающий патрубок, в который вентилятором засасывается пленка.

Окончательно компост очищается от балластных фракций на мелком сите (10–15 мм) грохота и по системе конвейеров подается на складские площадки. С помощью бульдозеров формируют штабеля, в которых компост дозревает. Штабеля периодически «перелопачивают» и при необходимости увлажняют. Время дозревания компоста 2–3 мес.

Некомпостируемые фракции направляют на полигон для захоронения или на сжигание.

Выход компоста составляет около 60% от массы отходов, металлов выделяется около 4%, легких фракций (пленка, текстиль) – до 13%, остальное – газовые потери и некомпостируемые (балластные) фракции.

Компост как органическое удобрение используется в сельском хозяйстве для выращивания зерновых и технических культур, а также в питомниководстве, озеленении и при рекультивации земель. Компост имеет влажность 40%, содержание элементов на сухую массу составляет, %: калий – 0,3–0,5; азот общий – 1,2–1,5; кальций – 2,5–5,0; фосфор – 0,5–0,6.

За последние десятилетия в составе ТБО резко повысилось содержание тяжелых металлов в составе батарей, аккумуляторов, ламп накаливания, люминисцентных ламп, синтетических материалов (красители, стабилизаторы), бумаги с типографской краской, металлических покрытий кожи и т. п. В компосте, выпускаемом на минском УП «Экорес», содержание тяжелых металлов превышало предельно допустимые концентрации, поскольку компостированию подвергались отходы, не прошедшие сортировку. Постановлением Минского городского центра гигиены и эпидемиологии в 1997 г. была запрещена реализация компоста, и завод приостановил проведение биотермического компостирования ТБО. В настоящее время на заводе осуществляется только прессование отходов в кипы для удобства их транспортирования и захоронения на свалке.

**Полевое компостирование.** Применяют в городах с населением 50–500 тыс. человек при наличии свободных территорий. При правильно

организованном полевом компостировании в результате переработки ТБО получают компост, только в отличие от промышленных условий процесс этот более длительный (до полугода, в зависимости от сезона). При использовании предварительного дробления отходов процесс ускоряется, выход компоста увеличивается.

При выборе площадки для полевого компостирования руководствуются теми же требованиями, что и при выборе участка под полигон.

Из выгруженных отходов с помощью грейферных кранов и бульдозеров формируют штабеля, высота которых зависит от метода аэрации. При принудительной аэрации высота штабеля может превышать 2,5 м. Поверхность штабелей укрывают слоем торфа, готового компоста или грунта толщиной около 0,2 м для предотвращения рассеивания легких фракций, размножения мух и для устранения неприятного запаха.

В ходе процесса наружные слои материала разогреваются меньше, чем внутренние, поэтому для надежного обезвреживания всей массы отходов их «перелопачивают». При этом улучшаются условия аэрации.

Зрелый компост перед отправкой потребителю очищают от крупных балластных фракций с помощью грохота.

В некоторых городах осуществляют совместное полевое компостирование твердых бытовых отходов и обезвоженного осадка сточных вод.

#### **10.2.5. Другие методы переработки твердых бытовых отходов.**

**Получение биогаза.** Извлечение биогаза, образующегося на полигонах ТБО, осуществляется в США, Бразилии, Канаде, Швейцарии, Японии, Англии и в других странах. Биогаз извлекают с помощью вертикальных и горизонтальных перфорированных труб из полиэтилена. Этот процесс может быть пассивным (под действием внутреннего давления) и активным (с применением насосов и газодувок). Но при этом в толщу отходов не должен попадать воздух.

Во Франции в производственных условиях апробирована технология переработки ТБО в анаэробных условиях с получением биогаза.

Измельченные в дробилке отходы ленточным конвейером, над которым расположен электромагнитный сепаратор для выделения черного металлолома, направляются в метантенк. Для достижения оптимальной консистенции среды подается рециркуляционная вода, выделяемая из сброженной массы прессованием. Температура сбраживания 25°C, длительность 10–16 сут. Часть биогаза компрессором подается

под давлением под слой сбраживаемой массы для ее перемешивания, остальная часть направляется в газгольдер.

Из 1 т бытовых отходов получают 120–140 м<sup>3</sup> биогаза.

**Гидролиз и сбраживание в этанол.** В США и Великобритании проводились эксперименты по кислотному гидролизу целлюлозосодержащей фракции ТБО с последующим сбраживанием в этанол.

Разработаны технологии изготовления из твердых бытовых отходов топливных брикетов, строительных блоков.

Фракция пищевых отходов может после стерилизации использоваться для производства кормовой добавки (Италия, Рим). Биоразлагаемая фракция направляется на поля в качестве удобрения.

## **Глава 11. БИОДЕСТРУКЦИЯ КСЕНОБИОТИКОВ И ПОЛЛЮТАНТОВ. КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

### **11.1. Биодegradация ксенобиотиков в окружающей среде**

**Распространение и поведение ксенобиотиков в окружающей среде.** В настоящее время известно более 6 млн. индивидуальных химических соединений. Около 90% этих веществ имеют синтетическое происхождение, они появились в последние 50 лет. Ежегодно синтезируется около 200 тыс. новых соединений.

Большинство этих соединений чужеродны для многих организмов и экосистем в целом, т. е. являются ксенобиотиками. Закономерности структурно-функционального воздействия чужеродных веществ на живую природу стали предметом изучения новой области биологии – ксенобиологии. Ксенобиология рассматривает вопросы влияния ксенобиотиков на различных уровнях организации живых систем, механизмы биоаккумуляции и биотрансформации ксенобиотиков.

Наибольшее количество ксенобиотиков являются продукцией химической и фармацевтической промышленности (пластификаторы, красители, поверхностно-активные вещества (детергенты), взрывчатые вещества, пестициды, лекарственные препараты, консерванты и др.).

Попадание ксенобиотиков в окружающую среду привело к ее загрязнению.

Поначалу существовало убеждение, что природные сообщества микроорганизмов способны деструктировать все органические соединения. Вследствие повсеместного присутствия микроорганизмов в окружающей среде и их высокого катаболического потенциала предполагалось, что любое соединение, попавшее в биосферу, будет полностью минерализовано.

Однако со временем был установлен факт накопления ксенобиотиков в окружающей среде и в живых организмах, и миф о «микробиологической надежности» был разрушен. Действие пестицидов в почве может проявляться годами. Так, остатки токсафена обнаружены в почве спустя 11 лет после применения, а дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) сохраняется десятки лет. При этом он обладает способностью аккумулироваться в живых организмах, его концентрация в цепи: водная среда >

фитопланктон > зоопланктон > мелкая рыба > крупная рыба > хищная птица – увеличивается на 6–8 порядков.

Пестициды представляют наибольшую опасность для окружающей среды.

Во-первых, они применяются довольно широко и в больших количествах. Инсектициды используют для защиты растений от насекомых-вредителей, фунгициды – для борьбы с заболеваниями растений грибкового происхождения, гербициды – для уничтожения сорной растительности, альгициды – для защиты морских судов от обрастаний, для борьбы с зарастанием каналов и других водных систем.

Во-вторых, пестициды специально вносятся в окружающую среду, попадают в лито-, гидро- и атмосферу.

В-третьих, это соединения, обладающие биологической активностью. По данным Национальной академии наук США, 30% инсектицидов, 60% гербицидов и 90% фунгицидов являются канцерогенами разной степени, а >300 пестицидов, которые используются в сельском хозяйстве, способны вызывать мутации.

Особенностью пестицидов является то, что это разнообразные по химическому строению соединения: хлорсодержащие органические соединения, спирты, производные фенола, жирные кислоты и их производные, ароматические карбоновые кислоты, амины и соли четвертичных аммониевых оснований, гетероциклические соединения и др.

Поведение ксенобиотиков в окружающей среде обусловлено структурой и свойствами самих соединений и физико-химическими условиями среды. Может осуществляться их фотохимическое разложение и химическое окисление, гидролиз, связывание компонентами почвы и биодegradация.

Вклад микроорганизмов в процессы деградации различными авторами оценивается в 10–70%. Такая вариабельность показателей объясняется разнообразием структуры и свойств этих соединений.

Почва как биологическая система насыщена разнообразными микроорганизмами, которые в совокупности обладают широким набором ферментов, способных трансформировать органические вещества. Численность микроорганизмов в почве существенно варьирует в зависимости от почвенно-климатических условий, агротехнических мероприятий, качества растительного покрова. Биомасса их колеблется от нескольких сот килограммов до нескольких тонн на 1 га и составляет 0,01–0,4% от массы почвы.

Первым и наиболее простым доказательством участия микроорганизмов в разложении пестицидов является более высокая скорость деградации химических веществ в нестерильной почве по сравнению со стерильной.

Для процессов микробиологической деградации характерно наличие более или менее длительной лаг-фазы, в течение которой осуществляется адаптация популяции почвенных микроорганизмов к чужеродному химическому соединению.

Адаптация происходит, как правило, очень медленно. Тем не менее при многократном применении пестицидов установлено изменение микробного ценоза почвы в сторону возрастания в ней относительной доли микроорганизмов, способных разлагать эти вещества. Степень изменения зависит от химического состава препарата и условий жизнедеятельности микроорганизмов. Прекращение использования данного пестицида, как правило, приводит к быстрому сокращению микробиоты, способной к его деструкции.

Для разложения ксенобиотиков, уже находящихся в окружающей среде, на складах и полигонах, а также для детоксикации отходов различных производств и предотвращения дальнейшего загрязнения природы могут найти применение препараты микроорганизмов – активных деструкторов ксенобиотиков.

**Получение микроорганизмов – деструкторов ксенобиотиков.** Исследования по биодegradации ксенобиотиков почвенными микроорганизмами проводятся, начиная с середины 60-х гг. XX в.

Существует довольно много работ по выделению и культивированию микроорганизмов с «потенциалом биодegradации» ксенобиотиков. Авторы этих работ рассматривают методические аспекты и практические результаты выделения микроорганизмов, принципы культивирования, хранения и использования штаммов-деструкторов. Кроме того, важными направлениями исследований являются изучение физиологии и биохимии микробных культур, установление механизмов деструкции органических веществ в живой клетке.

На основании таких сведений можно обоснованно подбирать микроорганизмы, способные к биодegradации определенных соединений, а также определять соединения, которые могут быть разрушены определенными группами микроорганизмов.

В смешанных культурах микроорганизмов деструкция ксенобиотиков осуществляется более быстро и полно, поскольку имеет место

комбинация катаболических возможностей отдельных представителей сообществ микроорганизмов. В результате этого достигается минерализация, недоступная чистым культурам микроорганизмов.

Для получения микроорганизмов – активных деструкторов ксенобиотиков – применяют селективные среды, содержащие данные ксенобиотики. Культуры микроорганизмов выделяют из образцов природных субстратов либо используют коллекционные штаммы, в том числе искусственные смеси таких штаммов.

Широкие возможности для отбора активных деструкторов имеет непрерывное культивирование в режиме возрастающих концентраций загрязнений. В таких условиях из исходных сообществ элиминируются микроорганизмы, имеющие невысокую скорость роста и недостаточный потенциал биодegradации данных загрязнений. В селекционированном сообществе преобладает от 2 до 10 видов микроорганизмов, обычно, бактерий, осуществляющих эффективное окисление загрязнений. Этот метод является основным в селекции микробных сообществ, предназначенных для биологической очистки сточных вод.

Разработан прием селекции, позволяющий получать ассоциацию микроорганизмов, не только эффективно ассимилирующую субстрат, но и сохраняющую жизнеспособность в течение длительного периода голодания. Прием основан на периодической смене типа питания в биореакторе: переход от избытка к недостатку субстрата. На первом этапе идет активное окисление загрязнений, а на втором – использование внутриклеточных резервных соединений, минерализация биомассы. Такая ассоциация будет стабильно функционировать при очистке производственных сточных водах непостоянного состава.

Воздействие мутагенными факторами в процессе отбора может привести к появлению мутантов с высокой деструктивной активностью.

Чтобы избежать вымывания активных деструкторов, имеющих невысокую скорость роста, при значительных скоростях протока в условиях непрерывного культивирования, проводят их закрепление (иммобилизацию) на носителях. Иммуобилизация, кроме того, способствует защите клеток от субстратного ингибирования, вызываемого высокими концентрациями загрязнений.

Основную группу микроорганизмов, разрушающих ксенобиотики, составляют бактерии рода *Pseudomonas*. Разные штаммы бактерий

этого рода способны расщеплять более 100 органических соединений, среди которых галогенпроизводные углеводов, ароматические углеводороды, в том числе полиароматические, их галогенпроизводные и др. Часто один штамм использует в качестве источников углерода несколько родственных соединений. Кроме представителей рода *Pseudomonas*, активные деструкторы обнаружены среди бактерий родов *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Alcaligenes*, *Mycobacterium* и др.

Современными методами получения активных деструкторов ксенобиотиков являются методы генетической рекомбинации и геной инженерии. К настоящему времени установлено, что гены, которые кодируют синтез ферментов, катализирующих деградацию пестицидов, могут быть локализованы в хромосомах, входят в состав крупных плазмид, а могут обнаруживаться и в хромосомной, и в плазмидной ДНК. В табл. 26 представлены описанные к настоящему времени природные плазмиды, встречающиеся у различных представителей почвенной микробиоты, и соединения, разрушение которых катализируют кодируемые этими плазмидами ферменты.

Таблица 26

**Природные катаболические плазмиды**

Плазида	Деградируемое соединение	Микроорганизм-хозяин
SAL	Салицилат	<i>Pseudomonas sp.</i>
TOL	Толуол, ксилол	<i>Pseudomonas putida</i>
pJP1	2,4-Дихлорфенокси-уксусная кислота	<i>Alcaligenes paradoxus</i>
CAM	Камфора	<i>Pseudomonas putida</i>
XYL	Ксилол	<i>Pseudomonas arvilla</i>
pAC25	3-Хлорбензоат, <i>n</i> -крезол	<i>Pseudomonas putida</i>
pWW17	Фенилацетат	<i>Pseudomonas sp.</i>
pUU204	Галогеналкилы	<i>Pseudomonas sp.</i>

Методами генетического конструирования в один штамм могут быть собраны плазмиды, кодирующие ферменты разных катаболических путей. Таким образом, из природных штаммов *Pseudomonas putida*, несущих катаболические плазмиды, каждая из которых кодирует фермент для расщепления одного класса соединений, был получен

«суперштамм», способный осуществлять деградацию октана, гексана, декана, ксилола, толуола, камфоры, нафталина. Такая мультиплазмидная бактерия растёт, утилизируя неочищенную нефть.

Расширить катаболические возможности микроорганизмов можно также путем модификации генов, кодирующих ферменты того или иного метаболического пути. Например, было установлено, что некоторые штаммы *Pseudomonas putida*, разлагающие ароматические соединения, такие как толуол, разрушают и трихлорэтилен. При этом для полной деградации трихлорэтилена не нужны все ферменты, участвующие в расщеплении толуола, достаточно лишь толуолдиоксигеназы, катализирующей одну стадию в окислении толуола. Синтез этого фермента кодируется четырьмя генами, которые выделили из *Pseudomonas putida* и экспрессировали в *Escherichia coli*. Скорость деградации трихлорэтилена у *Escherichia coli* ниже, чем у *Pseudomonas putida*, но она сохраняется дольше, что связывают с меньшей чувствительностью *Escherichia coli* к повреждающему действию трихлорэтилена.

Одна из проблем практического применения модифицированных бактерий заключается в том, что они являются мезофилами, а в природных условиях температура обычно находится в интервале от 0 до 20°C. Чтобы проверить возможность создания модифицированных психрофильных микроорганизмов, плазмиду TOL, детерминирующую разложение толуола, мезофильного штамма *Pseudomonas putida* с помощью конъюгации перенесли в психрофильный штамм, утилизирующий салицилат. Трансформированный штамм содержал введенную в него плазмиду TOL и собственную плазмиду SAL и был способен утилизировать как салицилат, так и толуол в качестве единственного источника углерода при 0°C. Этим экспериментом была показана возможность создания психрофильных деструкторов ксенобиотиков.

Однако о практическом применении генетически сконструированных штаммов пока говорить рано. Одна из основных проблем при конструировании микроорганизмов – сохранение стабильности новой катаболической функции, а следовательно, и самого штамма. Особенно это касается природной среды, где созданному микроорганизму приходится конкурировать с хорошо адаптированной к данным условиям естественной микробиотой, сталкиваться с разнообразием источников углерода, в том числе высокотоксичных.

## **11.2. Ликвидация нефтяных загрязнений воды и почвы**

Нефть является одним из наиболее опасных веществ, загрязняющих биосферу (поллютантом). Она представляет собой сложный комплекс веществ, состоящий почти из 3000 ингредиентов, часть из которых оказывают токсичное воздействие на живые организмы. В результате нарушается экологическое равновесие, изменяются сложившиеся биоценозы.

Другим важным фактором является способность нефти, особенно ее легких фракций, с большой скоростью растекаться по поверхности воды, образуя тонкую пленку большой площади и нарушая аэрацию водоема. Вследствие этого разливы нефти на воде считаются более опасными, чем на почве, где она до определенной степени удерживается частицами почвы.

Вместе с тем постоянно происходит загрязнение почвы и водоемов нефтепродуктами.

Загрязняются почвы вблизи автомагистралей, автозаправочных станций и нефтехранилищ, в районах нефтепроводов, в окрестностях нефтедобывающих и перерабатывающих предприятий. Отрицательное влияние на почву проявляется при концентрации нефти 200 и более мг/кг. В странах Западной Европы при содержании нефтепродуктов свыше 2000 мг/кг почва считается загрязненной и требует очистки.

В водные источники нефть попадает при добыче, в результате разливов при транспортировании, с загрязненными береговыми стоками, по причине самопроизвольного выхода из природных источников.

В окружающей среде присутствуют микроорганизмы, окисляющие углеводороды нефти, и постепенно происходит деструкция нефтяных загрязнений. Однако процесс этот длительный, в особенности самоочищение почвы, которое осуществляется на протяжении 5–6 и более лет.

В настоящее время имеется довольно большой арсенал методов ликвидации нефтяных загрязнений почвы и поверхностных загрязнений воды (табл. 27).

Наиболее эффективного удаления нефтяных загрязнений чаще всего достигают при применении различных сорбентов. Численность используемых сорбентов достигает двух сотен. Они различаются дисперсностью, пористостью, смачиваемостью и другими свойствами. В качестве сорбентов применяют неорганические (песок, глина, силикагель,

перлит и др.) и органические материалы (торф, уголь, опилки, солома, мох, макулатура), в том числе и синтетические (полиуретан, фенолформальдегидные пенопласты). Целесообразно использовать сорбенты из местных видов сырья, поскольку они, как правило, имеют низкую объемную массу и их транспортирование невыгодно.

Таблица 27

**Основные методы ликвидации нефтяных загрязнений почвы и воды**

Метод ликвидации	Особенности применения
<b>Загрязнение почвы</b>	
Сжигание	Экстренная мера при угрозе прорыва нефти в водные источники. Уничтожается от половины до $\frac{2}{3}$ разлива, остальная часть просачивается в почву. В атмосферу попадают продукты возгонки и неполного окисления нефти
Промывка почвы	Проводится в промывных барабанах с применением ПАВ, промывные воды отстаиваются и очищаются. Промывка может осуществляться на месте с помощью дренажных систем
Экстракция растворителями	Проводится в промывных барабанах с последующей отгонкой растворителей с паром
Сорбция	Разливы на сравнительно твердой поверхности засыпают сорбентами для поглощения нефти и снижения пожароопасности
Биоремедиация	Применяются бактериальные нефтеразлагающие препараты, которые запаховаются в почву
<b>Загрязнение воды</b>	
Локализация пятна	С помощью плавучих боновых заграждений или ограничением пятна струями воды
Сбор с помощью переливных и всасывающих устройств	Используются плавающие емкости, один из бортиков которых опущен ниже поверхности на предполагаемую толщину слоя нефти. Недостатки – невысокая скорость и значительный «прихват» воды
Сбор с помощью адгезионных устройств	Действие основано на принципе избирательной адгезии нефти гидрофобными покрытиями (алюминий, некоторые пластики и др.)
Сорбция	Метод наиболее эффективен для удаления тонких пленок, недостаток – потери при сборе
Применение бактериальных препаратов	Используются препараты в виде суспензии либо на носителях-сорбентах

Вместе с тем даже после очистки водоема или почвы с помощью сорбентов остается проблема их регенерации или утилизации сорбата. Производят отжим нефтепродуктов, их термическую отгонку, отмывку растворителями либо сжигание сорбата.

В этой связи преимущество имеет биоремедиация, когда осуществляется деструкция нефтяных загрязнений в результате деятельности биоты. Цель биоремедиации – создание на очищаемом участке водоема или почвы высокой концентрации организмов, активно окисляющих компоненты нефти. Возможно два *варианта* достижения этой цели:

- стимуляция жизнедеятельности природных микроорганизмов путем внесения биогенных элементов и стимуляторов роста;
- улучшение природного биоценоза путем внесения в виде препарата специально отселекционированных микроорганизмов, активно потребляющих данные загрязнения.

Наиболее близка к природным процессам фиторемедиация – использование фотосинтезирующих организмов (например, водорослей рода *Chlorella*, ряски). Однако процесс этот довольно длительный, более эффективным оказывается применение препаратов на основе бактерий – активных деструкторов компонентов нефти.

Микроорганизмы, окисляющие углеводороды, широко распространены в экосистемах, в больших количествах они встречаются в местах, загрязненных нефтепродуктами. Активными деструкторами компонентов нефти являются представители родов *Rhodococcus*, *Mycobacterium*, *Acinetobacter*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Nocardia*.

Изготовление препаратов для разложения нефтяных загрязнений включает следующие *стадии*:

1) получение чистых культур микроорганизмов-деструкторов. Такие микроорганизмы, как правило, выделяют из окружающей среды, осуществляя селекцию с целью получения наиболее активных штаммов. Кроме способности окислять углеводороды нефти, к этим микроорганизмам предъявляется еще ряд требований: они должны быть не патогенны, не токсичны, устойчивы к высоким концентрациям нефти и конкурентоспособны в борьбе с естественной микробиотой;

2) наращивание биомассы углеводородоокисляющих микроорганизмов;

3) концентрирование и сушка с целью получения стабильного при хранении препарата.

Как правило, наиболее активными оказываются ассоциации микроорганизмов, поэтому культуры смешивают с учетом их возможного

взаимодействия. Кроме того, во многие препараты добавляют биогенные элементы и вещества, стимулирующие развитие углеводородокисляющих микроорганизмов.

К настоящему времени разработано довольно большое число препаратов на основе разных микроорганизмов: «Родойл» (*Rhodococcus erythropolis*, *Gordonia rubripertincta*, *Acinetobacter calcoaceticus*), «Родер» (*Rhodococcus rubber*, *Rhodococcus erythropolis*), «Деворойл» (*Pseudomonas*, *Candida*, *Rhodococcus*), «Путидойл», «Биодеструктор» (Россия); «Биосистем Эрде» (Германия); «Phenobac», «Petrobac» (Ирландия); «Родобел-Т» (Республика Беларусь) и многие другие.

Для интенсификации процесса деструкции компонентов нефти постоянно проводится усовершенствование этих препаратов в различных *направлениях*:

- введение поверхностно-активных веществ либо штаммов микроорганизмов, синтезирующих эти вещества;

- получение препаратов в виде иммобилизованных на носителе штаммов-деструкторов. При этом в качестве носителей применяют сорбенты нефтепродуктов. Особенно большое внимание уделяют торфу, поскольку он сам по себе является хорошим сорбентом нефти с развитой поверхностью, кроме того, содержит гуминовые вещества, которые способствуют более эффективной деструкции компонентов нефти, в особенности тяжелых ее фракций;

- использование бактериально-грибных ассоциаций. В частности, сообщается, что при деструкции нефти в низких концентрациях в таких ассоциациях более активны бактерии, а с увеличением концентрации нефти возрастает роль грибов;

- обогащение почвы кислородом путем введения в состав препаратов неорганических пероксидов, в частности пероксида кальция.

### **11.3. Контроль загрязнения окружающей среды с использованием биологических объектов**

Эффективная защита окружающей среды от опасных химических соединений невозможна без достоверной информации о степени загрязнения.

В настоящее время основой мониторинга токсичных веществ в окружающей среде являются их предельно допустимые концентрации (ПДК) в воде, воздухе, почве. Однако не всегда можно установить

прямую зависимость между содержанием загрязняющих веществ в среде и ее пригодностью для обитания живых организмов. Токсичное действие одних компонентов может быть нейтрализовано или усилено присутствием других. Необходимо оценивать интегральную токсичность, отражающую влияние всего комплекса загрязняющих веществ.

Наиболее целесообразными методами определения интегральной токсичности являются биоиндикация (биотестирование).

Под биоиндикацией понимают обнаружение и определение биологически и экологически значимых антропогенных нагрузок по реакциям на них живых организмов и их сообществ. Объектами биоиндикационных исследований могут быть растения, животные, в том числе представители почвенной фауны, на долю которых приходится 95% всех видов, входящих в наземный зооценоз, микроорганизмы.

Некоторые экосистемы, например хвойные леса, лишайниково-моховые сообщества, чувствительны к широкому спектру антропогенных нагрузок. Их называют критическими экосистемами. Анализ таких систем позволяет выявить экологические нарушения еще при таких уровнях загрязнения, которые не представляют опасности для большинства организмов, в том числе человека.

Выше отмечалось (см. гл. 2), что в практику давно уже вошло применение индикаторных организмов для оценки степени очистки сточных вод. Так, по видовому разнообразию простейших, их размерам, поведению судят об условиях работы аэротенков (интенсивности аэрации, присутствии токсичных веществ, нагрузке по загрязнениям и т. д.). Появление нитрификаторов в аэротенке является показателем достаточно полного окисления органических соединений, а наличие капель серы на поверхности и внутри клеток серных бактерий свидетельствует о довольно высоком содержании восстановленных соединений серы (сероводород, меркаптаны).

О биотестировании говорят, когда речь идет об использовании стандартных тест-организмов, для которых анализируется изменение выбранной тест-функции под действием токсикантов. Такие исследования могут проводиться в лаборатории либо непосредственно в природных условиях (в воде, почве).

Чаще всего в качестве тест-организмов применяются микроорганизмы, поскольку они имеют следующие *достоинства*:

– обладают большой удельной поверхностью контакта с окружающей средой, что определяет их высокую чувствительность;

– высокие скорости роста и размножения микроорганизмов позволяют за сравнительно короткий срок проследить за воздействием неблагоприятного фактора на протяжении многих поколений, т. е. проводить хронические биотесты;

– поддержание жизнедеятельности микроорганизмов не требует больших материальных затрат.

К *недостаткам* микробиологических тестов следует отнести довольно высокую способность микроорганизмов к образованию устойчивых мутантных штаммов, что может приводить в некоторых случаях к получению недостоверных результатов.

К тест-организмам предъявляется ряд *требований*:

1) должны иметь высокую чувствительность к токсичным веществам;

2) это должны быть чистые культуры микроорганизмов, не засоренные другими организмами;

3) должны содержаться в строго определенных условиях (состав среды, pH, газовый режим и др.).

Тест-функции, по изменению которых судят о воздействии токсиантов, могут быть самыми разнообразными: активность ферментов, потребление кислорода, количество выделяющегося биологического тепла, изменение электрических параметров клетки, морфологические изменения и др.

## **Глава 12. ПРИМЕНЕНИЕ БИОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ОТ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ**

### **12.1. Характеристика и методы очистки газовоздушных выбросов**

В настоящее время большое количество производственных процессов сопровождается выбросом в атмосферу твердых частиц и отходящих газов. Химический состав и концентрация загрязнений определяются особенностями производства.

В воздухе крупных промышленных городов можно идентифицировать до 150 соединений, среди которых углеводороды, в том числе ароматические, галогенсодержащие; кислоты; альдегиды; кетоны; оксиды серы, азота, углерода; восстановленные соединения серы; аммиак; галогены и др. Основной вклад в загрязнение воздушного бассейна вносят предприятия химической, целлюлозно-бумажной, лакокрасочной, нефтеперерабатывающей промышленности, животноводческие комплексы, отстойники сточных вод, установки по обезвреживанию отходов.

Под влиянием газопылевых выбросов загрязняется атмосферный воздух, повышается кислотность почв, увеличивается загрязненность почвенно-грунтовых вод и вод водоемов, наблюдается нарушение биоценозов. Проблема усугубляется тем, что загрязнения могут быть токсичными, аллергенными, порой имеют дурной запах, как например восстановленные соединения серы (меркаптаны, сероводород, тиосульфаты). Вследствие этого они доставляют неприятности уже в малых концентрациях (табл. 28). Основными источниками восстановленных соединений серы являются фотопромышленность, нефтеперегонные установки, целлюлозно-бумажная промышленность, установки по очистке природного газа, отходы животноводства.

Выбросы вредных веществ в атмосферу только по Республике Беларусь составляют около 1200 т в год.

Разумеется, наиболее радикальным методом является экологизация технологических процессов, применение чистых технологий. Однако нынешний уровень развития производства не достаточен для полного предотвращения загрязнения атмосферы.

Значения пороговой концентрации соединений, имеющих дурной запах

Соединение	Концентрация $c \cdot 10^{10}$ , %
Этантиол	0,19
Метантиол	1,10
Масляная кислота	1,00
Валерьяновая кислота	0,60
Диаллилсульфид	0,14

Как правило, на предприятиях для отвода газов используются высокие трубы (200–350 м). Их применение позволяет распределять загрязняющие вещества на большие площади, снижая их концентрацию в атмосфере. Рассеяние вредных веществ в атмосфере не является эффективным средством ее защиты, необходима очистка атмосферных выбросов от токсичных компонентов. Обычно затраты на очистные сооружения достигают 15–20% от капиталовложений на технологическую установку. При этом наблюдается закономерность: чем ниже содержание примеси в смеси, тем сложнее ее выделение.

Для выделения твердых частиц из газовой фазы используется пылеуловительное оборудование, классификация которого основана на особенностях механизма отделения твердых частиц от газовой фазы. В соответствии с этими особенностями различают следующие виды оборудования: аппараты «сухой» очистки (циклоны, пылеосадительные камеры, жалюзийные пылеуловители, ротационные пылеуловители); аппараты «мокрой» очистки (полые и насадочные скрубберы, скруббер Вентури, барботажные и пенные аппараты, ударно-инерционные аппараты); аппараты фильтрационной очистки (фильтры волокнистые, тканевые, зернистые); аппараты электрофильтрационной очистки.

Для улавливания примесей, находящихся в газовом и паровом состоянии, могут быть использованы физические и химические методы: адсорбция на активированном угле, абсорбция жидкостями, прокаливание, каталитическое дожигание, озонирование, хлорирование.

Оборудование, которое применяют для реализации этих методов, делят на три группы:

- аппараты абсорбционной очистки (насадочные абсорберы, скрубберы Вентури, другие скрубберы);
- аппараты абсорбционной очистки периодического и непрерывного действия;

– аппараты термической нейтрализации (аппараты прямого сжигания, аппараты термического окисления, аппараты каталитического действия).

Однако эти способы требуют больших капитальных вложений и энергозатрат. Следует также отметить неэкономичность использования таких способов для небольших объемов газа с низкой концентрацией загрязнений. Большие же концентрации приводят к быстрой «усталости» катализаторов или требуют значительных реакционных объемов. Например, адсорбционный способ не позволяет проводить полную дедорацию отработанного воздуха из-за некоторой селективности адсорбирующего вещества. Кроме того, образующаяся при данных процессах промышленная зола, газообразные продукты горения и другие отходы вторично загрязняют окружающую среду.

## **12.2. Биологическая очистка газовоздушных выбросов**

**Достоинства и недостатки.** Биологические методы очистки газовоздушных выбросов лишены многих недостатков, характерных для химических и физических методов. В основе биологических методов лежит способность микроорганизмов ассимилировать вещества, загрязняющие воздух. Среди веществ органического происхождения, содержащихся в выбросах и поддающихся биохимическому окислению, можно выделить ароматические и непредельные углеводороды, а также азот-, кислород-, серо- и галогенсодержащие соединения. Биологические методы могут быть использованы также для очистки воздуха от неорганических веществ.

Основные *преимущества* биологических методов:

1) с помощью микроорганизмов может быть удален широкий спектр загрязнений, в том числе токсичные и дурнопахнущие вещества, даже если они содержатся в низких концентрациях;

2) важнейшим преимуществом биологических методов очистки воздуха перед химическими является возможность проведения процесса при обычной температуре (10–40°C) и атмосферном давлении;

3) конечными продуктами микробиологической деструкции являются, как правило, простые соединения, часто органические вещества разлагаются до диоксида углерода и воды;

4) отсутствует необходимость регенерации рабочего тела установки, что является характерной чертой физических методов очистки.

Вместе с тем существует ряд *ограничений* для применения биологической очистки газовоздушных выбросов:

– микроорганизмы потребляют вещества в растворенном состоянии, поэтому использование методов биологической очистки воздуха наиболее эффективно для удаления водорастворимых загрязнений;

– биологические методы наиболее приемлемы для очистки газовоздушных выбросов постоянного состава. Микроорганизмы обладают довольно широкими адаптационными возможностями, и при изменении состава выбросов происходит перестройка метаболизма и синтез ферментов, необходимых для разрушения новых компонентов. Однако процесс этот довольно длительный, и при частом изменении состава компонентов газовоздушных выбросов будет снижаться деструктивная активность биологической системы;

– высокая эффективность газоочистки достигается при условии, что скорость биохимического окисления улавливаемых веществ больше скорости их поступления из газовой фазы.

**Факторы, влияющие на очистку выбросов.** Протекание процесса биохимического окисления зависит от ряда факторов, одни из которых поддаются изменению и регулированию в широких пределах, а другие должны поддерживаться в достаточно узком диапазоне. К основным факторам, определяющим пропускную способность и работоспособность газоочистного устройства на основе биологической очистки, относятся: температура, реакция среды, содержание биогенных элементов, уровень питания, т. е. величина суточной нагрузки по загрязнению в расчете на 1 м<sup>3</sup> реакционной среды системы.

Для обеспечения наибольшей эффективности процесса очистки от большинства загрязняющих веществ, содержащихся в промышленных выбросах, необходимо поддерживать температуру в пределах 20–30°C. Этот диапазон температур является оптимальным для жизнедеятельности подавляющего большинства микроорганизмов. Эксплуатация биологических газоочистных установок при повышенных температурах (>35°C) приводит к перегреву и гибели основной микробиоты и развитию термофильных бактерий, которые характеризуются менее разнообразным и лабильным метаболизмом. Снижение температуры ниже 9°C вызывает угнетение жизнедеятельности полезных микроорганизмов, адаптированных к составу очищаемого газа, и постепенно полное

вытеснение их микроорганизмами, не обладающими способностью эффективно деструктировать загрязнения газовой фазы выбросов. В зависимости от температуры поступающих на биологическую очистку выбросов может быть предусмотрено их охлаждение либо подогрев и теплоизоляция сооружения.

Оптимальное значение pH среды, в которой протекает биологическая деструкция соединений, находится в пределах 6,5–8,5. Отклонения в ту или другую сторону приводят к изменению состава микробиоты, уменьшению количества и полному исчезновению наиболее активных микроорганизмов-деструкторов. Кроме того, изменение реакции среды влияет на растворимость компонентов газовой фазы выбросов в воде и, следовательно, на полноту их удаления из газовой фазы. Исследования показывают, что величину pH можно корректировать, например, добавлением определенного количества концентрированного раствора диаммонийфосфата, который содержит в основном весь набор микроэлементов, необходимых для нормальной жизнедеятельности микроорганизмов.

Необходимые для микроорганизмов биогенные элементы должны либо содержаться в материале насадки, как это имеет место при применении биофильтров, либо должны добавляться в орошающую воду.

Нагрузка по загрязнениям на единицу объема зависит от вида загрязнений, скорости их биохимического окисления, конструкции газоочистного оборудования, концентрации биомассы микроорганизмов. Превышение нагрузки по загрязнениям снижает эффективность очистки, низкая нагрузка приводит к непроизводительному использованию оборудования.

**Микробиологические аспекты очистки.** На практике для формирования в рабочем объеме установки популяции микроорганизмов, разрушающих нежелательные компоненты отходящего воздуха, используют три *варианта*:

1. Спонтанное формирование популяции микроорганизмов-деструкторов при создании благоприятных для микроорганизмов условий. Этот способ пригоден в том случае, если газовой фазы выбросы содержат легкоокисляемые загрязнения.

2. Использование активного ила из вторичных отстойников сточных вод данного производства. Позволяет сократить срок ввода установки в эксплуатацию.

3. Применение чистых культур специально адаптированных, отсеleccionированных микроорганизмов. К этому варианту прибегают,

если газоздушные выбросы содержат специфические, трудноокисляемые соединения. Могут использоваться монокультуры и смешанные культуры микроорганизмов. Последние имеют больший катаболический потенциал, более высокую деструктивную способность. Деструкция сложных смесей, включающих большое количество соединений, возможна только при применении смешанных культур.

Данные о возможности биодegradации того или иного органического соединения, приведенные в различных источниках, иногда противоречат друг другу, не всегда являются исчерпывающими. Это связано с большими адаптационными возможностями микроорганизмов. Описаны случаи успешной адаптации микроорганизмов к росту на таких соединениях, которые раньше считали устойчивыми к биодеструкции.

К настоящему времени разработаны теория и методы селекции микроорганизмов, утилизирующих токсичные субстраты. Проводятся исследования, направленные на создание методами генетической инженерии высокоактивных микроорганизмов-деструкторов с более широким спектром действия.

### **12.3. Аппаратурное оформление процесса биологической очистки газоздушных выбросов**

Существует три основных типа установок для биологической очистки газоздушных выбросов: биофильтры, биоскрубберы и биореакторы с омываемым слоем. Их отличительные признаки суммированы в табл. 29.

**Очистка газоздушных выбросов в биофильтрах.** В биофильтрах (рис. 32) очищаемый газ пропускается через слой насадки, который орошается водой для поддержания необходимой влажности, достаточной для обеспечения жизнедеятельности микроорганизмов. Загрязнения сорбируются материалом фильтрующего слоя и разлагаются микроорганизмами.

В качестве фильтрующего слоя используются материалы природного происхождения (торф, солома, почва, кора и опилки древесины, компост и др.). К таким материалам предъявляется ряд *требований*:

- они должны на протяжении длительного времени являться источниками минеральных веществ для микроорганизмов;
- должны иметь высокую влагоемкость;

- обладать хорошими сорбционными свойствами;
- обеспечивать равномерность укладки и хорошую проницаемость для воздуха.

Таблица 29

**Классификация установок биологической очистки газозвудушных выбросов**

Тип установки	Рабочее тело установки	Водный режим	Основные стадии удаления загрязнений из газозвудушных выбросов	Источник минеральных солей
Биофильтр	Клетки микроорганизмов, иммобилизованные на природных носителях	Отсутствует циркуляция воды	1. Адсорбция материалом фильтрующего слоя. 2. Деструкция иммобилизованными клетками микроорганизмов	Материал фильтрующего слоя
Абсорбционно-биохимическая	Биоскруббер (вода) + активный ил (аэротенк, биореактор)	Осуществляется циркуляция воды	1. Абсорбция водой в скруббере. 2. Деструкция в аэротенке (биореакторе) микроорганизмами	Минеральные соли добавляются в воду
Биореактор с омываемым слоем	Клетки микроорганизмов, иммобилизованные на искусственных и синтетических материалах	Осуществляется циркуляция воды	1. Диффузия через водную пленку, покрывающую слой микроорганизмов. 2. Деструкция иммобилизованными клетками микроорганизмов	Минеральные соли добавляются в воду

На практике подобрать фильтрующий материал, удовлетворяющий всем этим требованиям, обычно не удается, и поэтому фильтрующий слой формируют смешением двух или нескольких материалов. Толщина фильтрующего слоя принимается обычно равной 0,5–1,0 м, скорость фильтрации воздуха не более 0,1 м/с.

Равномерный подвод очищаемых газов осуществляют с помощью перфорированных труб или плит, помещенных в слой гравия или щебня, над которым и располагается собственно фильтрующий материал. Размер гравия или щебня выбирают таким, чтобы гидравлическое сопротивление

слоя было минимальным и не происходило забивание отверстий перфорированных труб. При работе биофильтров такой конструкции требуется поддержание фильтрующего материала при определенной влажности, которая зависит от природы материала фильтрующего слоя и составляет обычно 40–60%. При недостаточной влажности материал пересыхает, что затрудняет прохождение воздуха и приводит к снижению физиологической активности микроорганизмов. В случае переувлажнения возрастает аэродинамическое сопротивление, формируются зоны анаэробноза. Требуемую влажность поддерживают обычно путем впрыскивания жидкости в очищаемый воздух или с помощью оросительных устройств, размещенных над поверхностью фильтрующего слоя.

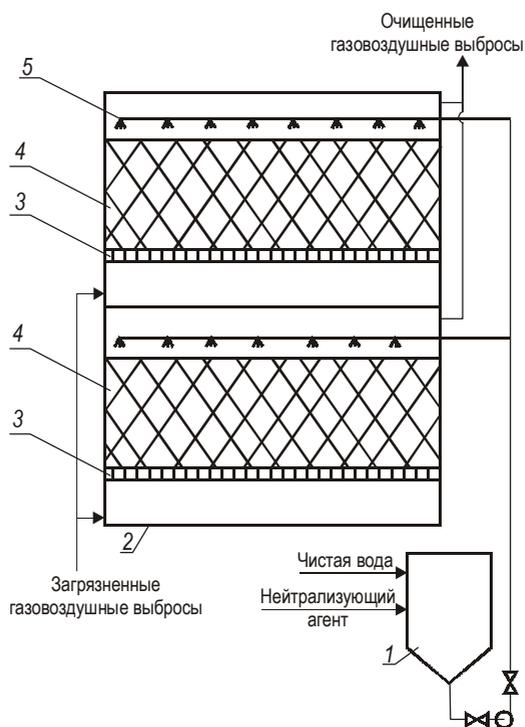


Рис. 32. Схема очистки газовойоздушных выбросов в биофилтре:  
 1 – сборник воды для орошения; 2 – корпус; 3 – решетка; 4 – фильтрующий слой;  
 5 – система распределения воды

Одной из проблем, возникающих при эксплуатации биофильтров, является увеличение гидравлического сопротивления слоя и нарушение равномерного фильтрования воздуха из-за постоянного разрушения фильтрующего слоя и разрастания био пленки. В этом случае производится рыхление фильтрующего материала механическим путем или его замена. Наиболее склонны к уплотнению в фильтрующем слое почвы, поэтому этот материал для биофильтров в настоящее время практически не используется.

Наибольшее распространение получили фильтры со сфагновым торфом или со смесью этого торфа с хворостом. Такие фильтры имеют рыхлую структуру, обладают небольшим гидравлическим сопротивлением и мало изменяются при эксплуатации. Они широко используются в ФРГ при дезодорации воздуха на очистных сооружениях и в установках по переработке бытового мусора, а также в Нидерландах, Швейцарии, США. В качестве фильтрующего материала для биофильтров широко применяется также компост, изготавливаемый из травы, листвы и торфа.

Достоинствами биофильтров являются простота конструкции и небольшие энергозатраты, недостатками – низкая концентрация биомассы и, следовательно, невысокая производительность (до  $350\text{--}400 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ ). Из-за ограничения толщины фильтрующего слоя биофильтры занимают большие площади. Одним из направлений уменьшения поперечных размеров фильтров является применение многоярусных конструкций, что уже и реализовано на ряде действующих биофильтров.

С помощью биофильтров достигается эффективность очистки и дезодорации газовых выбросов более 85%.

**Очистка газоздушных выбросов в абсорбционно-биохимических установках.** В состав таких установок входят биоскрубберы, т. е. абсорбционные аппараты (абсорберы, скрубберы), в которых орошающей жидкостью (абсорбентом) служит водная суспензия микроорганизмов. Находящиеся в газоздушных выбросах загрязняющие вещества абсорбируются водой, а затем расщепляются микроорганизмами. Учитывая, что биохимические реакции протекают с относительно невысокой скоростью, в составе газоочистной установки предусматривается промежуточная емкость для очистки воды. Она выполняется в виде отдельного реактора либо komponуется в нижней части скруббера. Микроорганизмы находятся либо во взвешенном состоянии (по типу аэротенка), либо закреплены на насадке. Во избежание забивания насадки после реактора для очистки воды следует предусматривать отстойник. Схема абсорбционно-биохимической установки для очистки газоздушных выбросов представлена на рис. 33.

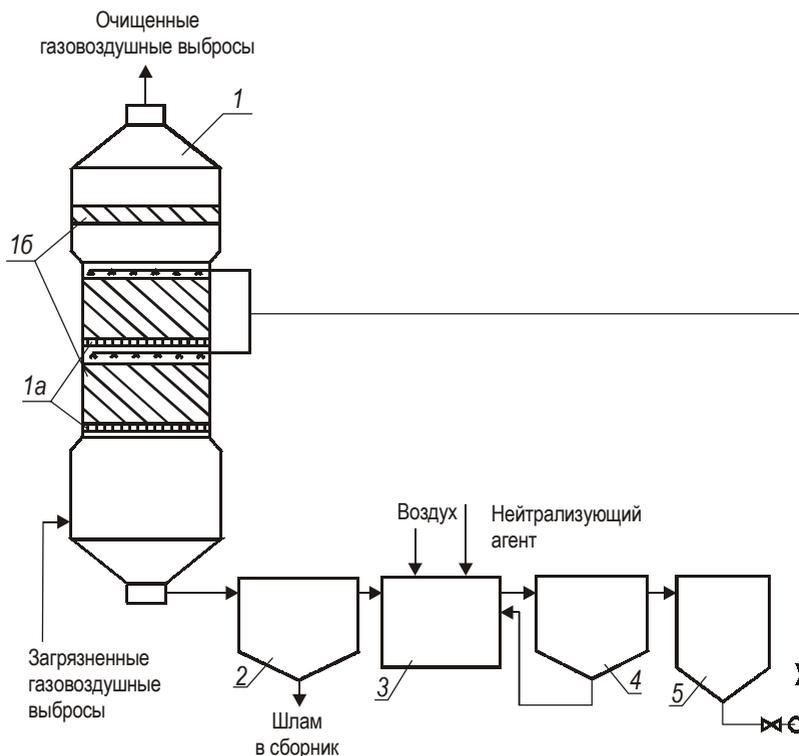


Рис. 33. Абсорбционно-биохимическая установка для очистки газовоздушных выбросов:

1 – абсорбер: 1а – решетка, 1б – слой насадки; 2 – шламоотстойник; 3 – аэротенк; 4 – вторичный отстойник; 5 – сборник очищенного абсорбента

Применяют различные типы абсорберов (барботажные, распылительные, насадочные). Основная цель – увеличение площади поверхности раздела газовой и жидкой фазы, а значит, повышение эффективности абсорбции.

Для обеспечения оптимальных условий жизнедеятельности микроорганизмов в емкость для очистки воды вводится биогенная подпитка, корректируется значение рН.

По сравнению с биофильтрами абсорбционно-биохимические установки более производительны (до  $900 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ ), степень очистки

достигает 95–99%. Вместе с тем такие установки требуют больших эксплуатационных затрат и эффективны для удаления хорошо растворимых загрязнений.

Абсорбционно-биохимические установки для очистки газовоздушных выбросов находятся в постоянной эксплуатации на ряде предприятий Республики Беларусь: ПО МТЗ, РУП МАЗ (бутанол, ксилол, толуол, этилбензол, *n*-алканы из окрасочной камеры), ОАО «Мостовдрев» (формальдегид, метанол из цеха ДСП) и др. Эффективность очистки воздуха от триэтиламина, фенола, формальдегида, фурилового спирта, фурфурола составляет 96–99%; изоцианатов, метанола, цианидов, уайт-спирита, ксилола, толуола, бутилацетата, акролеина, аммиака – 70–96%; смолистых включений окрасочной аэрозоли и взвешенных веществ – до 99%.

**Очистка газовоздушных выбросов в биореакторах с оmyваемым слоем.** Биореактор с насадкой представляет собой промежуточное решение между биоабсорбером и биофильтром. Рабочим элементом в биореакторе являются клетки микроорганизмов, иммобилизованные на искусственных (чаще полимерных) носителях. Насадка может иметь различную форму (кольца, трубки, шарики, волокна, ерши и т. д.). Микроорганизмы расположены на поверхности насадки в виде биопленки.

Принцип действия биореактора с оmyваемым слоем заключается в том, что при прохождении загрязненного воздуха через слой насадки вещества, подлежащие деструкции, распределяются между газовой фазой и водной пленкой, покрывающей элементы насадки, за счет диффузии доставляются к биопленке и разрушаются в ней. Скорость процесса газоочистки в биореакторе с оmyваемым слоем может лимитироваться либо скоростью диффузии загрязнений из газовой фазы через водную пленку к поверхности биопленки, либо скоростью их деструкции микроорганизмами. Скорость диффузии зависит от природы индивидуальных веществ и разности концентраций на внешней и внутренней границах водной пленки, скорость деструкции определяется активностью ферментов микроорганизмов. Если происходит полное разрушение протифундировавшего через водную пленку вещества, значит процесс протекает в диффузионном режиме. Подтверждением этого является отсутствие влияния природы носителя и концентрации биомассы на эффективность функционирования биореактора.

Продолжительность вывода на рабочий режим биореактора с омываемым слоем обычно составляет 5–10 дней, при использовании адаптированных микроорганизмов этот срок может быть сокращен в некоторых случаях до нескольких часов.

В процессе эксплуатации биореактора вследствие разрастания биопленки может увеличиваться аэродинамическое сопротивление, при этом прилегающие к насадке слои микроорганизмов теряют возможность участвовать в процессе газоочистки. Более того, внутри толстой пленки могут развиваться анаэробные процессы, приводящие к загниванию биомассы. Такие же процессы могут развиваться и в отдельных местах насадки из-за недостаточной их аэрации. Периодически, обычно один раз в несколько месяцев, насадку промывают от избытка биомассы. Сам же материал насадки выдерживает длительную эксплуатацию без замены (1,2 года и более).

В процессе газоочистки слой насадки орошается водой, содержащей минеральные соли и микроэлементы, необходимые для питания микроорганизмов, в орошающей воде корректируется значение pH. Вода циркулирует в системе, из сборника на орошение подается насосом, по мере загрязнения направляется на очистку и заменяется свежей.

Биореакторы с омываемым слоем являются наиболее перспективными аппаратами для биологической очистки газовых выбросов. Они характеризуются значительно более высокой удельной производительностью, чем остальные типы установок, что обусловлено высокой концентрацией биомассы в рабочем объеме реактора вследствие создания благоприятных условий для иммобилизации микроорганизмов на развитой поверхности применяемых носителей. При удельной производительности, которая оценивается несколькими тысячами м<sup>3</sup> очищаемых выбросов в час, они обеспечивают эффективность очистки на уровне 90–98%, более компактны, чем биофильтры и абсорбционно-биохимические установки, по сравнению с биоскрубберами требуют меньше воды для орошения.

Следует отметить, что на биологическую очистку следует подавать газозадушные выбросы после отделения твердых частиц (как правило, в циклоне) во избежание забивания насадки. После установок биологической очистки необходимо предусматривать удаление влаги из очищенного воздуха перед выбросом его в атмосферу. Роль каплеотделителя, например, может выполнять слой насадки без микроорганизмов в биореакторе или биоскруббере.

## Глава 13. ПРОИЗВОДСТВО И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГАЗА

### 13.1. Технологические аспекты производства биогаза

В современных условиях для человечества очень важны две проблемы: дефицит энергоносителей и охрана окружающей среды. Именно эти проблемы обусловили формирование нового научно-технического направления – биоэнергетики, суть которого состоит в получении и использовании энергии топлива из возобновляемого органического сырья: растительной биомассы, сельскохозяйственных, бытовых и промышленных отходов. Запасы растительной биомассы на Земле оцениваются в 1836 млрд. т, что по энергосодержанию эквивалентно 640 млрд. т нефти. Природоохранный аспект биоэнергетики очевиден: энергетическая переработка отходов приводит к значительному уменьшению загрязненности окружающей среды.

Способы получения энергии и топлива из растительной биомассы и отходов разнообразны: сжигание, сухая перегонка, гидролиз с последующей биоконверсией продуктов гидролиза, ферментативное анаэробное разложение.

Наибольший интерес представляют экономичные анаэробные технологии: метановое сбраживание с получением биогаза; биоконверсия в этанол; анаэробная ферментация с образованием ацетона, бутанола и водорода. Одним из наиболее эффективных методов переработки органических отходов является метановое сбраживание, в результате которого органические вещества отходов превращаются в биогаз. Состав биогаза, а также его выход сильно зависят от природы (химического состава) перерабатываемого отхода и колеблются в достаточно широких пределах, % об.:  $\text{CH}_4$  – 55–80;  $\text{CO}_2$  – 15–50;  $\text{N}_2$  – до 5;  $\text{O}_2$  – до 3;  $\text{H}_2\text{S}$  – до 3. Энергетический потенциал биогаза составляет 20–27 МДж/н. м<sup>3</sup>, плотность при нормальных условиях – 0,98–1,40 кг/м<sup>3</sup>. По теплотворной способности 1 н. м<sup>3</sup> биогаза эквивалентен 0,6 дм<sup>3</sup> керосина, или 1,5 кг угля.

Известно, что развитие биогазовых технологий позволяет решать *проблемы*, которые особенно характерны для сельской местности:

– экологическую – утилизация отходов агропромышленного комплекса, бытовых отходов;

- энергетическую – получение газообразного топлива, электрической и тепловой энергии;
- агрохимическую – производство экологически чистых органических удобрений;
- социальную – улучшение условий труда и быта сельского населения.

Мировое производство биогаза для практического применения составляет более 700 млрд. м<sup>3</sup> в год. Биогазовые технологии широко распространены в Китае, Индии, США, Канаде, Германии, Англии, Швейцарии и в ряде других стран. В Китае и Индии количество находящихся в эксплуатации биогазовых установок исчисляется миллионами. В Российской Федерации имеется небольшое число действующих промышленных биогазовых установок, предназначенных главным образом для переработки осадков коммунальных очистных сооружений крупных городов. Часть построенных метантенков не эксплуатируется либо функционирует без утилизации биогаза, что объясняется, как правило, отсутствием оборудованных контрольно-измерительными приборами систем биогазоснабжения, а также низким качеством метантенков. В Республике Беларусь анаэробные технологии утилизации органических отходов только начинают внедряться в результате закупки единичных биогазовых установок за рубежом.

В качестве сырья для производства биогаза могут быть использованы отходы, содержащие биологически разлагаемое органическое вещество, имеющие высокую влажность (90–94%), нейтральную или близкую к нейтральной величину рН и не содержащие токсичных химических соединений (антибиотиков, СПАВ и др.) в концентрациях, ингибирующих рост и размножение бактерий. Прежде всего это отходы животноводческих комплексов и птицефабрик, осадки коммунальных и производственных сооружений по очистке сточных вод, промышленные органосодержащие отходы. В США и некоторых странах Западной Европы получает распространение анаэробная переработка городского мусора. Твердофазная метангенерация возможна при условии, что влажность отходов не ниже 30–40%.

Одним из основных сырьевых ресурсов для получения биогаза является навоз. Концентрация животных на крупных фермах и комплексах приводит к резкому увеличению объемов навозных отходов, которые представляют серьезный источник загрязнения окружающей среды, в том числе нитратами, патогенными микроорганизмами. Метановое сбраживание является рациональным способом обезвреживания навозных

отходов с одновременным получением экологически чистого органического удобрения и газообразного энергоносителя. Анаэробная обработка навоза обеспечивает его дезодорацию, дегельминтизацию, потерю способности семян сорных растений к всхожести, практически полное сохранение важнейших питательных элементов – азота, фосфора, калия.

В мировой практике получили распространение биогазовые установки двух типов: внутрифермерские, обеспечивающие переработку навоза фермы (комплексов) с использованием полученного биогаза на внутрипроизводственные и бытовые нужды; крупные централизованные установки производственного типа, перерабатывающие навозные отходы близлежащих животноводческих ферм и поставляющие очищенный биогаз внешним потребителям.

По принципу функционирования различают установки непрерывной (проточной), периодической и аккумулятивной (бассейновой) систем сбраживания. *Непрерывная (проточная) система* наиболее пригодна для крупных биогазовых установок, обеспечивает равномерное образование и максимальный выход биогаза. Исходный субстрат поступает в камеру сбраживания (метантенк) непрерывно или порциями, равномерно, до 10 раз в сутки.

Установки *периодической системы* включают две или несколько камер сбраживания, которые загружаются и разгружаются попеременно. При загрузке камеры исходный субстрат смешивается с затравочным остатком сброженного на предыдущей операции навоза. Выделение биогаза неравномерное; начинается по истечении 5–10 сут, достигает максимума и постепенно уменьшается до минимума. Коэффициент использования полезного объема камеры значительно ниже по сравнению с непрерывной системой.

При *аккумулятивной (бассейновой) системе* сбраживания хранилище для навоза выполняет роль камеры сбраживания и одновременно служит для хранения сброженного навоза до его выгрузки. Эта система используется редко, главным образом при переработке жидкого сточного навоза.

Основным оборудованием биогазовой установки является камера сбраживания (метантенк, ферментатор) с нагревательными и перемешивающими устройствами и емкость для хранения биогаза – газгольдер. Метантенки имеют объем от одного десятка до нескольких тысяч кубических метров. Аппараты должны быть герметичными, иметь хорошую теплоизоляцию (практикуется заглубление метантенков в грунт),

высокую коррозионную стойкость. Метантенки малых размеров изготавливаются из листовой стали или пластика (полистирола, полипропилена), большие камеры сооружаются из сборного железобетона. Форма метантенков разнообразна (рис. 34).

Наиболее благоприятные гидродинамические условия для перемешивания и тока жидкости создаются в метантенках овальной формы. Цилиндрические камеры с коническими нижней и верхней частями более просты в изготовлении и обеспечивают возможность удаления сверху корки и снизу отстоявшейся жидкой массы. Перемешивание содержимого в цилиндрических метантенках с плоскими крышкой и дном требует больших удельных затрат энергии. Преимущество камер такой конструкции заключается в технологичности их изготовления. Расположение горизонтальных камер под углом к горизонту способствует лучшему заполнению, смешиванию и выгрузке навоза.

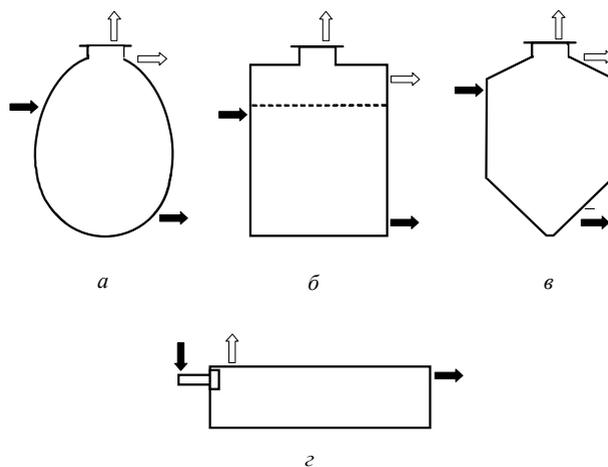


Рис. 34. Формы камер сбраживания:  
*a* – овальная; *б* – цилиндрическая; *в* – цилиндроконическая;  
*г* – наклонно-горизонтальная

**Нагревательные устройства.** Биометаногенез может протекать при различных температурных режимах: психрофильном (до 20°C), мезофильном (20–40°C) и термофильном (40–50°C). Повышение температуры увеличивает скорость сбраживания субстрата. Одновременно возрастает потребность в тепловой энергии на поддержание требуемой

температуры ферментационной среды в метантенке. В среднем на стабилизацию температуры в мезофильном процессе расходуется 15–25% образующегося биогаза, а в термофильном – 35–50%.

Подогрев перерабатываемого навоза может осуществляться перед его загрузкой или непосредственно в метантенке. Наиболее характерные технические решения нагревательных устройств приведены на рис. 35.

Греющим агентом в теплообменных устройствах является вода. При малой скорости движения ферментационной среды у поверхности нагревателя и температуре греющего агента выше 60°C взвешенные вещества отлагаются на теплопередающей поверхности и коэффициент теплопередачи снижается. Наиболее эффективен нагрев сбраживаемого материала острым паром или циркуляцией содержимого метантенка через обогреваемый горячей водой теплообменник. Следует учитывать, что в первом случае возрастает содержание влаги в отводимом из метантенка биогазе.

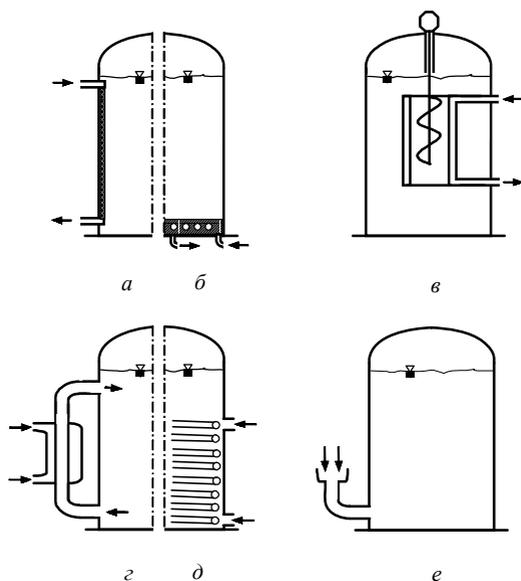


Рис. 35. Схемы нагревательных устройств:  
*a* – настенное отопление; *б* – донное отопление; *в* – отопительный цилиндр;  
*г* – теплообменник; *д* – отопительный змеевик; *е* – нагнетание пара

**Перемешивание ферментационной среды.** При переработке навоза перемешивание сбраживаемого материала является непременным условием эффективной ферментации в связи с тем, что происходит выравнивание температуры в реакционном объеме, ликвидируется градиент концентрации биомассы микроорганизмов и взвешенных веществ по высоте аппарата, улучшается контакт бактерий с субстратом, интенсифицируются массообменные процессы.

Распространенные системы перемешивания среды в метантенках представлены на рис. 36.

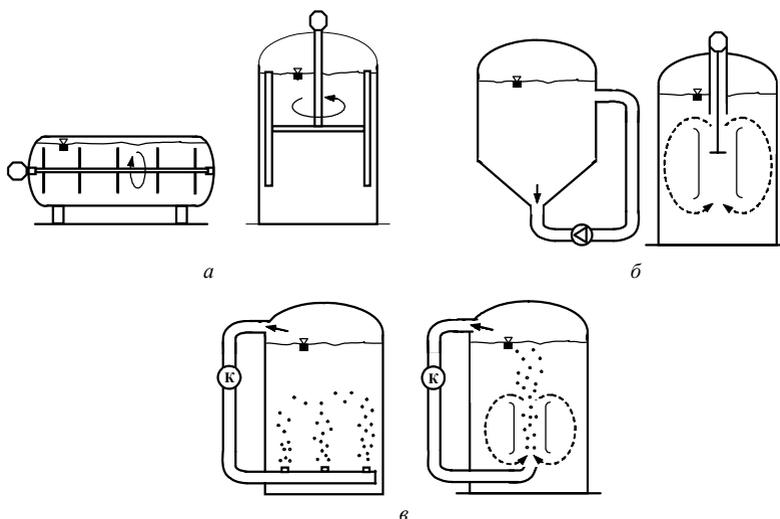


Рис. 36. Схемы устройств для перемешивания субстрата:  
*а* – механическое перемешивание; *б* – гидравлическое перемешивание;  
*в* – перемешивание газом

Механические перемешивающие устройства целесообразно применять в метантенках небольшого объема (до 100 м<sup>3</sup>). Наличие сальниковых уплотнений вала мешалки в реакторе снижает взрывобезопасность устройства. В крупных метантенках эффективно гидравлическое перемешивание или за счет барботажа биогазом, нагнетаемым компрессором из газовой зоны реактора, или из газгольдера. При перемешивании биогазом возникает опасность флотации включений и интенсивного коркообразования на поверхности среды.

**Хранение биогаза.** В подавляющем большинстве случаев целесообразно использовать биогаз в качестве топлива на месте его производства. При равномерном потреблении биогаза обеспечивают его резерв в объеме не более суточного расхода в емкостных аппаратах-хранилищах различного типа (рис. 37). Газгольдеры изготавливаются из стального листа, пластика, газонепроницаемых прорезиненных тканей или синтетических пленок. Они могут быть «сухими» и «мокрыми», постоянного или переменного объема, низкого ( $<5$  кПа), среднего (0,2–2,0 МПа) или высокого ( $>20$  МПа) давления.

Чаще всего в биогазовых установках используют газгольдеры низкого давления (давление в метантенках обычно находится в пределах 4–10 кПа). Высокое давление необходимо, если биогаз применяется в качестве горючего для транспортных средств.

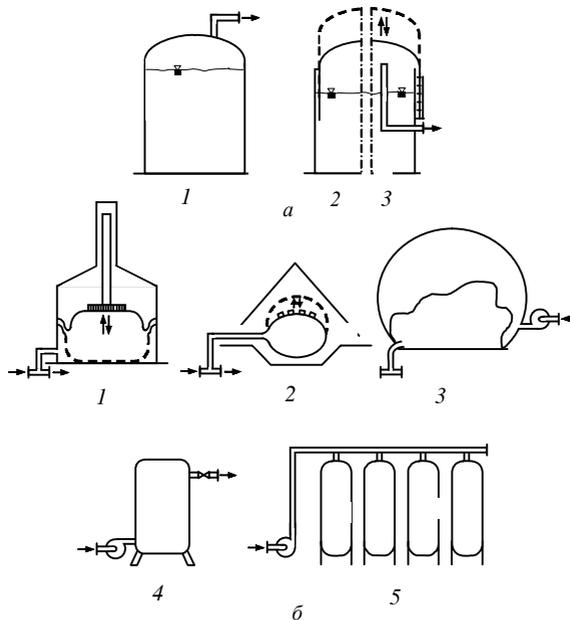


Рис. 37. Типы газгольдеров:

- a* – совмещенные низкого давления: 1 – постоянного объема; 2, 3 – переменного объема;  
*б* – раздельные низкого давления: 1, 2 – переменного объема «сухие»;  
 3 – пневморегулируемый; 4 – раздельный среднего давления;  
 5 – раздельный высокого давления

Принимая давление биогаза после гидрозатвора метантенка 4 кПа, рекомендуют при проектировании системы сбора и транспортировки биогаза потребителю рассчитывать диаметр газопроводов так, чтобы давление биогаза у потребителя составляло 1,2–1,5 кПа, а в газгольдере поддерживалось на уровне 3 кПа. Система утилизации биогаза снабжается факельной «свечой» (для сжигания биогаза), на которую может быть направлен образовавшийся по каким-либо причинам избыток биогаза.

На газгольдер приходится значительная доля стоимости биогазовой установки, поэтому объем его рассчитывают на 2–4-часовой запас биогаза или на суточный запас для установок малой мощности с неравномерной выработкой биогаза.

**Конструкции биогазовых установок.** Несмотря на простой аппаратный состав, существует множество конструкций биогазовых установок, которые различаются главным образом устройством основного аппарата – метантенка, а также уровнем контроля и управления процессом. Можно выделить четыре *типа* установок:

- без подогрева и перемешивания сбраживаемой массы;
- без подогрева, но с перемешиванием ферментационной среды;
- с подогревом и перемешиванием сбраживаемого субстрата;
- с предварительной подготовкой субстрата к сбраживанию, подогревом и перемешиванием, с системой контроля и управления процессом анаэробного сбраживания.

Простейшие установки первого типа в большом количестве используются в странах с жарким климатом (Индия, Корея, Сингапур и др.). Разогрев, перемешивание и сбраживание массы в этих установках протекает неуправляемо и бесконтрольно, что обуславливает большую продолжительность процесса сбраживания (40 и более сут) и низкий удельный выход биогаза (не более 0,5 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> полезного объема метантенка в сутки). Повышение температуры сбраживания до 30°C и перемешивание ферментационной среды увеличивает выход биогаза в 2–2,5 раза (до 1,2 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> в сутки) и сокращает продолжительность процесса до 20–25 сут. Подземное расположение метантенков ограничивает возможности использования современных теплоизоляционных материалов, из-за чего ухудшаются теплотехнические показатели процесса.

Схема классической биогазовой установки для переработки навоза приведена на рис. 38. Метаногенез осуществляют, как правило, при

температуре 30–37°C или 50–57°C. Считают рациональной технологию двухстадийной ферментации со смешанным температурным режимом. Первую стадию – кислотогенную – проводят при температуре 30–37°C, вторую – метаногенную – при 50–57°C. Такая технология позволяет экономить энергию при сохранении высокой скорости метаногенеза.

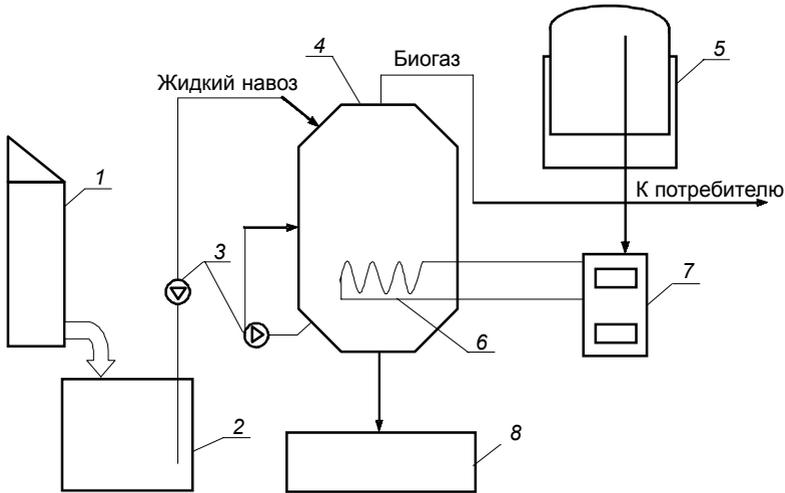


Рис. 38. Технологическая схема производства биогаза:  
 1 – ферма; 2 – навозоприемник; 3 – насос; 4 – метантенк; 5 – газгольдер;  
 6 – теплообменник; 7 – котел; 8 – приемник сброженной массы

Степень разложения органического вещества навоза при метановом сбраживании составляет 30–40%. Сброженный навоз удаляется из метантенка в накопитель насосом или самотеком через шлюзовую камеру. Способствует повышению выхода биогаза предварительное диспергирование твердых включений в потоке поступающего в метантенк навоза с помощью мешалки-измельчителя.

В современных биогазовых установках предусматривается автоматическое регулирование температуры сбраживания, уровня ферментационной среды в метантенке, операций по загрузке и разгрузке аппарата. За счет стабилизации оптимальных параметров технологического процесса можно обеспечить выход биогаза около 2 м<sup>3</sup> в расчете на 1 м<sup>3</sup> метантенка. Установлено, что на скорость процесса и выход биогаза

влияет предварительная подготовка навоза, которая включает измельчение включений и выстаивание навоза при температуре метаногенеза до полного потребления кислорода из рабочей суспензии, в результате чего создаются микроаэрофильные условия, способствующие активизации кислотогенных микроорганизмов. Запатентованы способы предварительной химической обработки навоза щелочью или слабой кислотой (до рН 3,5) с выдержкой в течение 6–12 ч при температуре 35–200°С и последующей корректировкой величины рН до оптимальной.

Современные технологии предусматривают отстаивание сброженного навоза в течение 10–12 ч, обезвоживание сформировавшегося осадка центрифугированием с получением удобрения и доочистку осветленной жидкости и фугата на аэробных очистных сооружениях. Возможно использование жидкой фракции в системе орошения сельскохозяйственных угодий. Сброженный навоз вносят на поля в осенне-весенне-летний период, в связи с чем предусматривают хранилище жидкого навоза вместимостью на 3-месячный запас и склад для хранения твердой фазы сброженного навоза. При анаэробной обработке навоза фосфор и калий практически полностью сохраняются в сброженной массе. Потери азота в процессе метаногенеза не превышают 5%.

Исходя из накопленного производственного опыта, в табл. 30 представлены усредненные данные по выходу навоза от сельскохозяйственных животных и птицы и количеству получаемого из него биогаза.

Таблица 30

**Показатели по выходу биогаза из навоза**

Показатель	Значения показателя для		
	молочных коров	птицы	свиней
Выход, на 1 голову в сутки:			
навоза, кг	55,0	0,2	3,5
биогаза, м <sup>3</sup>	1,62	0,02	0,32
Объем биогаза, м <sup>3</sup> на 1 т сухого вещества навоза	300	600	500

Для экономии энергии на поддержание термофильного процесса сбраживания проектируют биогазовые установки в комплексе с солнечными водонагревателями или ветровыми двигателями для привода перемешивающего устройства.

Американские эксперты утверждают, что при максимальной утилизации сельскохозяйственных отходов можно за счет биогаза полностью обеспечить потребности сельского хозяйства в энергии.

Сбраживание осадков городских очистных сооружений канализации чаще всего осуществляют в мировой практике в мезофильном режиме (33–37°C) при продолжительности процесса 20–25 сут. Преимуществом такой обработки является высокая степень распада органического вещества (40%) и, соответственно, высокий выход биогаза, хорошие водоотдающие свойства осадка после сбраживания, а также минимальный расход тепла на поддержание требуемой температуры. Однако длительное время пребывания осадка в метантенках требует больших капитальных затрат на строительство установок.

В термофильных условиях (50–55°C) продолжительность сбраживания осадка значительно меньше (5–7 сут), но степень распада органического вещества и водоотдающие свойства осадка недостаточно высоки.

Лимитирующей стадией процесса сбраживания осадков сточных вод является гидролиз взвешенного (твердого) вещества, в связи с чем эту стадию целесообразно проводить в более интенсивном (термофильном) режиме. В дальнейшем процесс следует продолжать в мезофильных условиях для получения оптимальных водоотдающих свойств осадка. С учетом этого обстоятельства в ведущих странах мира стали применять термофильно-мезофильный режим сбраживания осадков.

Российскими учеными разработана технология двухфазного сбраживания осадков городских сточных вод, основанная на экстра-термофильном режиме работы метантенков первой фазы (температура 65°C, продолжительность процесса 0,6–1,0 сут) и мезофильном режиме второй фазы (температура 30°C, время пребывания осадка не менее 10 сут). Двухфазная технология обеспечивает увеличение степени распада органического вещества осадка по сравнению с мезофильным режимом в 1,2–1,6 раза (в зависимости от концентрации сухого вещества в осадке) и снижение дозы флокулянта при последующем механическом обезвоживании сброженного осадка на 40–50% (расход флокулянта составляет 3–4 кг/т сухого вещества осадка против 5–6 кг/т при обезвоживании термофильно сброженного осадка).

### 13.2. Подготовка и использование биогаза

При полном разложении органического вещества количество и состав биогаза определяется соотношением С : Н : О в исходном материале и температурой процесса брожения. Биогаз, полученный сбраживанием осадков городских очистных сооружений, отличается более стабильным составом (60–68% метана). При переработке отходов сельского хозяйства состав биогаза сильно колеблется (50–75% метана). Достаточно высокое содержание метана в биогазе обуславливает ряд направлений его *использования*:

- в качестве топлива для получения пара, горячей воды, горячего воздуха или топочных газов;
- для подпитки сетей природного газа;
- для получения электроэнергии;
- в качестве топлива для автомобильных двигателей и для бытовых газовых плит.

Кроме того, разработаны технологии получения из биогаза кормового белка и товарной углекислоты. В зависимости от способа использования биогаза степень его очистки от нежелательных компонентов (взвешенные частицы, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) может быть различной (табл. 31).

Таблица 31

Требования по очистке биогаза

Способ использования биогаза	Необходимость удаления (+) компонентов			
	Взвешенные частицы	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Топка котельных агрегатов и сушильных установок	+	+	–	–
Бытовые газовые плиты	+	+	–	–
Стационарные газовые двигатели	+	Частичное удаление	–	–
Топливо для автомобильных двигателей	+	+	+	+
Подпитка сети природного газа	+	+	+	+

Содержащиеся в биогазе взвешенные частицы отлагаются в газопроводах и забивают арматуру. Их отделяют в гравийных или тканевых (из стекловолокна) фильтрах. Биогаз на выходе из метантенка имеет температуру 30–35°C (мезофильный режим) или 50–55°C (термофильный

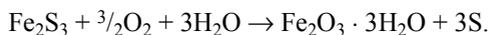
процесс) и насыщен влагой. В результате охлаждения биогаза при транспортировке в газопроводах образуется конденсат, который может замерзнуть в холодный период года. Для осушки биогаза устанавливают на газосборном пункте влагоотделитель, из которого конденсат отводится в сливную емкость, а в нижних точках газопровода предусматриваются конденсатосборные устройства. Барботаж биогаза через слой охлажденной до 10°С воды обеспечивает отделение взвешенных частиц и осушку охлаждением, достаточную при использовании биогаза для получения тепла. Применение биогаза в качестве моторного топлива требует глубокой осушки от влаги силикагелем, хлоридом кальция или этиленгликолем.

Наиболее вредным компонентом биогаза является сероводород. Он токсичен, обладает неприятным запахом, в присутствии влаги и особенно в комбинации с диоксидом углерода вызывает коррозию металлического оборудования, при сгорании образует оксид и диоксид серы, которые, взаимодействуя с парами воды, превращаются в сернистую и серную кислоты, имеющие высокую коррозионную активность.

Очистку биогаза от сероводорода осуществляют различными методами. В биогазовых установках небольшой мощности (сотни м<sup>3</sup>/сут) применяют адсорбционный («сухой») способ удаления H<sub>2</sub>S за счет образования сульфидов при взаимодействии с оксидом железа (ферроокисный фильтр):



Оптимальная влажность адсорбента (5–20%) поддерживается присутствующими в биогазе парами воды. 1 кг оксида железа сорбирует около 250 г H<sub>2</sub>S. Регенерацию адсорбента производят продувкой воздухом. При этом образуется элементарная сера, отлагающаяся на поверхности оксида железа:



После каждой регенерации сорбционная способность оксида железа уменьшается в среднем на 15%, что обуславливает необходимость регулярной замены отработанного сорбента.

Для непрерывной десульфидации биогаза применяют двухколонную установку с переменным режимом работы колонн: в одной колонне протекает процесс поглощения сероводорода, а в другой – регенерация сорбента продувкой воздухом (рис. 39).

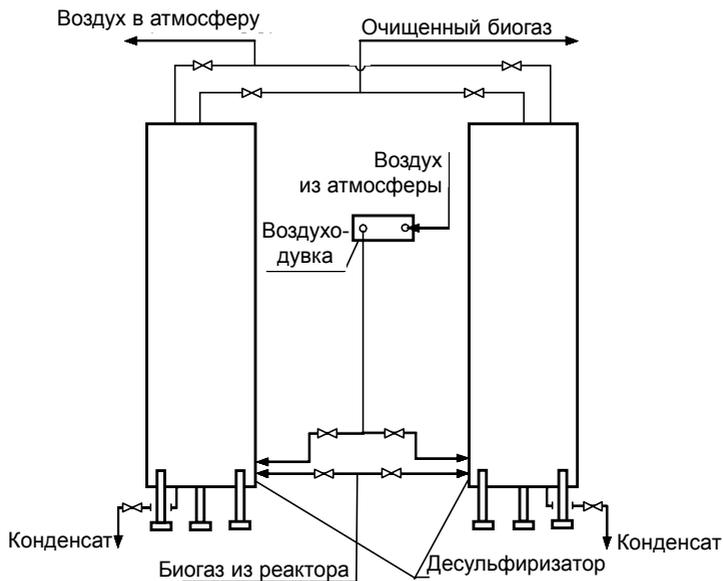


Рис. 39. Двухколонная установка для очистки биогаза от сероводорода

В качестве поглотителя сероводорода может быть использован гидроксид железа ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) в виде загрузки с размером частиц 10–20 мм, размещенной в колонне (диаметром 1,0–1,2 м, высотой 2–3 м) слоями с низким гидравлическим сопротивлением. Для очистки  $100 \text{ м}^3$  биогаза, содержащего 0,35%  $\text{H}_2\text{S}$ , требуется около 2 кг  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Расход  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  по стехиометрическому соотношению составляет 2,1 кг на 1 кг извлеченного  $\text{H}_2\text{S}$ .

Основной недостаток «сухого» метода десульфуризации биогаза – опасность самовозгорания материала во время регенерации из-за значительного количества выделяющегося тепла.

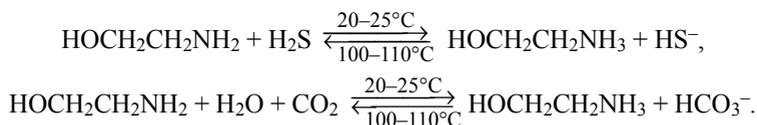
При больших расходах биогаза (тысячи  $\text{м}^3/\text{сут}$ ) с высоким содержанием  $\text{H}_2\text{S}$  очистку производят абсорбционным («мокрым») способом с помощью растворов солей железа. В восстановительной колонне (абсорбере) восходящий поток биогаза промывается раствором  $\text{Fe}^{+3}$  (супензией  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ):



Элементарная сера отделяется от промывного раствора в отстойнике. Раствор регенерируется в окислительной колонне продувкой воздухом:



Используя водные растворы определенных химических соединений, можно обеспечить одновременную очистку биогаза от  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$ . Например, моноэтаноламин, являясь слабым основанием, обратимо взаимодействует с  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$ :



Равновесие обратимых реакций легко сдвигается изменением температуры. Способ моноэтаноламиновой очистки обеспечивает полное удаление из биогаза  $\text{CO}_2$  и снижение концентрации  $\text{H}_2\text{S}$  до 0,001% об.

Простым и дешевым способом очистки биогаза от  $\text{CO}_2$  с частичным удалением  $\text{H}_2\text{S}$  является промывка водой в абсорбере под давлением порядка 0,1 МПа. Насыщенная диоксидом углерода вода регенерируется продувкой воздухом при атмосферном давлении. Энергетические затраты на предварительное компримирование неочищенного биогаза компенсируются высоким содержанием метана в очищенном газе. Водяная промывка под давлением используется на практике как вторая ступень очистки биогаза после десульфидизации.

На крупных биогазовых установках (тысячи  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) перспективно обогащение биогаза за счет удаления  $\text{CO}_2$  методами мембранного разделения и адсорбцией на молекулярных ситах.

Мембранный метод основан на различной проницаемости мембраны для компонентов биогаза. Этот способ широкого распространения не получил.

Чаще применяется разделение метана и диоксида углерода на молекулярных ситах (цеолитах). Микропористая структура молекулярных сит обеспечивает быструю адсорбцию диоксида углерода, азота и кислорода. Метан адсорбируется медленно, что и обуславливает разделение этих компонентов биогаза. Адсорбцию газов проводят при повышенном давлении, а при снижении давления в аппарате происходит регенерация молекулярных сит. Процессы адсорбции и регенерации протекают в адсорбере поочередно. Для реализации этого метода необходима

предварительная очистка биогаза от сероводорода. В зарубежной практике при эксплуатации биогазовых установок часто применяется комбинированная (многоступенчатая) очистка биогаза.

В качестве автомобильного топлива используется очищенный компримированный или сжиженный биогаз. Сжатый до давления 20 МПа при температуре 0°C 1 м<sup>3</sup> биогаза занимает объем 2,95 л. В баллонах емкостью 50 л при таких условиях можно хранить 17 м<sup>3</sup> биогаза.

Производственный опыт свидетельствует об экономической целесообразности применения биогаза в газовых двигателях с электрогенератором. В этом случае сжигание 1 м<sup>3</sup> биогаза позволяет выработать 1,6–2,1 кВт · ч электроэнергии. Большой опыт работы с газовыми двигателями накоплен в Германии, где эксплуатируется более 250 теплоэлектростанций, работающих на биогазе.

## Глава 14. БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

### 14.1. Применение пробиотиков

Интенсивное ведение животноводства предполагает использование антибиотиков не только в терапевтических целях, но и в небольших дозах для стимуляции роста молодняка. Массовое применение антибиотиков приводит к распространению в микробных популяциях *R*-фактора устойчивости, передающегося через плазмиду при конъюгации. Возросшую устойчивость к антибиотикам проявляют многие патогенные микроорганизмы.

Современные методы разведения скота сопряжены со стрессом для молодняка. Молодое животное отлучают от матери вскоре после рождения, переводят на искусственное вскармливание. При этом в желудочно-кишечный тракт животного не успевают заселиться нормальные, непатогенные микроорганизмы, которые обычно животное получает из материнского молока, наблюдается дисбаланс кишечной микрофлоры, появляются энтериты и диарея.

Эти обстоятельства вызвали ряд исследований, в которых препараты молочнокислых бактерий (пробиотики) используются как безопасная альтернатива низким дозам антибиотиков.

Применение молочнокислых бактерий, прежде всего, рода *Lactobacillus* обусловлено рядом *обстоятельств*:

- 1) способность прикрепляться к эпителиальным ворсинкам кишечника и вытеснять посторонние микроорганизмы;
- 2) продуцирование молочной кислоты, ингибирующей жизнедеятельность других микроорганизмов;
- 3) некоторые штаммы *Lactobacillus* синтезируют метаболиты, нейтрализующие эффект энтеротоксинов, антибиотические вещества и витамины группы В;
- 4) будучи факультативными анаэробами, молочнокислые бактерии размножаются в кишечнике;
- 5) резистентность к антибиотикам у них проявляется на хромосомном уровне.

Молочнокислые бактерии размножаются через несколько часов после рождения животного, и таким образом достигается защита

от энтеропатогенных микроорганизмов. Распространенными кишечными микроорганизмами у млекопитающих являются штаммы *Escherichia coli*. Между представителями рода *Lactobacillus* и *E. coli* устанавливается баланс, т. е. лактобактерии контролируют численность кишечной палочки.

Среди кишечной микробиоты животных идентифицировано три вида *Lactobacillus: acidophilus, bulgaricus* и *bifidus*. Установлена видоспецифичность и тканеселективность молочнокислых бактерий, т. е. способность приживаться в определенном участке кишечника животных определенных видов.

Основными *проблемами* при производстве пробиотиков являются:

- получение устойчивых высококонкурентных штаммов;
- определение оптимальных условий их культивирования;
- производство препарата, устойчивого при хранении и удобного в применении.

## **14.2. Получение биоразлагаемых полимерных материалов**

Большинство синтетических полимерных материалов отличаются высокой стойкостью к воздействию микроорганизмов. С точки зрения утилизации отработанных изделий из таких материалов это является их недостатком.

В настоящее время проводятся исследования с целью получения материалов, не уступающих по свойствам синтетическим полимерам, но быстрее претерпевающих деградацию в окружающей среде. Можно выделить три *направления*, в которых проводятся разработки таких материалов:

1. Получение фоторазрушаемых полимерных материалов. Спустя определенное время наблюдается деструкция таких материалов в атмосферных условиях, а затем остатки разрушаются почвенными микроорганизмами.

2. В композицию полимерных материалов вводятся соединения, легко утилизируемые микроорганизмами. В Японии, например, производится пленка на основе сополимера крахмала и метилакрилата. Определенное время такие пленки обладают высокими физико-механическими показателями, а затем в естественных условиях быстро подвергаются деструкции.

В Республике Беларусь в Институте механики металлополимерных систем разработана пленка композиционного состава на основе кукурузного крахмала, полиэтилена высокого давления и пластификатора. Исследования показали, что такая пленка подвергается активной деструкции почвенными микроорганизмами как в аэробных, так и в анаэробных условиях.

3. Получение биodeградируемых полимерных материалов путем микробного синтеза. Примером могут служить полигидроксиалканоаты – полимеры, в зависимости от состава обладающие разными свойствами. Синтезировать полигидроксиалканоаты способны многие микроорганизмы, прежде всего *Alcaligenes eutrophus*, которые используют эти соединения как внутриклеточный источник углерода и энергии.

Из всех полигидроксиалканоатов наиболее полно изучен и применяется в промышленном масштабе синтез поли-β-гидроксibuтират бактериями *Alcaligenes eutrophus*. Однако эти бактерии имеют малую скорость роста и используют ограниченное число источников углерода, что делает производство дорогим. При переносе генов биосинтеза этого полимера в *Escherichia coli* получают быстрорастущие трансформанты, накапливающие поли-β-гидроксibuтират до 95% от сухой массы клеток. После мутагенной обработки эти бактерии синтезируют сополимер поли-β-гидроксibuтират-β-гидроксивалерат, аналогичный по свойствам широко применяемому полипропилену.

Полигидроксиалканоаты используются для получения биodeградируемых пластмасс, в частности, в производстве упаковочных материалов. Годовой объем продаж биodeградируемых пластмасс составляет около 1,3 млрд. долл. США.

### 14.3. Бактериальные удобрения

**14.3.1. Азотные бактериальные удобрения.** Азот является основным компонентом атмосферного воздуха, а в почве наблюдается его дефицит, поскольку он потребляется растениями и микроорганизмами в связанном виде (нитратный, аммонийный). Для повышения урожайности растений в почву вносится азот в виде органических и минеральных удобрений. Ежегодная потребность в минеральных удобрениях составляет более 100 млн. т, в том числе в Республике Беларусь – около 500 тыс. т.

Применение химических удобрений приводит к загрязнению почвы, поскольку вместе с ними в почву попадают побочные загрязняющие элементы (например, фтор, кадмий и др.), к тому же химические удобрения становятся все более дорогими. Особую тревогу вызывает использование азотных удобрений, так как обнаруживается повышенное содержание токсичных для человека и животных нитратов и нитритов в питьевой воде, овощах, зеленых кормах.

Альтернативой химическим удобрениям являются бактериальные – препараты бактерий, способных к фиксации атмосферного азота (дiazотрофных). Уже несколько десятилетий производят препараты на основе микроорганизмов-азотфиксаторов для инокуляции семян растений. Крупнейшие компании по производству таких препаратов находятся в США, Франции, Великобритании, существуют производства в Бразилии, Аргентине, Мексике, Китае, почти во всех европейских странах.

Бактерии, способные к фиксации азота, развиваются в симбиозе с бобовыми растениями (клубеньковые бактерии рода *Rhizobium*) либо относятся к свободноживущим (*Azotobacter*, *Clostridium*).

**Препараты на основе бактерий рода *Rhizobium*.** Бактерии рода *Rhizobium* представляют собой палочки размером 0,5–3,0 мкм, спор не образуют, грамположительные. Каждый вид *Rhizobium* специфичен в отношении небольшого числа видов растений (табл. 32) и не взаимодействует с другими видами, которые не являются его природными хозяевами.

Таблица 32

**Специфичность видов микроорганизмов-азотфиксаторов в отношении разных растений**

Бактерии	Растения-хозяева
<i>Rhizobium leguminosarum</i> sabs. <i>trifolii</i>	Клевер
<i>Rhizobium leguminosarum</i> sabs. <i>phaseoli</i>	Фасоль обыкновенная, фасоль золотистая
<i>Rhizobium leguminosarum</i> sabs. <i>viciae</i>	Горох, фасоль
<i>Rhizobium leguminosarum</i> sabs. <i>lupini</i>	Люпин
<i>Rhizobium meliloti</i>	Люцерна
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	Соя

На определенной стадии жизненного цикла бактерии проникают в клетки корня растений и формируются корневые клубеньки. Бактерии

внутри корневых клубеньков находятся в форме, не имеющей клеточной стенки, они связывают атмосферный азот с помощью фермента нитрогеназы. Внутри клубенька нитрогеназа защищена от токсического действия атмосферного кислорода. Растения обеспечивают бактерии необходимыми источниками углерода и энергии, образующимися при фотосинтезе, а от них получают связанный азот, регуляторы роста, витамины.

Разработана технология нескольких препаратов на основе бактерий рода *Rhizobium* (рис. 40).

В производстве ризоторфина используют быстрорастущие клубеньковые бактерии (БРКБ) – симбионты фасоли, гороха, клевера и медленнорастущие (МРКБ), развивающиеся в симбиозе с люпином и соей. В качестве источника углерода для МРКБ применяют сахарозу, для БРКБ – глюкозу. В лабораторных условиях культуру выращивают на плотной среде с отваром гороха, для выращивания в инокуляторах и производственных ферментаторах используют среду следующего состава, г/дм<sup>3</sup>: источник углерода – 20; кукурузный экстракт – 7–10; (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – 0,5; KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> – 0,5; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 0,5; MgSO<sub>4</sub> – 0,2; CaCO<sub>3</sub> – 1,0.

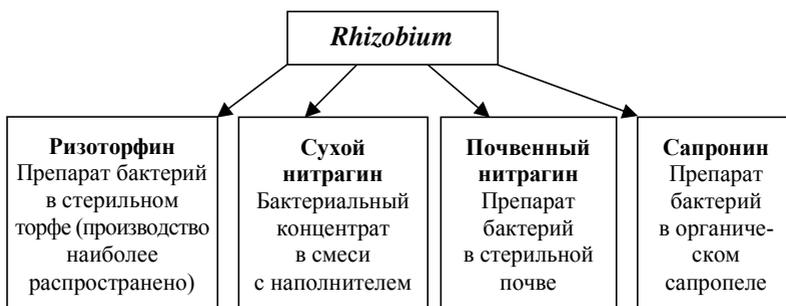


Рис. 40. Препараты на основе бактерий рода *Rhizobium*

Схема производства ризоторфина представлена на рис. 41. Слабокислый торф (рН 3–6) подсушивают до влажности 30%, измельчают в дробилках до размера частиц 0,1 мм, для стабилизации значения рН в пределах 6,8–7,0 добавляют измельченный мел. Торф расфасовывают в полиэтиленовые пакеты по 150–160 г, запаивают. Для обеспечения газообмена толщина пленки не должна превышать 0,1 мм.

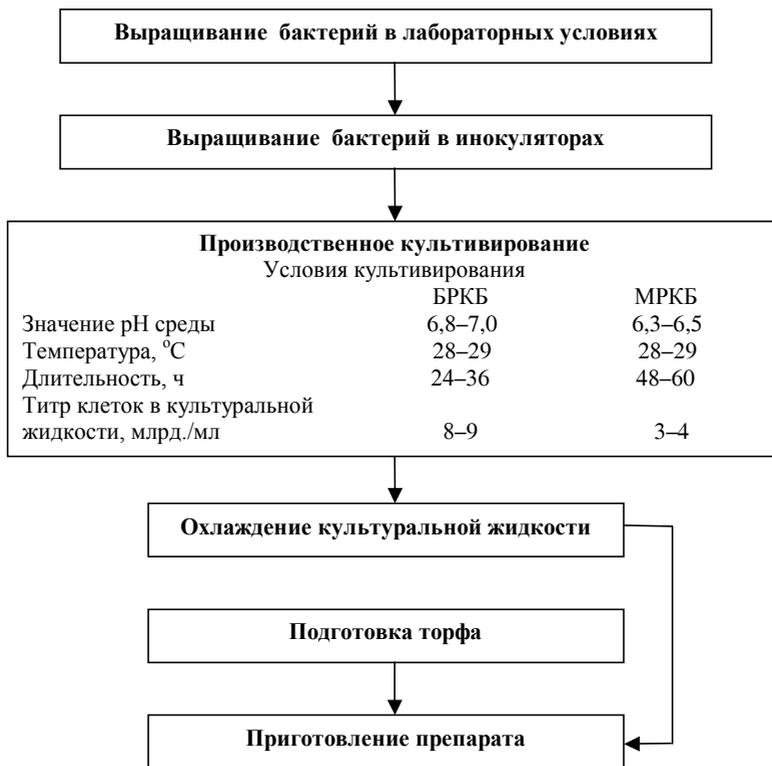


Рис. 41. Схема производства ризоторфина

Пакеты с торфом стерилизуют на установке с радиоактивным кобальтом, затем в каждый пакет стерильной иглой вводят по 50–60 мл охлажденной до 10–15°C культуральной жидкости, содержимое пакетов усредняют во вращающемся барабане. Титр клеток в полученном препарате – 1–2 млрд./г. Для поддержания их жизнеспособности в пакеты добавляют стерильный раствор глюкозы. Хранят препараты БРКБ при температуре 5–10°C, МРКБ – 12–15°C, срок годности – 6 мес. 200 г препарата (1 га-порция) достаточно для обработки семян, необходимых для засева 1 га почвы.

В производстве сухого нитрагина культуральную жидкость получают аналогично, затем клетки отделяют бактофугированием, смешивают

вают с защитной средой (20% мелассы + 1% тиомочевины) и высушивают в сублимационной сушилке до влажности 2–3%. Защитная среда предохраняет клетки от разрушения кристаллами льда. Высушенный материал размалывают в шаровых мельницах и смешивают с размолотым наполнителем (бентонит, каолин) до стандартного титра клеток 9–10 млрд./г препарата.

Почвенный нитрагин большого распространения не получил в связи со сложностью стерилизации почвы. Почва содержит большое количество микроорганизмов и жизнеспособность клеток рода *Rhizobium* в таком препарате существенно снижается.

Технология сапронина разработана в ГНУ «Институт микробиологии» НАН Беларуси, на сапропеле иммобилизуются местные эффективные штаммы клубеньковых бактерий.

**Препарат на основе свободноживущих азотфиксаторов.** Препарат азотобактерин производят на основе свободноживущих бактерий *Azotobacter chroococcum*. Это бесспорные палочковидные бактерии, при старении клетки округляются и покрываются слизистой капсулой. Технология препарата аналогична производству ризоторфина. Азотобактерии нуждаются в источниках фосфора, поэтому в торф, кроме мела, добавляют суперфосфат (0,1%). Доказано, что при использовании азотобактерина рост растений стимулируется не только фиксацией азота, но и способностью культуры продуцировать биологически активные вещества, прежде всего, витамины группы В.

**Проблемы и перспективы производства азотных бактериальных удобрений.** При фиксации атмосферного азота побочной реакцией является восстановление нитрогеназой  $\text{H}^+$  до  $\text{H}_2$ , в ходе которого расходуется энергия аденозинтрифосфата (АТФ). В результате только 40–60% потока электронов, проходящих через нитрогеназный комплекс, передается на  $\text{N}_2$ , что значительно уменьшает эффективность процесса фиксации азота. Если попытаться блокировать побочную реакцию, изменив структуру фермента, то вследствие особенностей строения нитрогеназы происходит уменьшение ее активности.

Вторая проблема заключается в том, что созданные путем мутагенеза и последующего отбора активные азотфиксаторы не выдерживают конкуренции с природными штаммами в процессе формирования клубеньков на корнях растений-хозяев. В результате трудоемких экспериментов было установлено, что процесс образования клубеньков очень сложный, в нем задействованы продукты около 20 генов, и создать

методами генетической инженерии активные фиксаторы азота, способные конкурировать с природными штаммами в образовании клубеньков, в настоящее время не представляется возможным.

До сегодняшнего дня остались неосуществленными смелые планы некоторых исследователей ввести бактериальные гены фиксации азота непосредственно в растения, чтобы такие растения сами могли фиксировать азот.

**14.3.2. Фосфорные бактериальные удобрения.** Ионы фосфата в почве малоподвижны, и довольно часто вблизи корневой зоны растений обнаруживается дефицит фосфора. Внутри и вокруг мелких корешков растений в результате заражения почвенными непатогенными грибами (семейства *Endogonaceae*) формируются особые структуры – везикулярно-арбускулярная микориза. Возникает симбиоз между растениями и грибами. Гифы микоризы простираются далеко за пределы корневой системы растения и доставляют корням фосфат-ионы и микроэлементы. Микориза обнаружена у большинства видов культурных растений, установлено, что в таких растениях выше концентрация гормонов роста. Формирование микоризы зависит от типа почвы, условий, температуры, для ускорения ее создания можно проводить инокуляцию растений выделенными спорами, инфицированной почвой или корнями растений с микоризой. Однако для инокуляции в полевых условиях требуется большое количество препарата (2–3 т/га).

На основе бактерий *Bacillus megatherium* var. *phosphaticum* получают препарат фосфобактерин. Эти спорообразующие, палочковидные бактерии, способные переводить минеральные фосфаты и фосфорорганические соединения в доступные для растений формы. Получение препарата на основе бактерий аналогично получению нитрагина и азотобактерина.

*Bacillus megatherium* var. *phosphaticum* выращивают с соблюдением условий асептики (вследствие высокой чувствительности к фаговой инфекции) в течение 36–48 ч на среде следующего состава, %: кукурузный экстракт – 1,8; меласса – 1,5; сульфат аммония – 0,1; мел – 1,0. Споры *Bacillus megatherium* var. *phosphaticum* термоустойчивы, поэтому препарат получают концентрированием культуральной жидкости с последующим высушиванием в распылительной сушилке (при температуре 65–75°C до влажности 2–3%). Для достижения стандартного титра готового препарата (8 млрд. спор на 1 г) вводят наполнители.

Препарат имеет высокую стойкость при хранении: в течение года доля жизнеспособных клеток снижается на 20%. Практика показывает, что при применении фосфобактерина почва обогащается биологически активными веществами, прежде всего, витаминами группы В.

Проведенные в последние годы исследования показали, что наиболее эффективной оказывается инокуляция растений не монокультурой, а полиштаммовыми препаратами, осуществляющими азотфиксацию, трансформацию труднодоступных фосфатов, продуцирование биологически активных веществ.

#### 14.4. Биологическая защита растений

По данным ФАО (Международной продовольственной организации), 20–30% возможного сбора урожая теряется в результате болезней растений, развития сорняков, действия вредителей. Потери сельскохозяйственной продукции обусловлены действием 160 видов фитопатогенных бактерий, 250 видов вирусов, более 8000 видов вредных насекомых и клещей, более 2000 видов сорняков. Темпы роста затрат на средства защиты растений в 3–4 раза превышают темпы прироста сельскохозяйственной продукции.

В 50–80-х гг. XX в. очень широкое распространение получили химические пестициды. В зависимости от объекта их действия различают: фунгициды (против грибов), гербициды (против сорняков), инсектициды (против насекомых), альгициды (против водорослей) и т. д. Основные *недостатки* химических пестицидов:

1) это химические соединения, которые являются ксенобиотиками, они длительное время сохраняются в почве (до 15–20 лет), накапливаются в растениях, жировых тканях многих животных, попадают в продукты питания;

2) у вредителей развивается устойчивость к пестицидам;

3) химические пестициды имеют низкую специфичность, их применение может привести к нарушению естественных регулирующих механизмов в биоценозах и массовому развитию вредных организмов;

4) эти соединения часто являются мутагенами, аллергенами или канцерогенами, оказывают вредное воздействие на человека и животных.

Крупномасштабное производство и применение химических пестицидов привело к накоплению их в почве, грунтовых и поверхностных

водах, появлению устойчивых форм вредителей (в 1948 г. было обнаружено 12 видов насекомых, резистентных к пестицидам, к настоящему времени их насчитывается более 400). В сложившейся ситуации целесообразно комплексное использование различных методов защиты растений с повышением удельного веса биологического метода.

Существует Международная организация биологической борьбы, согласно уставу которой, принятому в 1971 г., под биологическим методом защиты понимается применение живых организмов и продуктов их жизнедеятельности для предотвращения или уменьшения ущерба, наносимого организмам вредителями.

Можно выделить четыре основных направления использования биологического метода в защите сельскохозяйственной продукции от вредителей (рис. 42).



Рис. 42. Основные направления использования биологического метода

**14.4.1. Использование естественных врагов вредителей.** Это традиционное направление, известное с давних времен, предполагает использование хищников, паразитов и антагонистов вредителей. Имеются сообщения об использовании в 900 г. и 1200 г. хищных муравьев для борьбы с вредителями цитрусовых культур. В 1762 г. зафиксирован первый случай интродукции из Индии на остров Маврикий птицы майны для борьбы с красной саранчой. В 1973 г. интродуцирован из США во Францию хищный клещ для борьбы с филлоксерой винограда.

**14.4.2. Генетический метод борьбы.** В основу этого метода положено насыщение природной популяции вредного организма генетически неполноценными особями того же вида.

Путем отбора или воздействия каких-либо факторов получают недостаточно жизнеспособные или бесплодные особи. При скрещивании

с особями природной популяции они вызывают снижение их численности и, в конечном счете, вымирание вредителя. Этот метод называется автоцидным, так как свойство насекомых к воспроизводству используется для самоуничтожения вредителя.

**Лучевая и химическая стерилизация насекомых.** Высокие дозы ионизирующего излучения приводят к летальному эффекту, более низкие вызывают различные изменения в делящихся клетках, в первую очередь в половых. При правильно подобранной дозе соматические клетки не страдают, а в половых происходят разрывы хромосом с последующим неправильным срастанием. При сохранении способности облученных насекомых к спариванию это приводит к получению бесплодного потомства.

Первый успешный опыт по выпуску стерилизованных самцов в естественную популяцию мясной мухи был проведен в 1952 г. на острове у побережья Флориды. Численность бесплодных самок в третьем поколении составила 100%, в последующие годы появление мух в этом регионе не отмечалось.

В мире реализовано более двух десятков программ по борьбе с вредителями с помощью выпуска стерилизованных насекомых.

Хемотрериянты – химические вещества, уменьшающие или полностью устраняющие способность насекомых к размножению. Наиболее активным действием обладают триэтиленимиды фосфорной и тиофосфорной кислот. Обязательным условием и в этом случае является сохранение нормальной половой активности и поисковых реакций у стерилизованных самцов. Возможны два *варианта* применения хемотрериянтов:

– выпуск в природную популяцию насекомых, обработанных хемотрериянтами;

– обработка насекомых природной популяции в условиях их скопления.

При высокой селективности стерилизация насекомых имеет ряд недостатков: необходимость разведения огромной массы насекомых; массовый выпуск насекомых может привести к возрастанию их вредной деятельности; хемотрериянты могут быть токсичными для человека и животных.

**Получение бездиапаузных популяций насекомых.** В распространении и выживании популяций насекомых важное значение имеет зимняя диапауза. Скрещивание популяций из низких и более высоких широт приводит либо к запаздыванию периода покоя и неподготовленности

к зимовке в высоких широтах, либо к раннему наступлению диапаузы в южных широтах и гибели насекомых из-за длительного воздействия высокой температуры и сухости.

**14.4.3. Использование биологически активных веществ.** Характерное свойство насекомых – необычайно тонкое обоняние. Выделение феромонов – это способ передачи информации, язык насекомых.

Известны феромоны различного *назначения*:

– скучивания – концентрирования насекомых для использования источников пищи;

– тревоги или обороны;

– следовые, отмечающие путь следования насекомого в поисках пищи;

– опознавания и регулирования, играющие роль в поддержании кастовой системы и в контроле размножения в рамках колонии или семьи;

– половые (аттрактанты).

Феромоны обнаружены у 700 видов насекомых, более чем для 200 видов установлено химическое строение. Одно и то же вещество может привлекать разных насекомых. Специфичность феромонов обусловлена небольшими количествами (до 10%) вторичных веществ, роль которых заключается в усилении активности основного компонента.

При истреблении вредителей аттрактанты используются для различных целей:

1) массовый отлов самцов;

2) дезориентация самцов путем насыщения участка высокой концентрацией феромона, чтобы помешать самцам воспринимать феромоны самок;

3) другой способ дезориентации самцов основан на применении ингибиторов спаривания, или антиферомонов. Это химические вещества, близкие по структуре, но подавляющие действие феромонов;

4) использование феромонов в качестве ловушек с инсектицидами позволяет значительно снизить расход инсектицидов.

**14.4.4. Применение препаратов на основе патогенных организмов.** Достоинствами таких препаратов являются высокая специфичность и небольшая вероятность получения резистентных форм вредителей. Будучи соединениями биологического происхождения, они легко деградируют в окружающей среде.

**Бактериальные энтомопатогенные препараты.** Это биологические препараты для борьбы с вредными насекомыми (от гр. entomon – насекомое). Описано свыше 90 видов бактерий, инфицирующих насекомых. Основную часть бактериальных препаратов получают на основе бактерий *Bacillus thuringiensis*, к которым восприимчивы около 400 видов насекомых. Известно свыше 30 серотипов и разновидностей этой группы (>1000 штаммов).

Серотип – разновидность вида или подвида бактерии, отличающаяся от других разновидностей того же вида или подвида антигенной структурой. Серотип определяется с помощью серологической реакции, при которой антиген соединяется со специфической к нему иммунной сывороткой.

Биологическое действие бактериальных энтомопатогенных препаратов обеспечивается входящими в их состав спорами *Bacillus thuringiensis*, параспоральными кристаллами ( $\delta$ -эндотоксином), термостабильным  $\beta$ -экзотоксином и соединениями, синтезируемыми клетками, проросшими из спор, – дополнительными факторами вирулентности бактериальных инсектицидов.

Споры бактерий, поглощенные восприимчивым насекомым, прорастают в его кишечнике. Вегетативные клетки проникают в полость тела, быстро размножаются, разрушают ткани и вскоре заполняют значительную часть полости. Эта стадия называется септицемия. Вегетативные клетки *Bacillus thuringiensis* образуют биологически активные соединения, способствующие развитию этой культуры среди другой микрофлоры в организме насекомых. Это антибиотики, бактериоцины, экзотоксины различной природы. Еще до гибели насекомого возбудитель образует споры.

Основным токсичным компонентом бактериальных инсектицидов является  $\delta$ -эндотоксин (кристаллический токсин), образующийся одновременно со спорой в противоположной части спорангия. После созревания спор и кристаллов спорангий лизируется и оба образования (кристалл и спора) освобождаются.

Параспоральные кристаллы имеют различную форму, размеры, эти параметры не коррелируют с их токсичностью. Форма параспоральных телец может зависеть от молекулярной массы, вторичной структуры белков, а следовательно, укладки субъединиц, входящих в их состав. Обнаружены различия в расположении субъединиц кристаллов разных серотипов *Bacillus thuringiensis*. Для ряда подвидов характерно

образование нескольких инсектицидных кристаллов в одном спорангии, часто – различных форм и размеров.

Кристаллические эндотоксины термолабильны, в инертной среде сохраняются длительное время, не утрачивая свойств. Кристаллы нерастворимы в воде, но растворимы в щелочных растворах.

Основным компонентом параспоральных кристаллов всех изученных подвигов *Bacillus thuringiensis* являются белковые субъединицы, часть которых токсична для насекомых. Кроме того, в кристаллах обнаружены небольшие количества нуклеиновых кислот, остатков сахаров, фосфора, так как ряд субъединиц – это инсектицидные гликопептиды, а также фосфолипиды, биологическая активность которых не изучена. Доказано, что в состав кристаллов входят и протеолитические ферменты.

Основным проявлением биологической активности параспоральных кристаллов *Bacillus thuringiensis* является высокоспецифическое действие входящих в их состав полипептидов на клетки насекомых. В составе кристаллов могут быть полипептиды, обладающие различной специфичностью по отношению к разным видам насекомых. В соответствии с этим токсины делят на четыре основных класса (табл. 33).

Таблица 33

**Классификация токсинов, синтезируемых разными штаммами  
*Bacillus thuringiensis***

Класс токсина	Молекулярная масса протоксина, кДа	Насекомое-мишень	Подвид и штамм <i>Bacillus thuringiensis</i>
CryI	130–140	Чешуекрылые	<i>berliner</i>
CryI	130–140		<i>kurstaki</i> КТО, HD-1
CryI	130–140		<i>entomocidus</i> 6.01
CryI	130–140		<i>aizawai</i> 7.29
CryI	135	Чешуекрылые, двукрылые	<i>aizawai</i> IC I
CryII	71		<i>kurstaki</i> HD-1
CryIII	66–73	Жесткокрылые	<i>tenebrionis</i>
CryIV	68	Двукрылые	<i>israelensis</i>

Существует мнение, что эндотоксины представляют собой протоксины, которые становятся опасными для насекомых под действием протеаз желудочного сока. Такими протеазами обладают не все насекомые, и с этим связана избирательность действия токсина.

Общей чертой всех  $\delta$ -эндотоксинов известных подвигов *Bacillus thuringiensis* является их способность поражать клетки средней кишки чувствительных насекомых. После растворения кристаллов и активирования протоксина под влиянием щелочного содержимого кишечника  $\delta$ -эндотоксины связываются с клетками кишечного эпителия.

Предложена гипотеза двухступенчатого действия  $\delta$ -эндотоксина: первый этап – связывание молекулы со специфическим рецептором на клеточной мембране, второй этап – образование пор диаметром 0,5–1,0 нм в мембране. Это приводит к дополнительному поступлению ионов в клетку, выходу из клетки молекул воды, но не макромолекул, следствием чего является коллоидно-осмотический лизис.

Процессы синтеза основных биологически активных компонентов кристаллов  $\delta$ -эндотоксинов часто регулируются генами, расположенными на плаزمидах, причем для полноценной регуляции такого синтеза необходимо несколько плазмид. Для плазмид *Bacillus thuringiensis* характерна многокопийность, при этом обнаруживаются как одинаковые плазмиды, так и плазмиды с генами  $\delta$ -эндотоксинов различной степени гомологии. Последовательности ДНК, идентичные генам  $\delta$ -эндотоксина, обнаружены и в составе хромосомы. Иногда происходит экспрессия и хромосомальных последовательностей протоксина.

$\beta$ -Экзотоксин образуется в период роста некоторых штаммов *Bacillus thuringiensis subsp.: thuringiensis, kenyae, morrisoni, tolworthi, darmstadiensis, wuhanensis*.

$\beta$ -Экзотоксин – термостабильный токсин, растворимый в воде. Он продуцируется во время вегетативного роста и выделяется в культуральную среду. Динамика его образования совпадает с динамикой роста бактериальной культуры. Большая часть штаммов *Bacillus thuringiensis* выделяет  $\beta$ -экзотоксин в среду в период максимального роста, а в начале спорообразования выделение его фактически заканчивается.

По действию на насекомых  $\beta$ -экзотоксин значительно отличается от  $\delta$ -эндотоксина. Для  $\beta$ -экзотоксина характерен более широкий спектр действия. Экзотоксин эффективен против насекомых и клещей – представителей разных групп: двукрылых, чешуекрылых, жесткокрылых, перепончатокрылых, прямокрылых, пухоедов.

$\beta$ -Экзотоксин – структурный аналог АТФ, конкурирующий с АТФ за связывающий участок на некоторых ферментах; он нарушает конечные

стадии биосинтеза РНК, действует как специфический ингибитор ДНК-зависимой РНК-полимеразы как у эукариот, так и у прокариот, но менее активно.

$\beta$ -Экзотоксин токсичен для насекомых, иногда – для теплокровных животных, но в значительно меньшей степени. Токсическое влияние  $\beta$ -экзотоксина на насекомых проявляется медленнее, чем действие  $\delta$ -эндотоксина.

Разрешены к применению следующие бактериальные препараты: энтобактерин, дендробациллин, БИП (бактериальный инсектицидный препарат), лепидоцид, битоксибациллин, бактоспеин, дипел, гомелин, бактокулицид, «Колорадо». В отличие от химических инсектицидов эти препараты обладают замедленным действием, но при определенных условиях могут вызывать эпизоотии у насекомых. Гибель насекомых может наступать через 24–72 ч, но вредитель прекращает питание в первые часы после поглощения препарата.

Технология получения энтомопатогенных препаратов различается разновидностью применяемых бактерий *Bacillus thuringiensis* и, следовательно, видом синтезируемых токсинов, условиями культивирования (состав среды, температура, значение рН, длительность), титром накапливаемых в культуральной жидкости спор и кристаллов, способом концентрирования культуральной жидкости и формой выпускаемого препарата (рис. 43).

**Технология получения дендробациллина.** На рис. 44 приведена технологическая схема получения дендробациллина.

Применяется продуцент *Bacillus thuringiensis saps. dendrolimus*. Для его наращивания методом глубинного культивирования может использоваться дрожжеполисахаридная среда, состоящая из 3% дрожжей и 1,5% кукурузной муки. Эта среда обеспечивает высокую концентрацию бактериальных клеток в культуральной жидкости (2–3 млрд./мл) и проста в приготовлении. Вместе с тем дрожжеполисахаридная среда имеет ряд существенных *недостатков*:

- сильное вспенивание из-за большого количества дрожжей;
- высокая вязкость, затрудняющая аэрацию культуры;
- большое содержание аминного азота на протяжении всего периода культивирования, что нарушает синхронность в развитии культуры;
- невысокий коэффициент использования компонентов питательной среды;
- значительная стоимость среды.

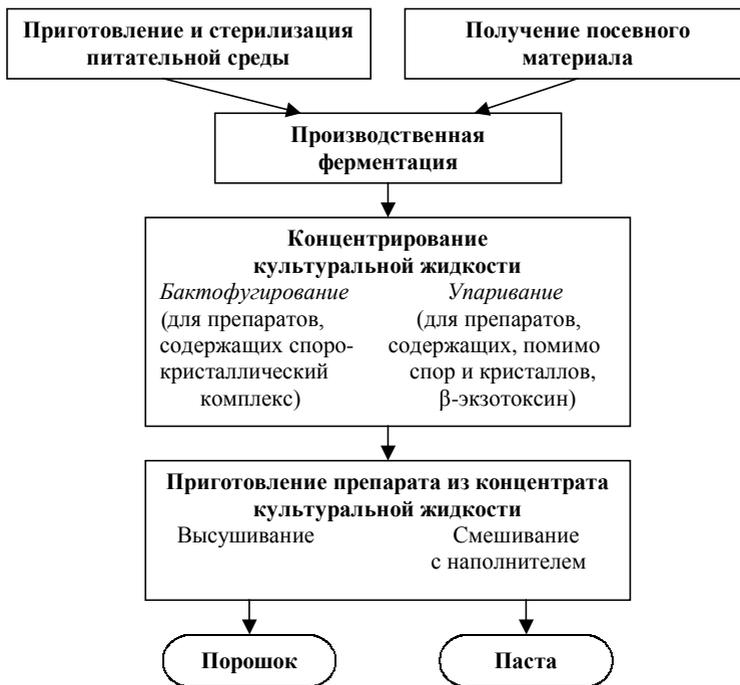


Рис. 43. Общая схема получения бактериальных энтомопатогенных препаратов

Разработаны полусинтетические среды, в которых снижено содержание дрожжей с 3 до 1%, а недостающий азот и макроэлементы компенсированы солями ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 0,15–0,20%;  $\text{CaCO}_3$  – 0,15%;  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  – 0,15–0,10%;  $\text{NaCl}$  – 0,2%;  $\text{MgSO}_4$  – 0,1%). Полусинтетические среды обеспечивают нормальный рост и синхронное развитие культур, время ферментации уменьшается на 4–7 ч. Стоимость полусинтетических сред ниже, чем дрожжеполисахаридной.

Для предотвращения развития посторонних микроорганизмов и фаговой инфекции, которой подвержены энтомопатогенные бактерии, процесс ферментации проводят с соблюдением условий асептики. Стерильность процесса обеспечивается путем стерилизации ферментатора, трубопроводов и датчиков приборов КИП и А; подачи в простерилизованный ферментатор стерильной питательной среды и чистой посевной

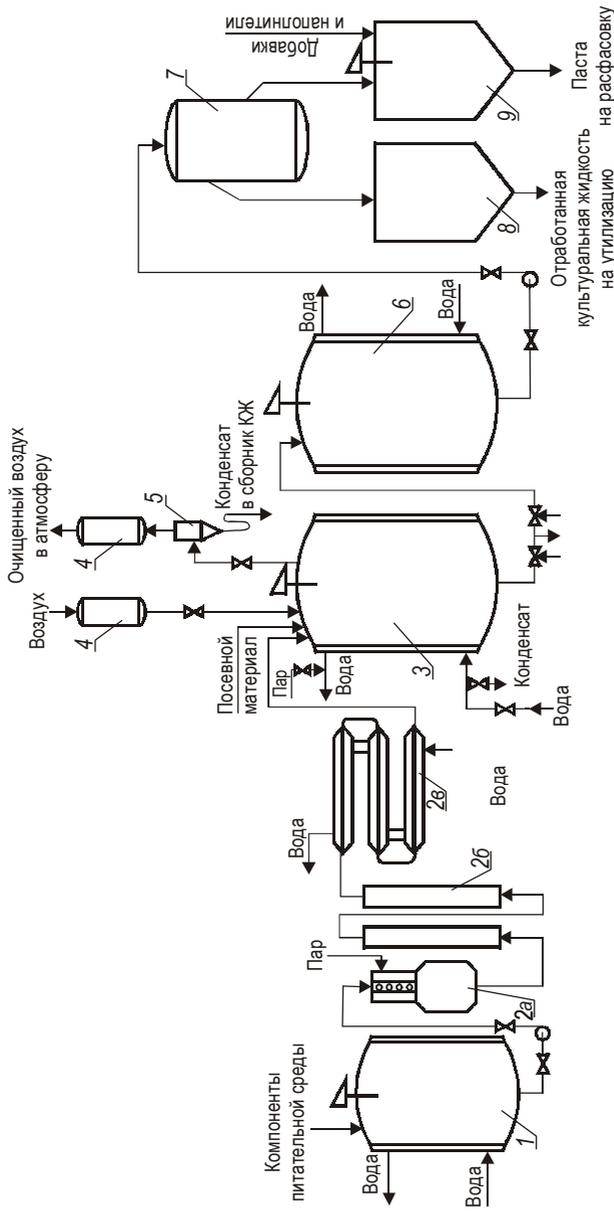


Рис. 44. Технологическая схема получения бактериальных энтомогенных препаратов:

1 – емкость для приготовления питательной среды; 2а – нагревательная колонка, 2б – выдерживатель, 2с – теплообменник (аппараты установки непрерывной стерилизации); 3 – ферментатор; 4 – фильтр для очистки воздуха; 5 – конденсатный сборник; 6 – бактофуга; 7 – бактофуга; 8 – бактофуга; 9 – бактофуга

культуры, стерильного воздуха для аэрирования растущей культуры; поддержания стерильной воздушной или паровой защиты уплотнения вала перемешивающего устройства, технологических трубопроводов и арматуры в течение всего процесса выращивания.

Посевная культура может находиться на стадии вегетативных клеток или спор. Потребности культуры на стадиях спор и вегетативных клеток различны: быстрорастущая вегетативная культура нуждается в большем количестве легкодоступных соединений и витаминов, чем споровая в начале роста. Питательная среда первоначально представляет слаборазложившиеся органические вещества, малодоступные для бактерий. Поэтому вегетативные клетки при попадании в ферментатор временно ослабляются. Это может быть причиной ненормального развития, автолиза клеток, снижения их устойчивости к бактериофагу. Подобного ослабления не испытывает споровая посевная культура. Бактерии *Bacillus thuringiensis* имеют высокую скорость роста, поэтому нет необходимости в большом количестве посевного материала (объем посевного материала составляет 0,001% объема питательной среды).

Исходную культуру *Bacillus thuringiensis* размножают в пробирках на скошенной агаризованной среде, смывают физиологическим раствором в качалочные колбы с жидкой средой производственного состава. Культивируют при значении рН 6,4 – 6,6 и температуре 28–30°C до стадии полного высыпания спор и этим материалом засевают ферментатор.

Процесс ферментации может быть периодическим или непрерывно-периодическим. Непрерывно-периодический способ заключается в следующем: проводят периодическую ферментацию с соблюдением оптимальных параметров до завершения развития микроорганизма, т. е. до рассыпания культуры на споры и кристаллы. При освобождении ферментатора в нем оставляют до 1% культуральной жидкости и ферментации в такой последовательности повторяют многократно. Основное требование – не допустить рассинхронизации в развитии культуры. Для этого оставшийся в аппарате от предыдущей ферментации посевной материал подвергают тепловой обработке: первые партии питательной среды имеют температуру 100°C. В результате вегетативные клетки и фаг инактивируются, а споровые клетки, выдержавшие тепловую обработку, служат посевным материалом для следующей операции. При таком способе ферментации время на одну операцию значительно сокращается. Вся операция проходит за 40 ч (вместо 60 ч по периодическому способу).

Поскольку к концу процесса ферментации значение pH культуральной среды составляет 8,0–8,5, необходимо провести подкисление по причине неустойчивости  $\delta$ -эндотоксина в данных условиях. Подкисляют культуральную жидкость 18%-ной серной кислотой до pH 6,0, расход раствора кислоты составляет 4 дм<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> культуральной жидкости.

Для обеспечения культуры кислородом используют стерильный воздух. Отработанный воздух также подвергается фильтрованию на выходе из ферментатора.

Для концентрирования культуральной жидкости, т. е. выделения спор и кристаллов, применяют бактофугирование.

Препараты выпускают в форме смачивающихся порошков или стабилизированных паст. Сухие препараты получают методом распылительного высушивания. Смачивающиеся порошки удобны при транспортировке и хранении. Однако при производстве значительны энергетические затраты на процессы сушки и помола. При приготовлении водных суспензий порошки долго набухают.

В настоящее время наиболее перспективной формой бактериальных инсектицидных препаратов считается стабилизированная паста. Ее производство в значительной степени позволяет упростить технологию. Паста более рентабельна в производстве ввиду того, что исключаются стадии сушки и помола, в ней наиболее полно сохраняется действующее начало, исходный материал не подвергается действию высокой температуры. Паста экологически более безопасна, так как в отличие от сухих порошков не загрязняет рабочую зону. Исключается пылевыведение в процессе приготовления рабочих суспензий. Для получения стабилизированной пасты в концентрат культуральной жидкости вводят следующие добавки: консерванты – хлорид натрия (10%) и хлороформ (0,5%); прилипатель – карбоксиметилцеллюлоза (10%); смачиватель – сульфенол (1,5%); наполнитель – каолин (до 10%); стабилизатор суспензии – сульфитно-спиртовая барда (5%); защитное вещество – меласса (1%). Стабилизированная паста представляет собой вязкую жидкость консистенции густой сметаны, кремового или светло-серого цвета, однородную по составу, не замерзающую при хранении, без резкого или неприятного запаха, не подвергающуюся гниению и брожению.

В последние годы все настойчивее рекомендуют применение препаратов в виде пены. В пенообразной форме улучшается растворимость инсектицидов, и поэтому снижается загрязнение почвы и воздуха, уменьшается доза бактериального препарата.

Развивается направление по использованию бактериальных препаратов в виде приманок. С этой целью в препараты добавляют различные привлекающие насекомых вещества.

**Грибные препараты.** Число энтомопатогенных грибов превышает 530 видов.

Важная особенность паразитических грибов – возможность проникновения их в полость тела вредителей непосредственно через кожные покровы с помощью выделяемых ферментов (в частности, хитиназы) или образование на поверхности кутикулы булавовидных утолщений типа аппрессориев (вздутий на концах коротких ростовых трубок, появляющихся при прорастании спор гриба). Через вздутия ростки мицелия проникают в полость тела. По этой причине грибы могут заражать насекомых в фазе куколки или имаго. На этой стадии насекомые не поражаются другими микроорганизмами.

Создание препаратов на основе энтомопатогенных грибов тормозится техническими *трудностями* их промышленного производства:

1) при глубинном культивировании получают препараты с низкой активностью, а при поверхностном сложно поддерживать асептику и требуются большие площади;

2) эффективность грибных энтомопатогенных препаратов существенно снижается при хранении.

Разрешен к применению препарат боверин, получаемый с помощью продуцента *Beauveria bassiana*. Этот энтомопатогенный гриб поражает около 60 видов насекомых: прямокрылых, жесткокрылых, чешуекрылых и перепончатокрылых (картофельная совка, колорадский жук, свекловичный долгоносик, яблонная моль и др.). Мицелий со спорами гриба сохраняется не только в организме больных насекомых, но и на растительных остатках, может распространяться устойчивыми к этому грибу насекомыми.

На основании штамма *Trichoderma lignorum* получают препарат триходермин, эффективный против фитопатогенных грибов, развивающихся на огурцах, томатах, капусте, винограде, баклажанах, арбузах. Грибы рода *Trichoderma* подавляют развитие фитопатогенов путем прямого паразитизма, конкуренции за субстрат, выделения ферментов, антибиотиков (глиотоксин, виридин, триходермин). Благодаря высокой биологической активности они быстро осваивают субстрат, активно разлагают органические соединения, принимают участие в процессах аммонификации и нитрификации, усилении мобилизации фосфора

и калия, обогащая почву подвижными питательными веществами. Биологически активные вещества, которые выделяются триходермой, стимулируют рост и развитие растений, повышают их стойкость к болезням.

В почве грибы рода *Trichoderma* развиваются на разных растительных остатках, богатых целлюлозой, на мицелии и плодовых телах фитопатогенов, паразитируют на склероциях возбудителей болезней сельскохозяйственных культур.

В зависимости от возбудителя болезни выращиваемой культуры триходермин можно использовать несколькими *способами*:

- предпосевная обработка семян за 1–3 дня до посева;
- внесение в почву за 5–6 дней либо непосредственно перед посевом или высадкой рассады на постоянное место;
- опрыскивание растений.

**Вирусные препараты.** Некоторые насекомые (совки, волнянки, огневки, коконопряды, пилильщики и др.) не восприимчивы к бактериальным энтомопатогенным препаратам. В этом случае, а также если попутно могут быть уничтожены полезные насекомые, целесообразно применение вирусных препаратов.

Известно около 700 энтомопатогенных вирусов, из них безвредными для теплокровных животных и человека являются вирусы ядерного полиэдроза (ВЯП) и гранулеза (ВГ), которые составляют семейство бакуловирусов. Представители различных подгрупп этого семейства патогенны для чешуекрылых, перепончатокрылых, двукрылых, сетчатокрылых, жесткокрылых, равнокрылых. Бакуловирусы использовали в Северной Америке, начиная с 30-х гг. прошлого столетия для борьбы с вредителями лесов. Первый вирусный препарат Вирион-Н для борьбы с хлопковыми совками был разрешен к применению в 1973 г. в США.

Вирион бакуловируса имеет цилиндрический нуклеокапсид, в котором заключена его ДНК. В ядре инфицированной клетки. Вирусные частицы объединяются, образуя компактную структуру, заключенную в кристаллический белковый матрикс. Капсулы вируса ядерного полиэдроза имеют форму многогранников (полиэдров) и сравнительно большие размеры (1–15 мкм), капсулы вируса гранулеза имеют овальную форму, меньшие размеры и содержат 1–2 вирусные частицы. После гибели инфицированных насекомых в среду выходят миллионы вирусных частиц. Попадая в кишечник других насекомых, они подвергаются действию щелочной среды, матрикс растворяется,

и высвободившиеся вирионы проникают в восприимчивые клетки. Гибель насекомых наступает через 2–18 сут в зависимости от дозы вируса, физиологического состояния насекомых, температуры и других факторов.

Перед разработкой и использованием вирусных препаратов необходима тщательная проверка на безвредность данного вируса для полезных насекомых, животных и человека, а также контроль остаточного содержания вирусов в растениях, животных, почве и воде.

Для промышленного производства вирусных препаратов необходимы эффективные штаммы. Для повышения эффективности инсектицидного действия природных штаммов вирусов применяются различные *методы*:

1) включение в вирусный геном гена мощного насекомоспецифичного токсина, который экспрессируется во время цикла вирусной инфекции;

2) повышение вирулентности в процессе пассажей вируса одного насекомого через организм другого, не свойственного ему хозяина.

Как и все другие вирусы, энтомопатогенные вирусы размножаются только в живых клетках хозяина. Это обстоятельство значительно усложняет возможность широкого использования их для борьбы с насекомыми. В производстве вирусных препаратов требуется массовое разведение насекомых как живой среды для культивирования вирусов либо размножение вирусов на культурах тканей насекомых. К настоящему времени получены стабильные перевиваемые клеточные линии многих важных вредителей сельского и лесного хозяйства, достигнуты определенные успехи в упрощении и удешевлении питательных сред для их культивирования, создаются системы для культивирования клеток насекомых. Проводятся исследования, направленные на увеличение накопления вирусной биомассы в зараженных клетках, на выделение вирусов и их очистку от примесей остатков тканей и микроорганизмов-контаминантов.

Разработан ряд вирусных препаратов для борьбы с насекомыми: вирин-ГЯП – против яблонной плодовой гнили, вирин-КШ – против кольчатого шелкопряда, вирин-ЭНШ – против непарного шелкопряда, вирин-КС – против капустной совки и др. Достоинствами вирусных препаратов являются высокая специфичность и отсутствие возникновения устойчивых популяций, поскольку бакуловирусы развиваются вместе с насекомыми и преодолевают их защитные механизмы. Эти препараты

устойчивы при хранении (сохраняют активность на протяжении 10–15 лет), при их применении возникают эпизоотии, поэтому нет необходимости обрабатывать большие территории, что делает препараты экономичными в использовании. Кроме сложности получения и высокой стоимости, производство вирусных препаратов ограничивается возможностью неконтролируемого распространения вирусов в окружающей среде.

В настоящее время в Республике Беларусь биопестициды производятся небольшими партиями в областных биологических лабораториях и на Республиканской станции биометода. Промышленное производство биологических средств защиты растений в нашей стране отсутствует.

#### **14.4.5. Проблемы в применении энтомопатогенных препаратов**

1. Препараты чаще всего распыляют, при этом их часто смешивают с аттрактантами для привлечения насекомых и уменьшения расхода препаратов. Однако для насекомых, обитающих в тканях растений или на корнях, вероятность поглощения препарата невысока.

2. Токсины, входящие в состав препарата, как правило, действуют на насекомое в определенной стадии его развития. Обработка должна производиться именно в это время, поскольку параспоральные кристаллы чувствительны к солнечному свету и быстро разрушаются.

3. Стоимость бактериальных инсектицидов в 1,5–3 раза выше, чем химических.

4. Если бактериальные препараты применяли в условиях малой освещенности (например, в зернохранилищах), через несколько поколений появлялись устойчивые к токсину насекомые.

Перспективным считается создание растений, устойчивых к насекомым-вредителям, с помощью генно-инженерных методов. Это может быть достигнуто путем экспрессии генов инсектицидных протеинов, продуцируемых подвидами *Bacillus thuringiensis*, в самих растениях. Задача биотехнологов состоит в создании таких трансгенных растений, которые бы синтезировали активные формы бактериальных инсектицидов в количестве, достаточном для защиты растений от вредителей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
2. Илялетдинов А. Н., Алиева Р. М. Микробиология и технология очистки промышленных сточных вод. – Алма-Ата: Гылым, 1990. – 224 с.
3. Волова Т. Г. Экологическая биотехнология. – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1997. – 144 с.
4. Яковлев С. В., Воронов Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002. – 703 с.
5. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. – М.: Мир, 2004. – 480 с.
6. Сметанин В. И. Защита окружающей среды от отходов производства и потребления. – М.: Колос, 2000. – 230 с.
7. Глик Б., Пастернак Дж. Молекулярная биотехнология. Принципы и применение. – М.: Мир, 2002. – 589 с.
8. Щербачков Л. А. Перспективы использования биохимических методов газоочистки в решении проблемы уменьшения вредных выбросов в атмосферу. Обзорная информация. – Минск: ЛОРАНЖ-2, 2001. – 32 с.
9. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2003 год). – Минск, 2004. – 128 с.
10. Сборник санитарных правил и норм по питьевому водоснабжению. – 4-е изд., перераб. и доп. – Минск, 2003. – 208 с.
11. Юрин В. М. Основы ксенобиологии. – Минск: Новое знание, 2002. – 266 с.
12. Горбачев Е. А. Проектирование очистных сооружений водопровода из поверхностных источников. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. – 240 с.
13. Рябчиков Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 300 с.
14. Очистка природных вод на биосорбере в условиях низких температур / В. Н. Швецов, С. В. Яковлев, И. А. Нечаев, И. В. Татонов, Н. С. Антипова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 5. – С. 12–15.
15. Глубокая очистка природных и сточных вод на биосорберах / В. Н. Швецов, С. В. Яковлев, К. М. Морозова, И. А. Нечаев, В. И. Миркис // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. – № 11. – С. 6–9.

16. Биосорбция и биорегенерация активного угля в технологии глубокой очистки сточных вод / Н. А. Клименко, А. М. Когановский // Химия и технология воды. – 1997. – Т. 19, № 2. – С. 165–181.
17. Анаэробная биологическая очистка сточных вод / С. В. Калужный, Д. А. Данилович, А. Н. Ножевникова // Итоги науки и техники. Сер. биотехнол. – 1991. – № 29. – 187 с.
18. Холькин Ю. И. Технология гидролизных производств. – М.: Лесная пром-сть, 1989. – 496 с.
19. Голубовская Э. К. Биологические основы очистки воды. – М.: Высш. шк., 1978. – 268 с.
20. Романенко В. Д. Основы гидроэкологии. – Киев: Генеза, 2004. – 662 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА СТОЧНЫХ ВОД И МЕТОДОВ ИХ ОЧИСТКИ .....	6
1.1. Характеристика сточных вод .....	6
1.2. Методы очистки сточных вод .....	18
1.3. Биологическая очистка сточных вод в естественных условиях .....	27
Глава 2. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ .....	30
2.1. Очистка сточных вод в аэротенках .....	30
2.2. Очистка сточных вод в биофильтрах .....	67
Глава 3. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В АНАЭРОБНЫХ УСЛОВИЯХ .....	75
3.1. Характеристика метанового брожения .....	75
3.2. Факторы, влияющие на процесс анаэробной очистки стоков .....	80
3.3. Кинетические закономерности функционирования анаэробных биореакторов .....	83
3.4. Конструкции современных анаэробных биореакторов .....	86
3.5. Технологические особенности анаэробных методов очистки сточных вод .....	97
Глава 4. ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД .....	103
4.1. Доочистка сточных вод от взвешенных веществ и органических загрязнений .....	103
4.2. Методы глубокой очистки сточных вод от биогенных элементов .....	104
4.3. Обеззараживание сточных вод .....	119
4.4. насыщение сточных вод кислородом .....	121

Глава 5. ОБРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД	122
5.1. Состав и свойства осадков сточных вод	122
5.2. Обработка осадков	124
5.3. Утилизация осадков сточных вод	137
5.4. Депонирование осадков сточных вод	139
Глава 6. ВОДОПОДГОТОВКА	141
6.1. Требования к качеству питьевой воды	141
6.2. Технология водоподготовки	141
6.3. Биосорбционная очистка природных и сточных вод	155
Глава 7. ОСНОВЫ BIOTEХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ	159
7.1. Обеспечение асептики производства	159
7.2. Очистка отработанного воздуха, выводимого из ферментаторов	168
7.3. Ферментация	168
7.4. Концентрирование, выделение и сушка продуктов микробного синтеза	173
Глава 8. BIOTEХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРЕБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ	180
8.1. Переработка отходов целлюлозного производства	180
8.2. Переработка отходов молочной промышленности	189
8.3. Переработка отходов спиртового и ацетонобутилового производства	196
8.4. Биотехнологическое использование отходов производства сахара и крахмала	205
Глава 9. BIOTEХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРЕБОТКА РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ	207
9.1. Характеристика и методы переработки растительного сырья	207
9.2. Гидролитическая и биотехнологическая переработка растительного сырья	208
9.3. Твердофазная ферментация растительного сырья	218

Глава 10. УТИЛИЗАЦИЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ .....	229
10.1. Нормы накопления, состав и свойства твердых бытовых отходов .....	229
10.2. Обезвреживание и переработка твердых бытовых отходов	232
Глава 11. БИОДЕСТРУКЦИЯ КСЕНОБИОТИКОВ И ПОЛЛЮТАНТОВ. КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ .....	243
11.1. Биодegradация ксенобиотиков в окружающей среде .....	243
11.2. Ликвидация нефтяных загрязнений воды и почвы .....	249
11.3. Контроль загрязнения окружающей среды с использованием биологических объектов .....	252
Глава 12. ПРИМЕНЕНИЕ БИОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ОТ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ....	255
12.1. Характеристика и методы очистки газовоздушных выбросов .....	255
12.2. Биологическая очистка газовоздушных выбросов .....	257
12.3. Аппаратурное оформление процесса биологической очистки газовоздушных выбросов .....	260
Глава 13. ПРОИЗВОДСТВО И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГАЗА ....	267
13.1. Технологические аспекты производства биогаза .....	267
13.2. Подготовка и использование биогаза .....	278
Глава 14. БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛЬТЕРНАТИВЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ .....	283
14.1. Применение пробиотиков .....	283
14.2. Получение биоразлагаемых полимерных материалов ....	284
14.3. Бактериальные удобрения .....	285
14.4. Биологическая защита растений .....	291
ЛИТЕРАТУРА .....	307

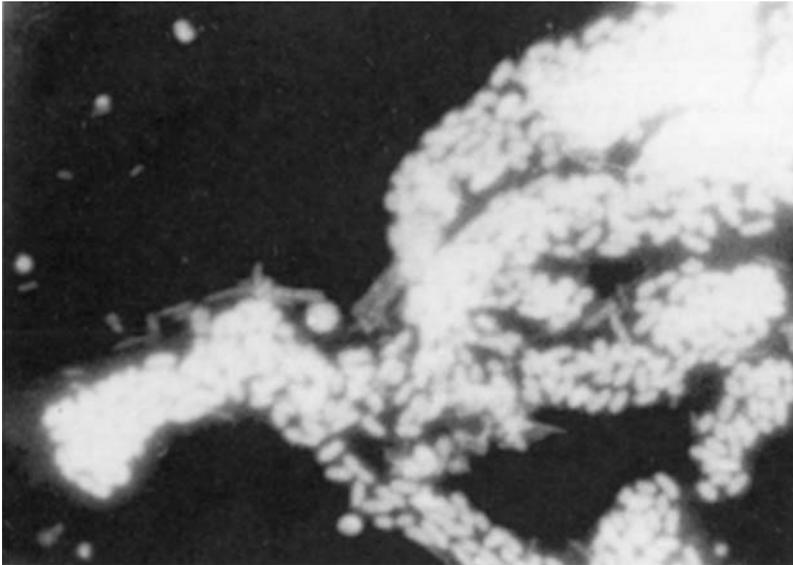


Рис. I. Палочковидные бактерии активного ила в компактных флокулах

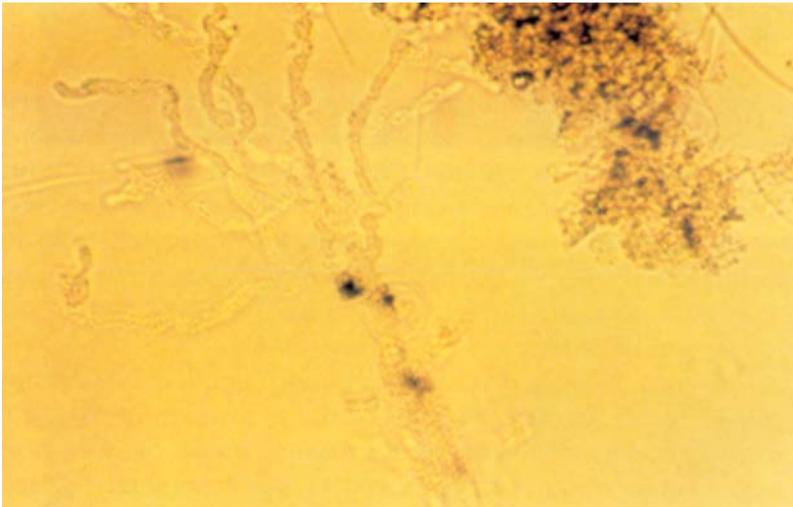


Рис. II. Сферическая форма бактерий в хлопьях активного ила

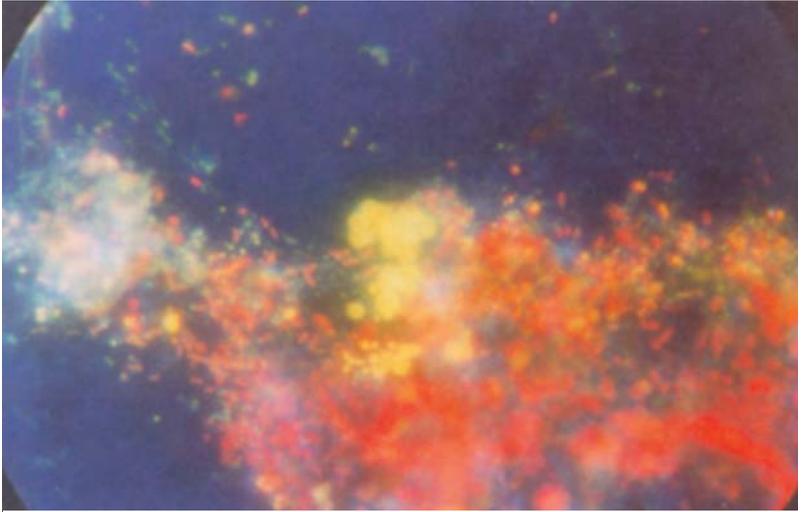


Рис. III. *Zoogloea ramigera*

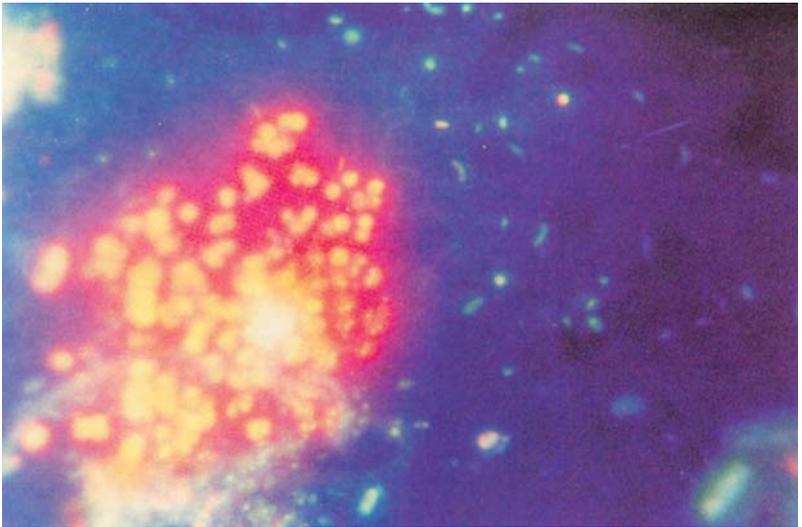


Рис. IV. Компактные хлопья активного ила

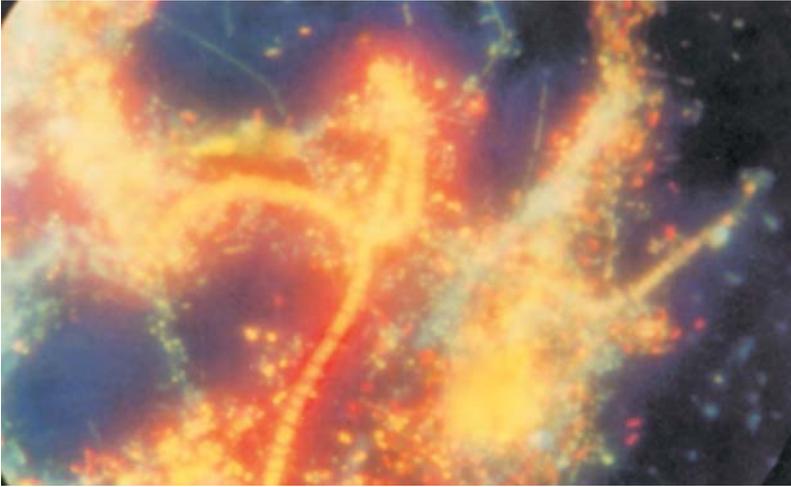


Рис. V. Дефлокуляция хлопьев ила при нитчатом вспухании

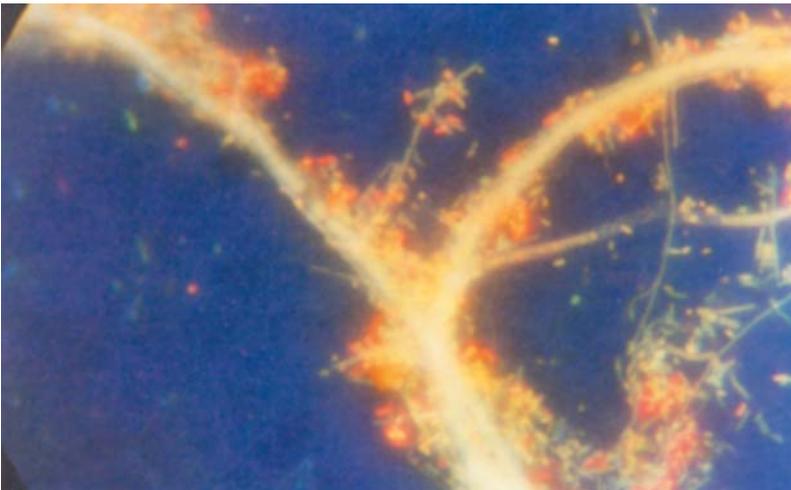


Рис. VI. Нитчатые бактерии рода *Sphaerotilus*

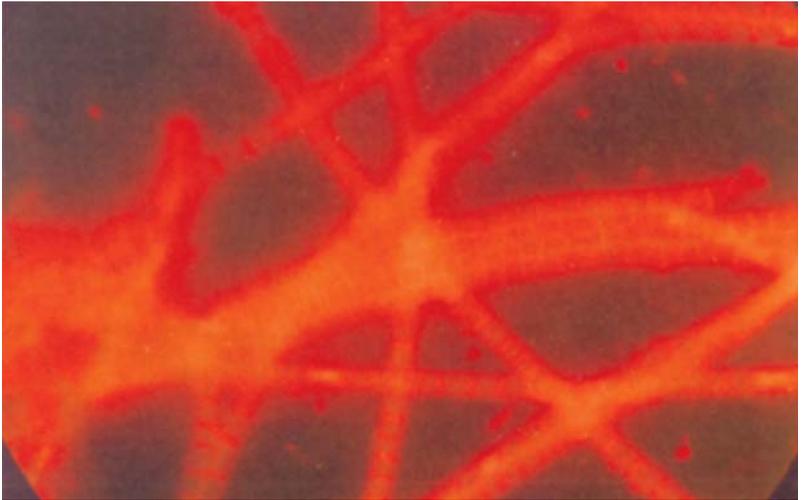


Рис. VII. Трихомное строение бесцветных серобактерий

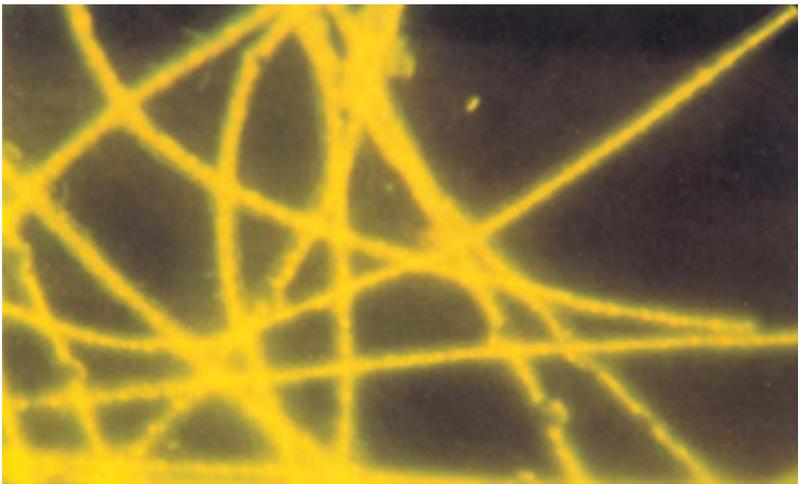


Рис. VIII. Гранулы серы в клетках бесцветных серобактерий

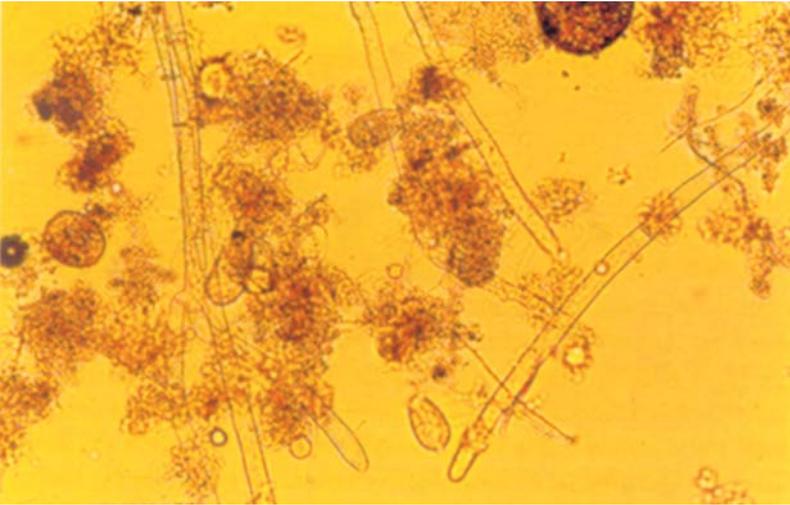


Рис. IX. Сапрофитные грибы активного ила

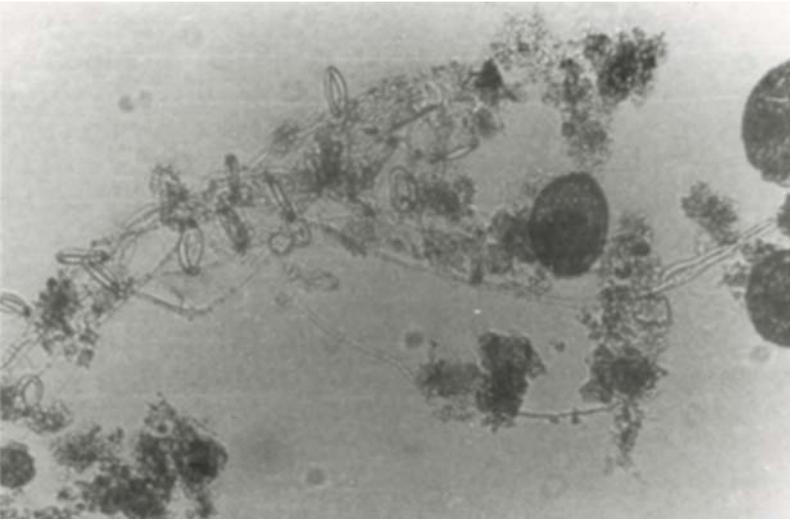


Рис. X. Хищные грибы с ловчими петлями



Рис. XI. Изменение формы тела голых амёб при движении с помощью псевдоподий

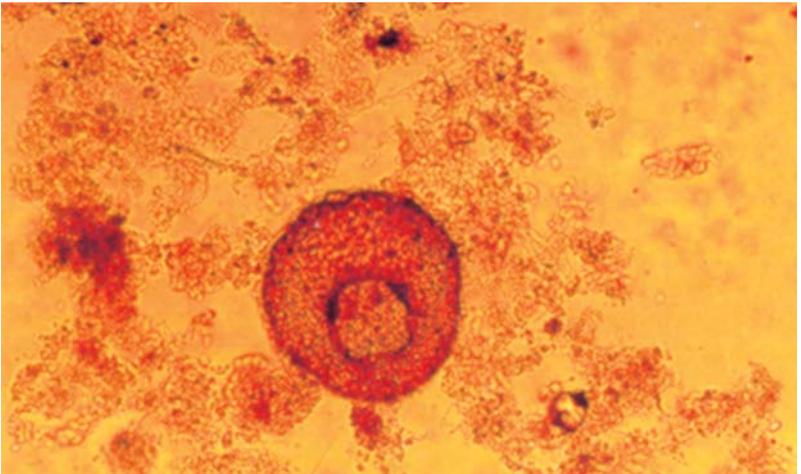


Рис. XII. Раковинная амёба рода *Centropyxis*

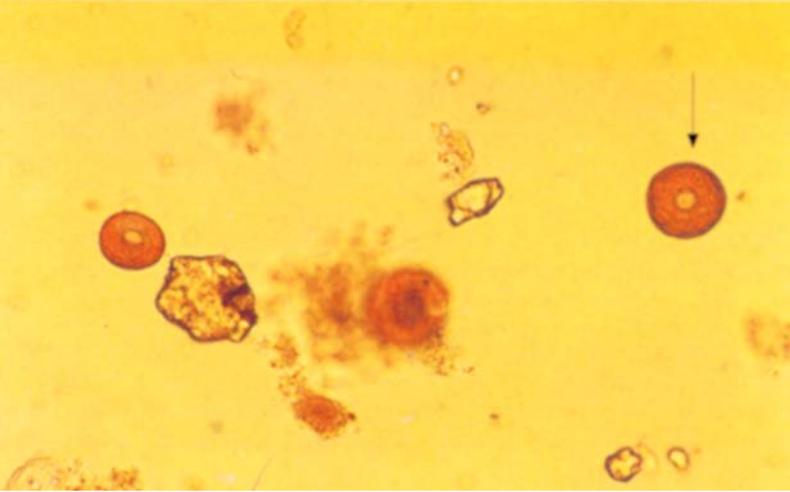


Рис. XIII. Раковинная амеба *Arcella vulgaris*

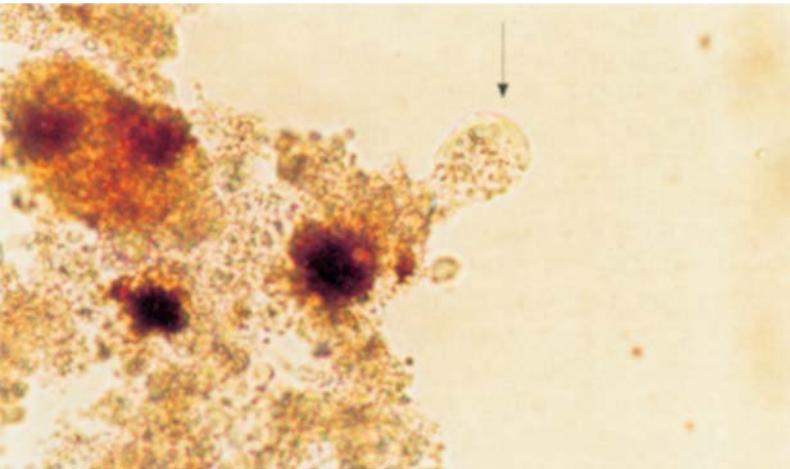


Рис. XIV. Раковинная амеба *Pamphagus hyalinum*

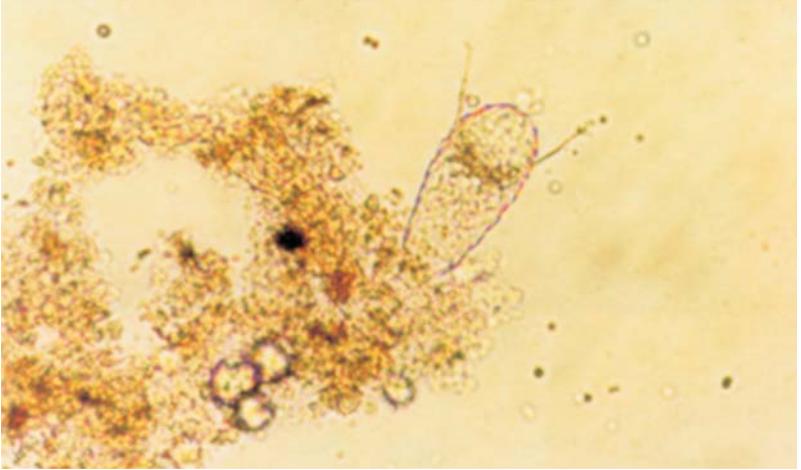


Рис. XV. Раковинная амeba рода *Euglypha*

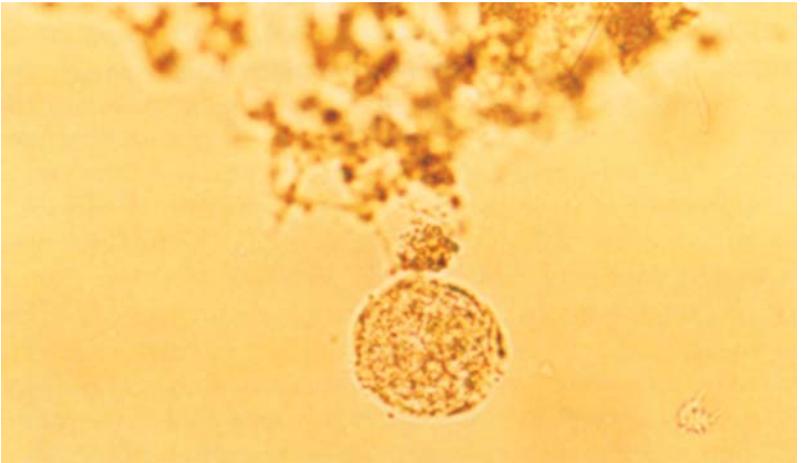


Рис. XVI. Циста инфузории шаровидной формы с плотной оболочкой

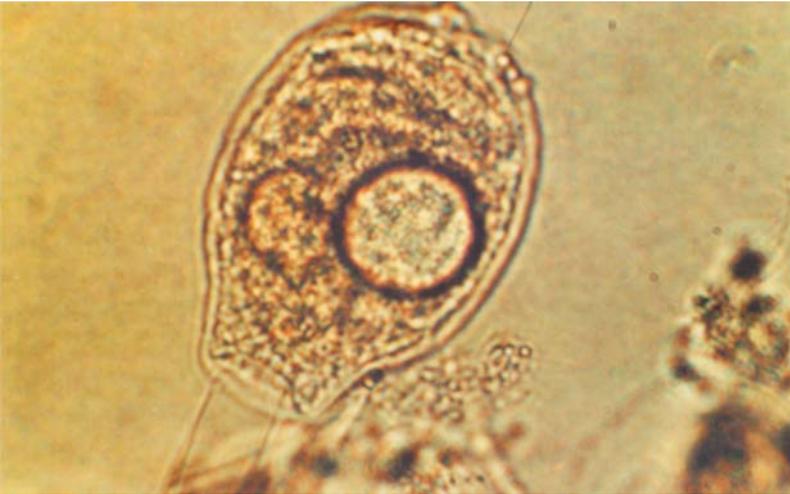


Рис. XVII. Морфологические изменения у перитрих при увеличении нагрузки на активный ил

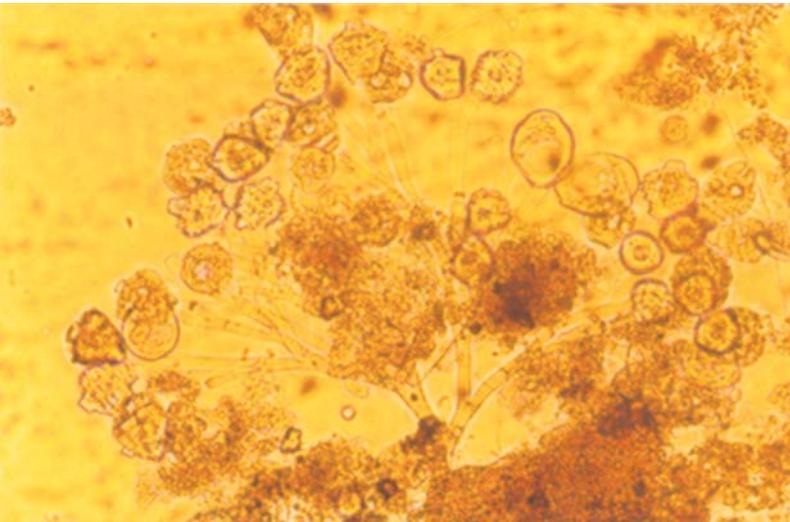


Рис. XVIII. Морфологические изменения у прикрепленных инфузорий при воздействии токсичных сточных вод



Рис. XIX. Брюхоресничная инфузория активного ила

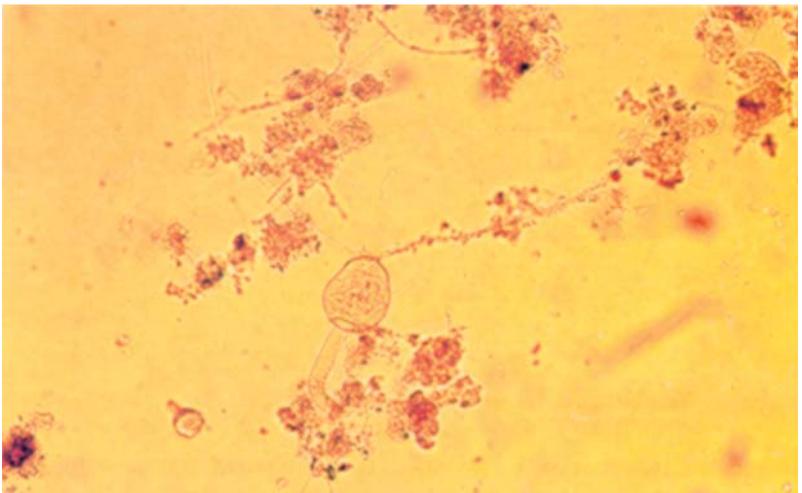


Рис. XX. Одиночная форма прикрепленных инфузорий



Рис. XXI. Колониальные формы кругоресничных инфузорий



Рис. XXII. Колониальные формы прикрепленных инфузорий

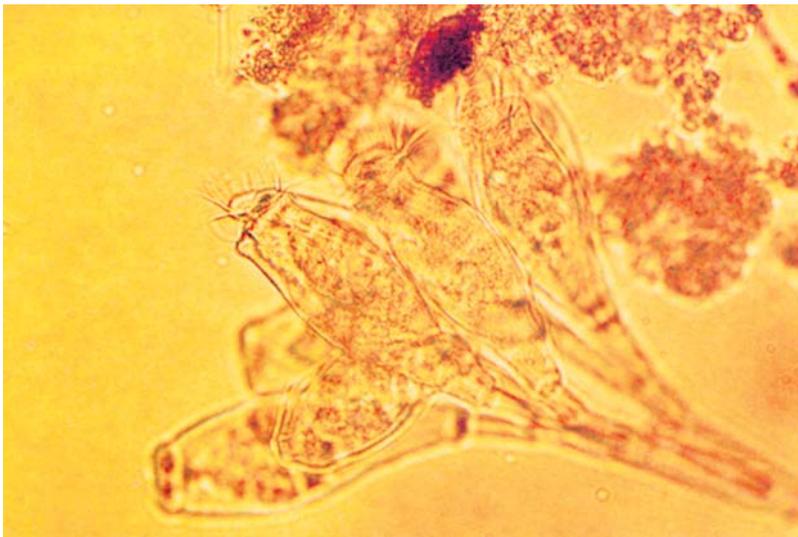


Рис. XXIII. Выдвинутые из перистоста диски у зоидов рода *Opercularia*

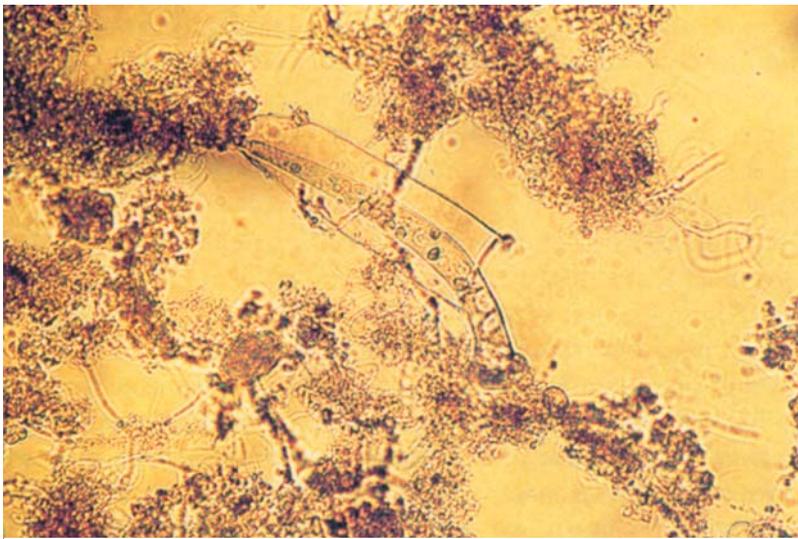


Рис. XXIV. Инфузория рода *Cothurnia*

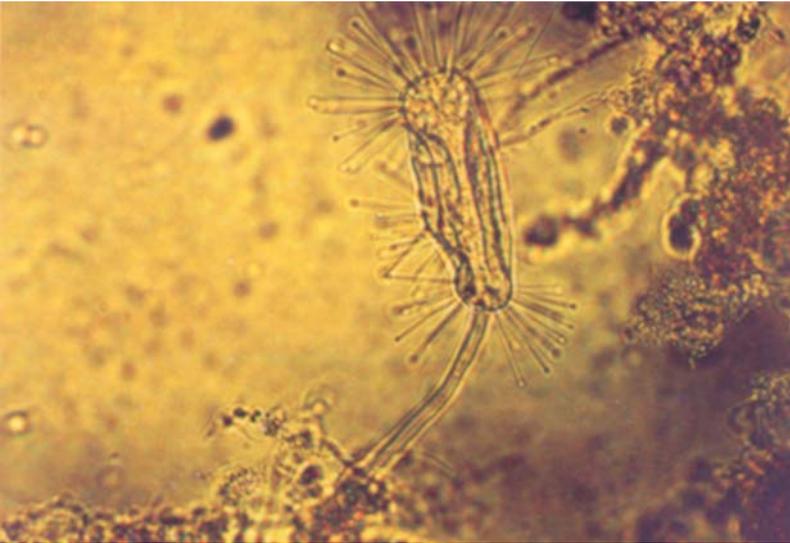


Рис. XXV. Сосущая инфузория, прикрепленная стебельком к хлопку активного ила

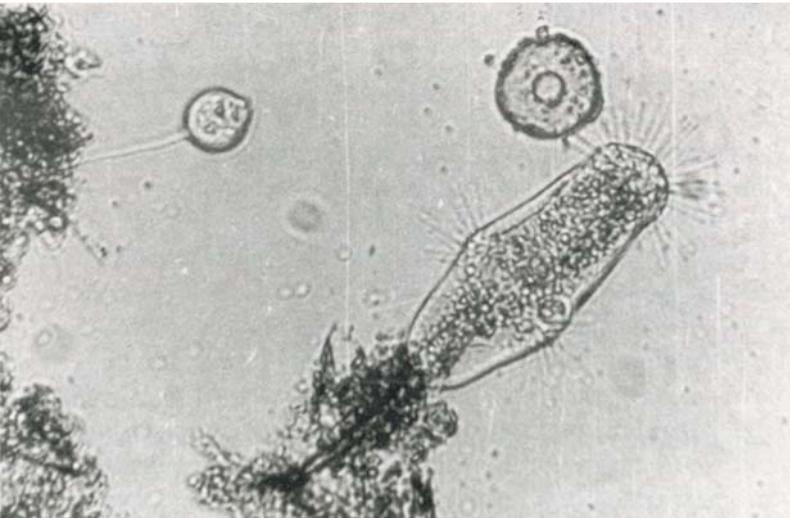


Рис. XXVI. Сосущая инфузория засасывает содержимое раковинной амёбы

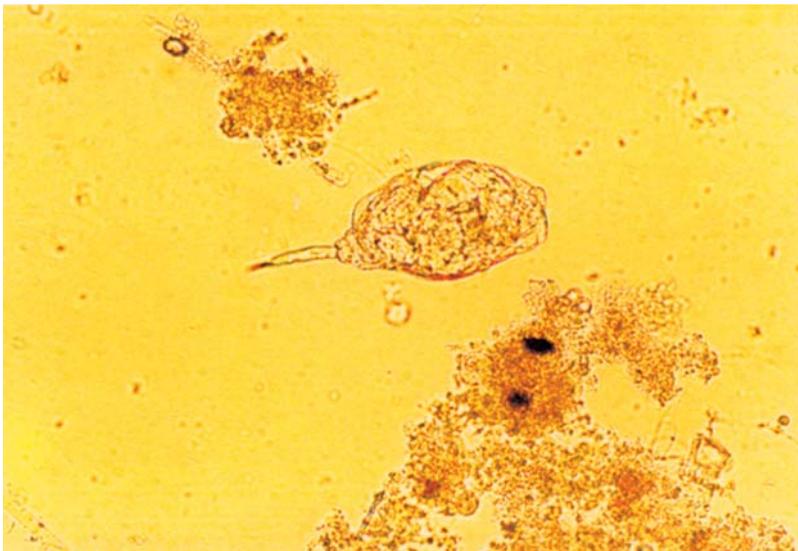


Рис. XXVII. Панцирная коловратка активного ила

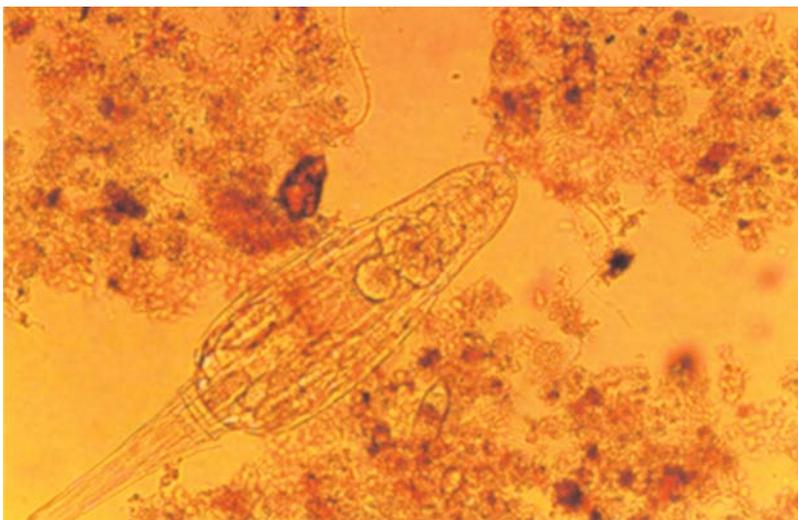


Рис. XXVIII. Беспанцирная коловратка активного ила

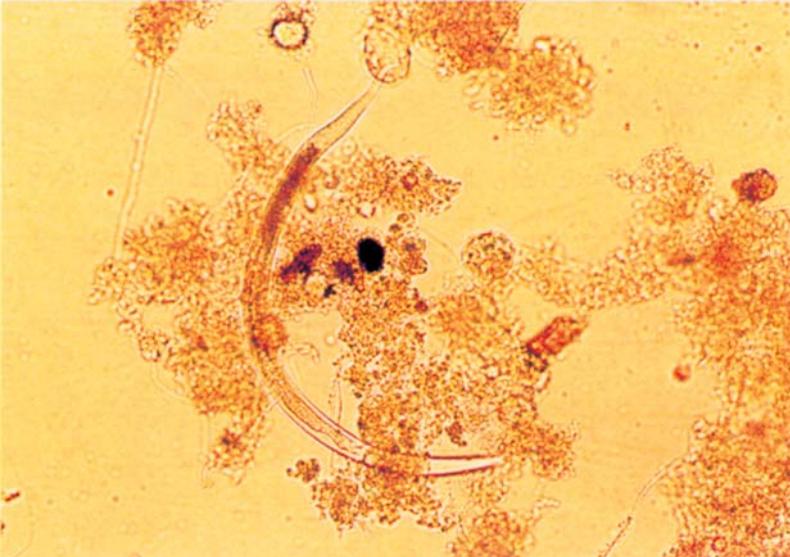


Рис. XXIX. Круглый червь активного ила (*Nematoda*)

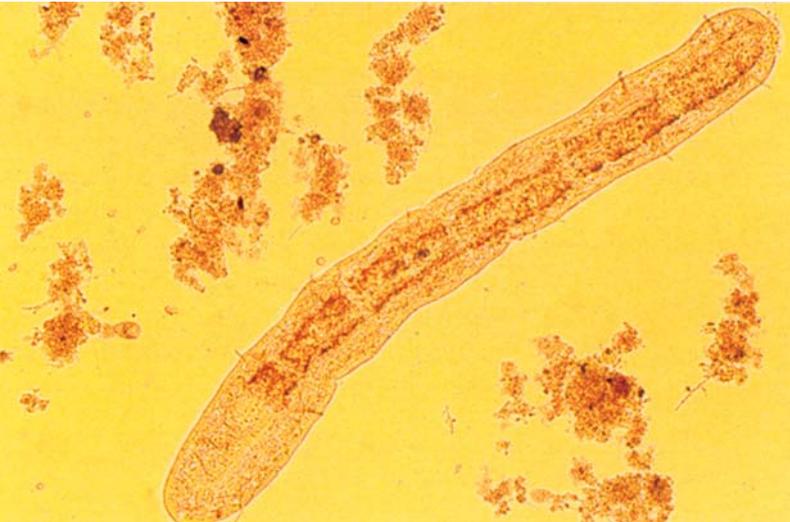


Рис. XXX. Малоцетинковый червь



Рис. XXXI. Тихоходка (*Tardigrada*)

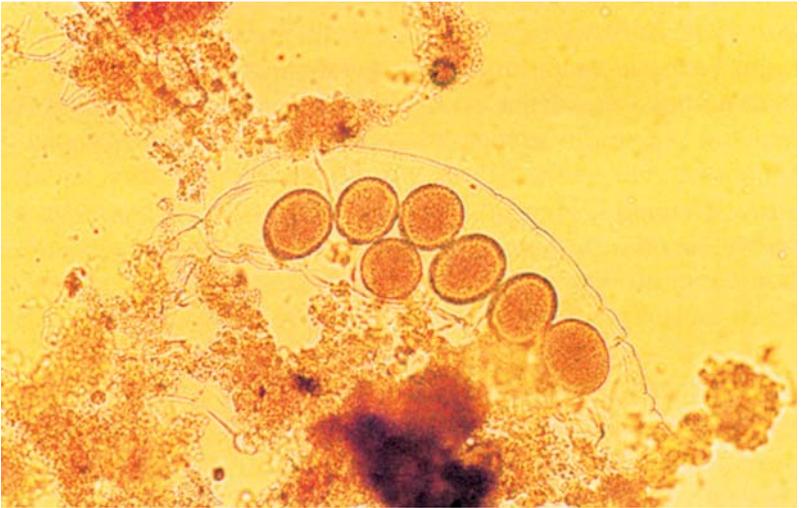


Рис. XXXII. Яйца тихоходки, покрытые ее сброшенной кутикулой