

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД. КОНЦЕПЦИЯ 10 ШАГОВ

О. В. Харькина

ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Волгоград. Панорама
2015

УДК 628.35
ББК 38.761.204
Х232

Рецензенты:

Мойжес Станислав Игоревич, кандидат технических наук;
Щеголькова Наталия Михайловна, доктор биологических наук

Харькина, О. В.
Х232 Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод / О. В. Харьковина. Волгоград : Панорама, 2015. — 433, [7] с. — (Очистка сточных вод. Концепция 10 шагов).

ISBN 978-5-9666-0172-0

В книге даны теоретические знания, которые необходимы для проектирования, расчетов и эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод, в том числе при реализации технологий удаления азота и фосфора. Цель этой книги — провести читателя от базового понимания механизмов биологических процессов, заложенных в сооружениях очистки сточных вод, до разработки оптимальных проектных решений для каждой конкретной ситуации, реализации грамотных эксплуатационных мероприятий, в том числе в аварийных и нештатных ситуациях.

Книга предназначена для специалистов в области проектирования и эксплуатации канализационных очистных сооружений, руководящих работников и технических специалистов городского коммунального хозяйства, работников научно-исследовательских организаций. Книга будет полезна для преподавателей, студентов, аспирантов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-экологическим специальностям.

УДК 628.35
ББК 38.761.204

© Харьковина О. В., 2015

Оглавление

Предисловие автора	6
Используемые обозначения	8
Глава 1. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ.....	16
1.1. Взаимодействие микроорганизмов активного ила и органических соединений сточных вод	16
1.2. Требования к системам биологической очистки сточных вод	25
1.2.1. Окислительная мощность аэротенков.....	26
1.2.2. Седиментационные характеристики активного ила	28
Процессы вспухания и пенообразования.	
Причины и мероприятия по устранению	34
1.2.3. Количество образуемого осадка	40
1.2.4. Аэрационные системы аэротенков	49
Классификация аэрационных систем	49
Мелкопузырчатая аэрация.....	54
1.2.5. Основные факторы влияния на качество очищенной воды	62
1.3. Мероприятия по устранению нарушений технологического режима аэротенков.....	72
Глава 2. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА (ПРОЦЕССЫ НИТРИ-ДЕНИТРИФИКАЦИИ).....	75
2.1. Фракции азота в городских сточных водах	75
2.2. Удаление соединений азота из сточных вод. Процессы биологической очистки	79
2.2.1. Нитрификация. Теория процесса.....	80
2.2.2. Нитрификация. Математическое описание процесса.....	83
2.2.3. Нитрификация. Факторы, влияющие на эффективность процесса	90
2.2.4. Денитрификация. Теория процесса	105
2.2.5. Денитрификация. Математическое описание процесса	112
2.2.6. Денитрификация. Факторы, влияющие на эффективность процесса	124
2.3. Схемы реализации процессов нитри-денитрификации	129
2.4. Эксплуатация очистных сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации. Проблемы и решения	138

Глава 3. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА	164
3.1. Фракции фосфора в городских сточных водах	164
3.2. Удаление соединений фосфора из сточных вод	168
3.2.1. Химическое удаление фосфора. Теория процесса	169
3.2.2. Химическое удаление фосфора. Математическое описание процесса	174
3.2.3. Биологическое удаление фосфора. Теория процесса	181
3.2.4. Биологическое удаление фосфора. Математическое описание процесса	190
3.2.5. Биологическое удаление фосфора. Факторы, влияющие на эффективность процессов	193
3.3. Схемы реализации процессов биологического удаления фосфора и нитри-денитрификации	209
3.4. Эксплуатация сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации и удаления фосфора. Проблемы и решения	229
Глава 4. РАСЧЕТЫ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ. ОПЫТ РЕШЕНИЯ. ПРИМЕРЫ	269
4.1. Контроль работы сооружений биологической очистки сточных вод	269
4.1.1. Динамика качественных и количественных характеристик поступающих сточных вод	269
4.1.2. Ключевые параметры инструментального контроля сооружений биологической очистки сточных вод от биогенных элементов	273
4.1.3. Примеры мониторинга и автоматического технологического управления сооружениями удаления азота и фосфора	282
4.1.4. Расчеты, используемые при технологическом контроле сооружений биологической очистки	289
4.2. Нештатные и аварийные ситуации. Примеры возможных проблем и пути их решения	305
4.3. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод. Динамическая модель OxiD®	322
Глава 5. ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД	345
5.1. Технологический запуск сооружений биологической очистки сточных вод	345
5.1.1. Подготовка к технологическому запуску сооружений	345

5.1.2. Процедура технологического запуска сооружений	360
5.1.3. Технологический контроль сооружений в период их запуска	364
5.1.4. Проблемы, возникающие при запуске очистных сооружений, и их решения.....	365
5.2. Технологический регламент — необходимый инструмент эффективной эксплуатации сооружений.....	376
5.3. Мероприятия по повышению технологической и энергетической эффективности канализационных очистных сооружений.....	389
5.3.1. Технологический аудит сооружений очистки сточных вод.....	389
5.3.2. Примеры отчета о проведении Технологического аудита сооружений очистки сточных вод.....	393
5.3.3. Разработка мероприятий по повышению энергетической эффективности канализационных очистных сооружений	404
Заключение	417
Список литературы.....	422

Глава 1. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

1.1. Взаимодействие микроорганизмов активного ила и органических соединений сточных вод

Биологическая очистка сточных вод представляет собой технологические процессы очистки сточных вод, основанные на способности биологических организмов разлагать загрязняющие вещества [1].

При реализации биологических процессов очистки сточных вод в аэротенках биологические организмы, участвующие в разложении загрязнений, которые поступают со сточными водами, пребывают во взвешенном состоянии и представляют собой флоксы (хлопки) (рис. 1.1) — зооглейные скопления микроорганизмов, простейших, колониальных, червей, водных грибов и дрожжей. Согласно [1] ил, содержащий микроорганизмы, которые сорбируют и разлагают загрязняющие вещества в сточных водах, называется активным илом.

Хлопки активного ила имеют размеры от 10 мкм до 1 мм (1000 мкм) и достаточно легко отделяются от очищенной воды отстаиванием, флотацией и фильтрацией.

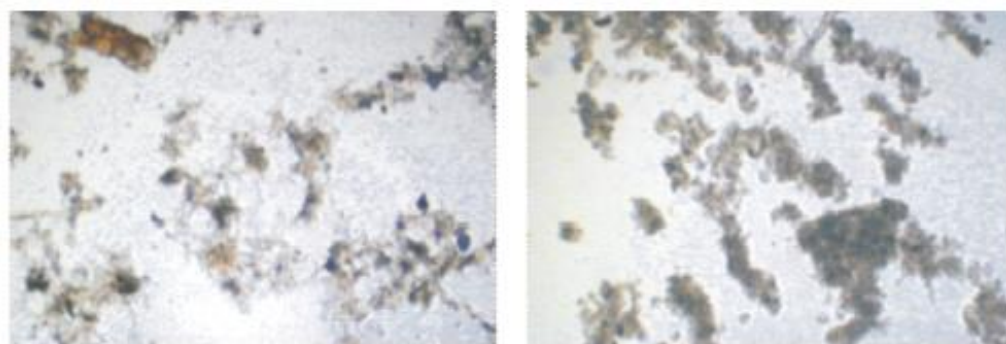
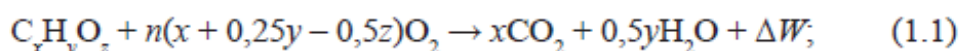


Рис. 1.1. Флоксы (хлопки) активного ила

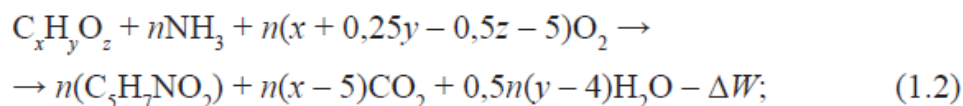
Доминирующая роль в процессе биологической очистки сточных вод принадлежит различным группам бактерий — одноклеточным подвижным микроорганизмам с прочной внешней мембраной. Размер клеток бактерий варьирует от 0,5 до 2 мкм. Типичными представителями биоценоза активного ила являются бактерии родов *Pseudomonas*, *Bacterium*, *Micrococcus*, *Sarcina*, *Bacillus*, *Pseudobacterium*, *Azotobacter*, *Zoogloea ramirera* и др. Микрофлора активного ила обладает способностью образовывать специальный глей (слизь), в результате чего клетки бактерий находятся в иммобилизованном состоянии внутри хлопка активного ила. В общем понимании иммобилизация бактерий (*immobilization of bacteria*; лат. *immobilis* — неподвижный) — это обездвиживание подвижных бактерий. Иммобилизация клеток может быть вызвана естественным процессом или искусственными методами — химическими или физическими. В случае образования хлопков активного ила речь идет о естественном процессе. Примером искусственного метода иммобилизации микроорганизмов, участвующих в процессах очистки сточных вод, является иммобилизация клеток на специальной инертной загрузке. В результате большинство микроорганизмов, развивающихся в аэротенке, находится во флоках активного ила и только незначительная часть — в свободноплавающем состоянии. Бактерии сорбируются на внешней и внутренней поверхностях хлопка активного ила, при этом хлопок среднего размера может содержать до нескольких миллионов бактерий.

При реализации на очистных сооружениях процессов биологической очистки сточных вод от органических загрязнений в аэробных условиях (т. е. в присутствии растворенного кислорода) происходит аэробное взаимодействие микроорганизмов активного ила и поступающих углеродсодержащих соединений. Ниже описаны процессы взаимодействия микроорганизмов с органическими веществами в аэробных условиях, протекающие при реализации в сооружениях аэробной биологической очистки сточных вод:

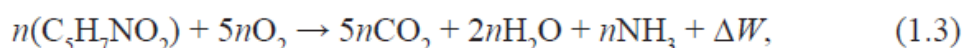
Окисление органического вещества:



синтез биомассы:



окисление клеточной биомассы:



где $C_xH_yO_z$ — молекулярная (истинная) формула рассматриваемого органического вещества (x — количество атомов С; y — количество атомов Н; z — количество атомов О); $C_5H_7NO_2$ — обобщенная формула активного ила, предложенная S. R. Hoover и N. Porges [2].

Городские сточные воды, поступающие на очистные сооружения, содержат сотни видов органических соединений, и определить каждое вещество отдельно не представляется возможным. Поэтому для количественной суммарной оценки органических соединений сточных вод определяют такие параметры, как ХПК (химическое потребление кислорода) и БПК (биологическое потребление кислорода). ХПК представляет собой химическую окисляемость массы органических соединений сточных вод, и при определении данного параметра используют химический окислитель. Окисляемость же — это величина, количественно характеризующая содержание в воде веществ, окисляемых при определенных условиях сильным химическим окислителем. В зависимости от используемого окислителя различают перманганатную окисляемость, бихроматную окисляемость, иодатную и цериевую окисляемости. В практике водоочистки и водоподготовки для природных малозагрязненных вод определяют перманганатную окисляемость, а для сточных вод — как правило, бихроматную окисляемость.

БПК представляет собой количество растворенного кислорода, потребляемого за установленное время и в определенных условиях при биохимическом окислении содержащихся в воде органических веществ [1]. В этом случае роль окислительного агента выполняют аэробные бактерии. При эксплуатации очистных сооружений в ходе

оперативного контроля используют показатель BPK_5 — биологическое потребление кислорода микроорганизмами за 5 суток. При анализе определяется количество кислорода, потребленного за установленное время (при определении BPK_5 — за 5 суток) без доступа света при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на окисление загрязняющих веществ, содержащихся в единице объема пробы. Далее вычисляется разница между концентрациями растворенного кислорода в пробе воды непосредственно после отбора и после инкубации пробы. За 5 суток большая часть органических соединений окисляется находящимися в пробе микроорганизмами, однако полной картины тест, проводимый в течение 5 суток, не дает. За данный период времени не все биологически окисляемые органические соединения в рассматриваемой пробе воды успевают окислиться.

Требования к качеству очищенной воды в Российской Федерации предъявляют по $BPK_{\text{полн}}$ (BPK полное). $BPK_{\text{полн}}$ представляет собой количество кислорода, потребленного микроорганизмами на окисление всего количества биоразлагаемых органических соединений, содержащихся в рассматриваемой пробе. Для определения периода, за который происходит полное окисление биоразлагаемых веществ, параллельно ставят несколько проб, в каждой из которых определяют количество потребленного кислорода через 5, 15, 20, 25 суток и т. д. Как только количество потребленного кислорода перестает изменяться, этот период времени назначают как период времени определения $BPK_{\text{полн}}$. Как правило, полное окисление достигается в течение 20 суток, в этом случае $BPK_{\text{полн}}$ принимают как BPK_{20} .

ХПК — это кислородный эквивалент общего количества органических веществ в сточной воде.

БПК — кислородный эквивалент биологически окисляемых органических веществ.

ХПК характеризует общее количество окисляемых органических соединений — как биологически разлагаемых, так и биологически неразлагаемых. Биологически разлагаемые вещества, количественно характеризуемые параметром BPK , подразделяются по скорости окисления на трудно окисляемые (как правило, высокомолекулярные

соединения, например полиароматические углеводороды, тимол, гидрохинон, неионогенные ПАВ и др.) и легко окисляемые (в большинстве своем низкомолекулярные, такие как глюкоза, мальтоза, низшие алифатические спирты и др.) органические соединения.

Суммарное количество органических соединений, как окисляемых (химически и биологически), так и неокисляемых, содержащихся в сточных водах, характеризуется параметром «общий органический углерод» (Total Organic Carbon — TOC).

На рис. 1.2 представлен классификатор органических соединений сточных вод по их способности к биологическому окислению.

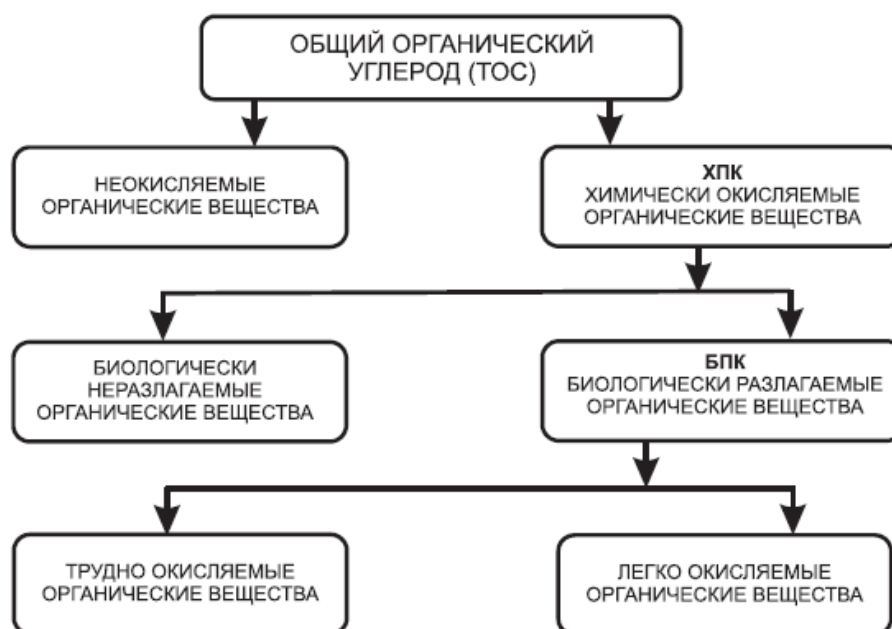


Рис. 1.2. Классификатор органических веществ, содержащихся в сточных водах

После смешения сточных вод и активного ила в аэротенках тонкодисперсные, коллоидные частицы и высокомолекулярные растворенные соединения адсорбируются на поверхностях хлопка ила. Взаимодействие микроорганизмов активного ила и органических загрязнений, поступающих в аэротенки со сточными водами, носит ферментативный характер (рис. 1.3). В основе данного про-

процесса лежит способность микроорганизмов вырабатывать специфические белковые соединения — пищеварительные ферменты (энзимы). Ферменты, которые являются катализаторами биохимического окисления, действуют на различные виды органических соединений избирательно. Ферменты могут быть как внутренние, находящиеся внутри клетки, так и внешние. Внешние ферменты выпускаются клеткой за пределы мембраны, и далее они идентифицируют присутствующие загрязнения и «настраивают» соответствующий механизм биохимического процесса. Пищеварительные внешние ферменты контактируют с высокомолекулярными веществами, находящимися в водной среде, и осуществляют гидролитическое расщепление сложных молекул органических веществ до более простых, небольшой размер молекул которых позволяет им проходить через оболочку клетки. Находящиеся в среде низкомолекулярные вещества проходят сквозь мембрану клетки без взаимодействия с внешними ферментами, а вступают в реакции с внутренними ферментами непосредственно внутри клетки. В клетке происходит окисление низкомолекулярных веществ с образованием продуктов рассмотренных выше реакций (1.1)—(1.3).

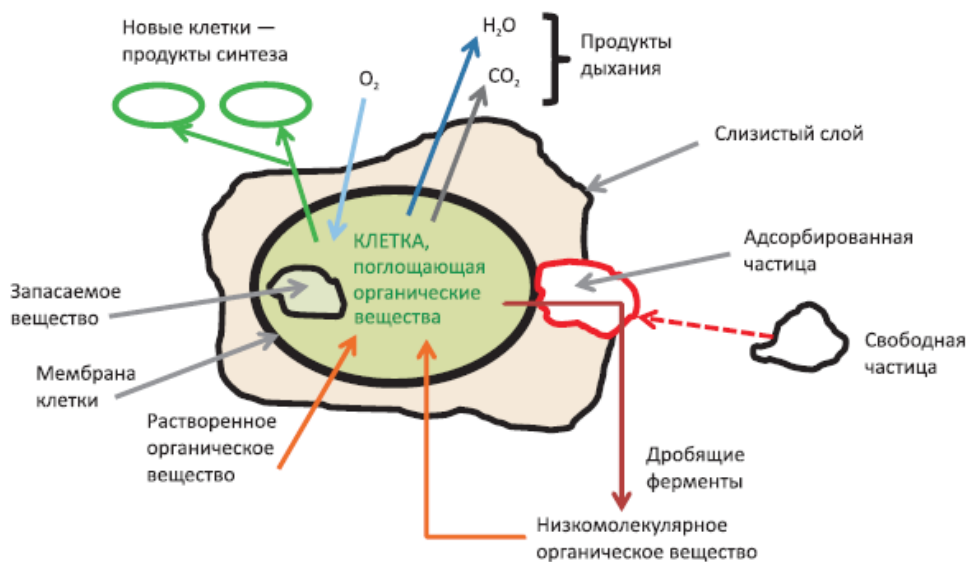


Рис. 1.3. Схема метаболизма в клетке бактерии

Возможность микроорганизмов самоорганизовываться в хлопки при рассмотренном выше механизме взаимодействия бактерий и органических соединений, содержащихся в сточных водах, существенно повышает скорости и эффективность биохимических процессов. Следует обратить внимание, что для аэробных бактерий, находящихся внутри хлопка ила, существенной проблемой может являться недостаток кислорода. Минимальный порог концентрации растворенного кислорода, обеспечивающий рабочий режим жизнедеятельности бактерий, участвующих в процессах окисления органических соединений, составляет 0,6 мг/л. Для обеспечения указанного кислородного режима для бактерий, находящихся внутри хлопка активного ила, концентрация растворенного кислорода в иловой смеси в аэротенках должна составлять минимум 1,0...1,3 мг/л (для реализации процесса аэробного окисления органических соединений). При концентрации растворенного кислорода в иловой смеси аэротенка ниже 1,0...1,3 мг/л внутри хлопка создаются анаэробные условия, и там культивируются факультативно анаэробные бактерии, что отрицательно сказывается на эффективности процессов биохимического окисления органических соединений [3].

Во вторичных отстойниках бактерии, входящие в состав активного ила, находятся в условиях отсутствия кислорода и питания в течение 2...3 ч, то есть в условиях кислородного и питательного голодания. Затем эти микроорганизмы поступают в аэротенк с потоком возвратного активного ила, где смешиваются с поступающей на биологическую очистку сточной водой. В начальный момент контакта возвратного активного ила и сточной воды в аэротенках бактерии получают «шоковую нагрузку» по питательным веществам и попадают в иной, по сравнению со вторичными отстойниками, кислородный режим. Для адаптации к новым условиям микроорганизмам необходим определенный временной промежуток. Фаза приспособления микроорганизмов к новым условиям называется лаг-фаза развития бактерий (рис. 1.4). Скорость роста микроорганизмов в течение этой фазы близка к нулю. В клетках бактерий в этот период идут в основном процессы, связанные с приспособлением их к конкретным условиям жизнедеятельности. Во время лаг-фазы деления

клеток не происходит, отмечаются лишь процессы, которые подготавливают клетку к размножению. Лаг-фаза переходит в начальную фазу размножения, когда клетки начинают делиться с постепенно возрастающей скоростью.

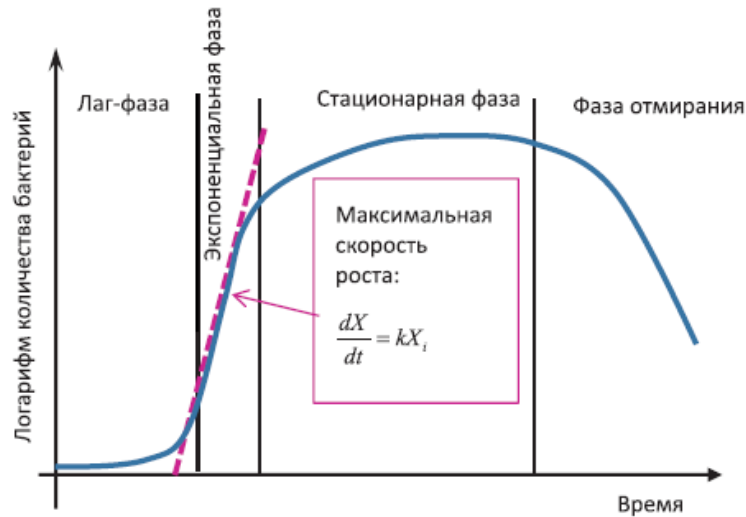


Рис. 1.4. Распределение скоростей роста бактерий по фазам жизнедеятельности

После адаптации к новым условиям скорость роста бактерий начинает резко увеличиваться, достигая своего максимального значения к началу следующей фазы — экспоненциальной (фаза экспоненциального роста). Фаза получила такое название ввиду того, что в данный период времени скорость роста микроорганизмов M_H , мг/л·сут, пропорциональна текущей концентрации микроорганизмов, а текущая концентрация микроорганизмов $X_{H,i}$ является экспоненциальной зависимостью от времени ведения процесса t :

$$M_H = \frac{dX_H}{dt} = k_H X_{H,i}, \quad (1.4)$$

где $X_{H,i}$ — текущая концентрация микроорганизмов, мг/л;
 k_H — константа скорости роста бактерий в экспоненциальной фазе, 1/сут.

Из уравнения (1.4) получаем удельную скорость роста микроорганизмов μ_H , 1/сут:

$$\mu_H = \frac{M_H}{X_{H,i}} = k_H. \quad (1.5)$$

Решая уравнение (1.4), получаем, что текущая концентрация микроорганизмов в течение экспоненциальной фазы описывается следующей зависимостью:

$$X_{H,i} = X_{H,0} e^{k_H t}. \quad (1.6)$$

В период фазы экспоненциального роста все питательные вещества в системе присутствуют в избытке, и развитие микроорганизмов не тормозится продуктами обмена веществ.

Экспоненциальная фаза характеризуется постоянной максимальной скоростью деления клеток и скоростью роста. Для различных видов бактерий эти величины могут варьировать в значительных пределах. Например, бактерии *E.coli* при 37 °С делятся примерно каждые 20 мин, а бактерии родов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* (нитрифицирующие микроорганизмы) — 5...10 ч. Клетки бактерий в фазу экспоненциального роста наиболее жизнеспособны и обладают высокой биохимической активностью.

По окончании экспоненциальной фазы количество питательных веществ уменьшается и является уже лимитирующим фактором роста бактерий; кроме того, происходит накопление в среде продуктов обмена веществ, что также является фактором, тормозящим рост клеток. Рост микроорганизмов начинает замедляться и через некоторый промежуток времени прекращается. Микроорганизмы переходят в стационарную фазу, в которой устанавливается равновесие между количеством приросших и отмерших клеток ($k_H X_{H,i} = b_H X_{H,i}$, где b_H — коэффициент отмирания микроорганизмов), и общее количество биомассы не меняется:

$$\frac{dX_H}{dt} = 0.$$

В связи с тем, что скорость роста бактерий определяется концентрацией субстрата, то еще до полного использования питатель-

ных веществ начинает снижаться и скорость роста, поэтому переход от экспоненциальной фазы к стационарной происходит постепенно (см. рис. 1.4).

В этот период в клетках или в среде культивирования нередко накапливаются продукты вторичного метаболизма. В стационарной фазе роста поведение клеток в бактериальной популяции может регулировать явление, которое получило название апоптоз. Суть его сводится к тому, что при исчерпании питательного субстрата голодающая популяция бактерий разделяется на две субпопуляции, одна из которых погибает и подвергается автолизу, клетки же другой популяции, используя продукты автолиза как субстрат, продолжают размножаться.

Стационарная фаза далее переходит в фазу отмирания, когда количество отмирающих микроорганизмов превышает количество приросших:

$$k_H X_{H,i} < b_H X_{H,i}, \quad (1.7)$$

и мы получаем скорость прироста биомассы со знаком «минус»:

$$M_H \frac{dX_H}{dt} = k_H X_{H,i} - b_H X_{H,i} < 0. \quad (1.8)$$

В фазе отмирания скорость отмирания бактерий существенно варьирует в зависимости от условий среды и физиологических особенностей микроорганизмов.

Обеспечивая различные технологические параметры эксплуатации сооружений биологической очистки, можно влиять на скорость роста микроорганизмов и, как следствие, на скорости процессов удаления различных типов загрязнений из сточных вод.

1.2. Требования к системам биологической очистки сточных вод

Идеально работающая и эксплуатируемая система биологической очистки сточных вод должна соответствовать следующим требованиям:

1. Система должна отличаться высокой производительностью, и технологический режим работы аэротенков должен обеспечивать максимально возможные скорости биохимических процессов, реализованных в сооружении (для сооружений, запроектированных только на окисление органических соединений, — скорости аэробного окисления органических соединений).

2. Активный ил должен обладать хорошими седиментационными характеристиками.

3. Количество образуемого осадка должно быть минимальным.

4. Затраты на аэрацию, обеспечивающую требуемый кислородный режим для реализованных в биореакторах биохимических процессов и поддержание активного ила во взвешенном состоянии, должны быть минимальными.

5. Система должна обеспечивать высокое качество очищенной воды по рассматриваемым загрязнениям (для сооружений биологической очистки, запроектированных только на окисление органических соединений, — по органическим соединениям и взвешенным веществам).

В практике эксплуатации очистных сооружений достаточно сложно добиться максимального достижения всех указанных выше требований. Эффективное технологическое управление включает в себя различные компромиссы, позволяющие достигать общего оптимального результата или наиболее значимых требований на настоящий момент времени.

1.2.1. Окислительная мощность аэротенков

Требование 1 — работа сооружений с наивысшей производительностью — возможно выполнить при эксплуатации аэротенков в режиме максимальной окислительной мощности.

Окислительная мощность аэротенков OC_{at} , кг/(м³·сут) — это количество загрязнений, снимаемых в единицу времени массой активного ила, находящейся в единице объема сооружений.

Окислительная мощность аэротенков рассчитывается по формуле

$$OC_{at} = \frac{24X_i(1-Z)\rho_s}{1000}, \quad (1.9)$$

где ρ_s — удельная скорость окисления органических соединений, $\text{мг}/(\text{г}\cdot\text{ч}) = \text{г}/(\text{кг}\cdot\text{ч})$;

X_i — доза активного ила в аэротенках, $\text{г}/\text{л} = \text{кг}/\text{м}^3$;

Z — зольность активного ила, доли единицы.

Из формулы (1.9) следует, что окислительная мощность аэротенка пропорциональна удельной скорости окисления органических соединений ρ_s , которая, в свою очередь, прямо пропорциональна удельной скорости роста микроорганизмов μ_H :

$$\rho_s = -\frac{1}{Y_H} \mu_H, \quad (1.10)$$

где Y_H — коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах окисления органических соединений.

Формулы (1.9) и (1.10) показывают, что производительность аэротенков напрямую зависит от скорости роста микроорганизмов. Как можно видеть из рис. 1.4, для использования высоконагружаемых режимов работы аэротенка и поддержания максимальных скоростей удаления органических соединений мы должны обеспечить максимально возможные скорости роста бактерий. Однако, как видно из того же рисунка, это ведет к увеличению количества приростшей биомассы, то есть избыточного активного ила.

Для достижения высокопроизводительного режима работы система должна эксплуатироваться в условиях, обеспечивающих функционирование микроорганизмов аэротенков в фазе экспоненциального роста, однако следует учитывать, что количество образующегося избыточного активного ила в этом случае будет максимальным. Оптимальный вариант — поддерживать бактерии в стационарной фазе, что позволит обеспечивать высокую эффективность очистки сточных вод, при этом количество избыточного активного ила будет существенно ниже по сравнению с эксплуатацией аэротенков в высоконагружаемых режимах.

1.2.2. Седиментационные характеристики активного ила

Седиментационные свойства активного ила определяются такими характеристиками, как иловый индекс и скорость осаждения активного ила. Согласно [1] иловый индекс представляет собой объем активного ила, содержащий один грамм сухого вещества после тридцатиминутного отстаивания. При определении илового индекса I пробу иловой смеси взбалтывают, наливают 1 дм³ в цилиндр и отстаивают в течение 30 мин, затем измеряют объем, занимаемый активным илом.

Иловый индекс I , см³/г, рассчитывают по формуле

$$I = \frac{V_i \cdot 10}{X}, \quad (1.11)$$

где V_i — объем активного ила в цилиндре после 30-минутного отстаивания (цилиндр 1-1000-2 по ГОСТ 1770-74), см³;

X — массовая концентрация активного ила, г/см³.

Рабочий диапазон значений илового индекса активного ила аэротенков, реализующих процессы окисления органических соединений, составляет 80...120 см³/г. Если значение илового индекса активного ила данных сооружений более 140 см³/г, рассматривают вопрос о развитии процессов вспухания активного ила.

Говоря о влиянии на эффективность процессов илоразделения во вторичных отстойниках состояния активного ила, необходимо отметить, что в этом случае важным параметром является также скорость осаждения (седиментации) активного ила.

В общем понимании *седиментация* (осаждение) представляет собой процесс отделения взвешенных частиц с удельным весом больше, чем у жидкости, от самой жидкости, основанный на действии силы гравитации, результирующее действие которой определяется разницей в плотностях частиц и жидкости. Данный процесс заложен в основу работы таких сооружений очистки сточных вод, как песколовки, первичные и вторичные отстойники.

Скорость осаждения активного ила определяется свойствами его хлопков, такими как размер, плотность, устойчивость к деформирующим воздействиям и т. д. С точки зрения технологии илоразде-

ления во вторичных отстойниках оптимальным является получение крупных и плотных хлопков, которые быстро оседают, при этом надосадочная жидкость обладает низкой мутностью. В процессе очистки сточных вод хлопья активного ила могут измельчаться механически (в ходе аэрации, мешалками в анаэробных и аноксидных зонах аэротенка и при перекачивании насосами), что крайне негативно сказывается на седиментационных характеристиках активного ила и, как следствие, ведет к ухудшению процессов илоразделения и осветления во вторичных отстойниках.

Скорость осаждения (скорость седиментации) активного ила в покое оценивают по скорости перемещения видимой границы раздела «вода — ил». Для лабораторного определения скоростей осаждения ила рекомендуется использовать стандартные цилиндры вместимостью 1000 см³ (ГОСТ 1770-74).

Иловая смесь для проведения тестов на осаждаемость отбирается на выходе из аэробной зоны аэротенков (объем пробы не менее 1,5 л) непосредственно перед проведением эксперимента. В лаборатории перед началом тестирования иловая смесь перемешивается, отбирается проба на определение дозы активного ила, и затем иловая смесь (объемом 1000 см³) заливается в стандартный цилиндр. Высота столба ила составляет в начальный момент времени H_0 , мм (для стандартного лабораторного цилиндра это 310 мм). Далее включается секундомер, и изменение положения границы раздела «вода — ил» фиксируется визуально в течение первых 2 минут через каждые 5 секунд, затем с 2-й по 10-ю минуту после начала опыта через каждую минуту, затем через 15, 20 и 30 минут после начала эксперимента (рис. 1.5) значением высоты столба осветленной жидкости L_r , мм. На рис. 1.5 показана граница раздела «вода — ил» через 30 минут отстаивания иловой смеси в покое. Значение высоты столба осветленной жидкости через 30 минут отстаивания составляет L_{30} , мм, значение высоты столба ила через 30 минут — H_{30} , мм.

Данные измерений (t_i — текущее время от начала эксперимента, с, и расстояние текущей границы раздела «вода — ил» от начального положения H_0 , мм) заносятся в таблицу «Определение скорости осаждения активного ила» (табл. 1.1).

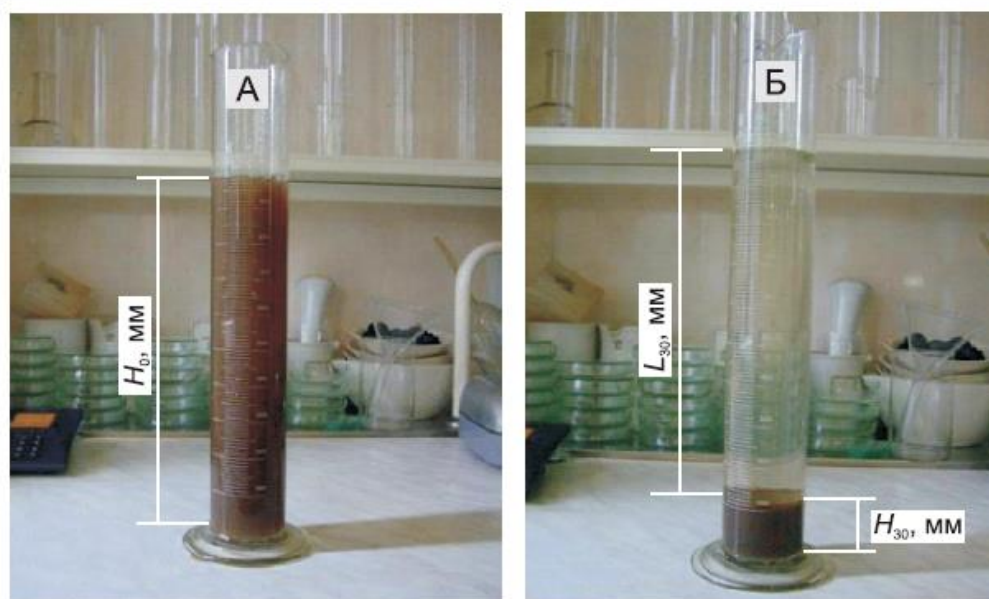


Рис. 1.5. Определение скорости осаждения активного ила: А — иловая смесь в начальный момент времени, Б — после 30 мин осаждения

Таблица 1.1. Пример определения скорости осаждения активного ила

Время		Проба 1			Проба 2			Проба 3		
мин	с	L_p мм	v_p мм/с	H_p мм	L_p мм	v_p мм/с	H_p мм	L_p мм	v_p мм/с	H_p мм
0,0	0	0	—	310	0	—	310	0	—	310
0,1	5	5	1	305	3	0,6	307	3	0,6	307
0,2	10	6	0,2	304	6	0,6	304	4	0,2	306
0,3	15	7	0,2	303	10	0,8	300	5	0,2	305
0,3	20	8	0,2	302	11	0,2	299	7	0,4	303
0,4	25	9	0,2	301	13	0,4	297	8	0,2	302
0,5	30	11	0,4	299	15	0,4	295	10	0,4	300
0,6	35	12	0,2	298	16	0,2	294	11	0,2	299
0,7	40	13	0,2	297	17	0,2	293	12	0,2	298
0,8	45	14	0,2	296	18	0,2	292	13	0,2	297
0,8	50	15	0,2	295	19	0,2	291	14	0,2	296
0,9	55	16	0,2	294	20	0,2	290	15	0,2	295
1,0	60	16,5	0,1	293,5	21	0,2	289	15,5	0,1	294,5
1,1	65	17	0,1	293	22	0,2	288	16	0,1	294

Окончание табл. 1.1

Время		Проба 1			Проба 2			Проба 3		
мин	с	L_p мм	v_p мм/с	H_p мм	L_p мм	v_p мм/с	H_p мм	L_p мм	v_p мм/с	H_p мм
1,2	70	17,5	0,1	292,5	23	0,2	287	17	0,2	293
1,3	75	18	0,1	292	24	0,2	286	18	0,2	292
1,3	80	18,5	0,1	291,5	25	0,2	285	18,2	0,04	291,8
1,4	85	19	0,1	291	27	0,4	283	18,5	0,06	291,5
1,5	90	19,3	0,06	290,7	28	0,2	282	19	0,1	291
1,6	95	19,5	0,04	290,5	31	0,6	279	19,3	0,06	290,7
1,7	100	19,8	0,06	290,2	32	0,2	278	19,8	0,1	290,2
1,8	105	20	0,04	290	35	0,6	275	20	0,04	290
1,8	110	20,2	0,04	289,8	36	0,2	274	20,3	0,06	289,7
2	115	20,5	0,06	289,5	38	0,4	272	20,5	0,04	289,5
2	120	21	0,1	289	42	0,8	268	22	0,3	288
3	180	22	0,02	288	97	0,9	213	35	0,2	275
4	240	22,5	0,01	287,5	130	0,55	180	50	0,25	260
5	300	23	0,01	287	153	0,4	157	65	0,25	245
6	360	24	0,02	286	171	0,3	139	83	0,3	227
7	420	25	0,02	285	183	0,2	127	100	0,3	210
8	480	28	0,06	282	192	0,15	118	115	0,25	195
9	540	30	0,04	280	200	0,15	110	130	0,25	180
10	600	35	0,1	275	209	0,15	101	140	0,17	170
15	900	39	0,01	271	230	0,07	80	185	0,15	125
20	1200	50	0,04	260	242	0,04	68	215	0,1	95
30	1800	71	0,07	239	258	0,05	52	250	0,12	60
Доза ила, г/л		2,1			1,9			1,8		

При обработке данных, полученных в ходе эксперимента, рассчитывают скорость осаждения (скорость седиментации) активного ила v_i для каждого временного промежутка, в ходе которого фиксировалась граница раздела «вода — ил», и высоту столба ила в цилиндре H_i в рассматриваемый момент времени. Скорость осаждения (скорость седиментации) активного ила v_i , мм/с, для каждого временного промежутка рассчитывается по формуле

$$v_i = \frac{L_i - L_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (1.12)$$

где L_t — расстояние от текущей границы раздела «вода — ил» до начального положения (высоты столба иловой смеси в начальный момент времени H_0), мм, за время t_i ;

L_{t-1} — расстояние от границы раздела «вода — ил» до начального положения (высоты столба иловой смеси в начальный момент времени H_0) в момент времени предыдущего замера t_{i-1} , мм;

t_i — текущее время эксперимента от начального момента времени, с;

t_{i-1} — время от начала эксперимента до предыдущего замера, с.

Уровень иловой смеси в цилиндре H_t , мм, в текущий момент времени определяется как

$$H_t = H_0 - L_t \quad (1.13)$$

Полученные расчетные данные заносятся в табл. 1.1.

На основании полученных данных строят кривые положения границы раздела «вода — ил» H_t от текущего времени ведения процесса t_i — кривые Кинша (рис. 1.6), которые представляют собой зависимости уровня осадка от продолжительности осаждения [4], по которым и оцениваются седиментационные свойства активного ила.

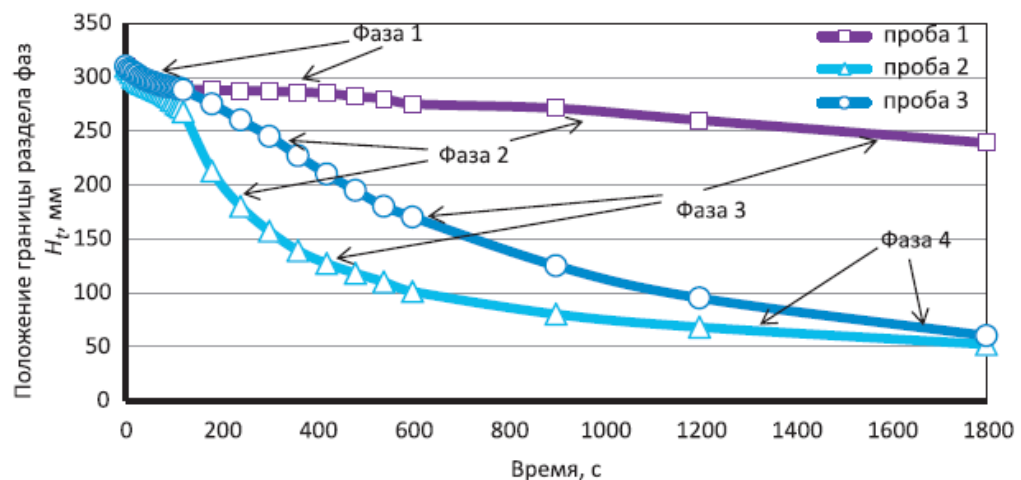


Рис. 1.6. Кривые кинетики снижения границы раздела «вода — ил»

Разделение иловых смесей происходит по закономерностям процесса стесненного осаждения, и основная масса ила выпадает в осадок в течение 15...20 мин. При осаждении иловой смеси в градуированном цилиндре уже через 1...2 мин можно отчетливо наблюдать границу между оседающим илом и осветляемой водой. Процесс отстаивания начинается с *фазы флокуляции* частиц активного ила. В этот момент границы раздела «вода — ил» практически не наблюдается. Затем наступает *фаза стесненного осаждения*, и граница раздела фаз уже видна отчетливо. В данной фазе граница раздела «вода — ил» перемещается с постоянной скоростью. В *фазе структурообразования* увеличивается концентрация хлопков, которые располагаются друг над другом, образуя структуру, в которой пространство между хлопками заполнено водой. При вытеснении из пор свободной жидкости происходит изменение структуры хлопков активного ила. В *фазе уплотнения* происходит процесс вытеснения связанной воды осадка, и изменение высоты слоя осадка не наблюдается.

Анализируя графики изменения границы раздела «вода — ил» (см. рис. 1.6), полученные в результате обработки данных, представленных в табл. 1.1, можно выделить следующие стадии процесса гравитационного разделения иловых смесей:

1. Фаза флокуляции — флокуляция хлопков активного ила с образованием хлопьев и видимой границы раздела «вода — ил» (фаза 1, рис. 1.6). Как видно из рисунка, данная фаза может занимать различный временной промежуток. Для рассматриваемых илов фаза флокуляции составляла 3 мин для активного ила пробы 2, 4 мин для активного ила пробы 3 и 15 мин для активного ила пробы 1. Для активных илов, имеющих хорошие седиментационные характеристики, фаза флокуляции не превышает, как правило, 2...4 мин.

2. Фаза стесненного осаждения хлопков активного ила с постоянной скоростью (фаза 2, рис. 1.6). Данный процесс начинается после завершения процесса флокуляции активного ила с резкого увеличения скоростей движения границы раздела «вода — ил».

3. Фаза структурообразования (фаза 3, рис. 1.6). В этой фазе скорость движения границы раздела «вода — ил» существенно снижается.

4. Фаза уплотнения осевшего ила за счет сжатия хлопьев активного ила под воздействием лежащих выше слоев (фаза 4, рис. 1.6). Скорости осаждения ила и значения илового индекса далеко не всегда коррелируют. На рис. 1.6 видно, что активные илы проб 2 и 3 имеют практически одинаковые значения илового индекса, при этом при одинаковых значениях дозы активного ила скорости осаждения в фазе стесненного осаждения у ила пробы 2 в 2,2...4,2 раза выше, чем у ила пробы 3. Это говорит о том, что при одинаковых значениях илового индекса седиментационные характеристики активного ила пробы 2 лучше, чем ила пробы 3. Таким образом, для получения полной картины эксплуатационных характеристик вторичных отстойников в условиях повышенного выноса взвешенных веществ необходимо проводить определение не только значения илового индекса, но и скоростей осаждения ила.

Процессы вспухания и пенообразования. Причины и мероприятия по устранению. При эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод достаточно часто складывается ситуация, когда при неизменных значениях гидравлической нагрузки на вторичные отстойники, дозы активного ила, илового индекса и технологических режимах работы сооружений качество очищенной воды по взвешенным веществам (и, соответственно, по БПК) резко ухудшается. Одной из причин является снижение скоростей осаждения активного ила, то есть увеличение в составе ила легких хлопков. Это приводит к тому, что при движении иловой смеси во вторичных отстойниках легкие хлопья активного ила не успевают осесть и выносятся с очищенной водой. Постоянный контроль скоростей осаждения активного ила, наряду с определением дозы активного ила, илового индекса и микробиологического состояния ила, необходим для оперативного принятия технологических решений в ходе эксплуатации очистных сооружений.

Для обеспечения эффективности работы вторичных отстойников скорости седиментации ила в фазе стесненного осаждения должны быть не менее 0,6...1,0 мм/с. Для обеспечения высоких седиментационных характеристик активного ила при эксплуатации сооружений биологической очистки необходимо свести к минимуму факторы,

которые приводят к развитию таких процессов, как вспухание и пенообразование активного ила.

Процессы вспухания и пенообразования активного ила (рис. 1.7 и 1.8) создают серьезную проблему при эксплуатации очистных сооружений и приводят к ухудшению качества очистки сточной воды по таким показателям, как взвешенные вещества и БПК. При этом периодически наблюдается сброс активного ила с очищенной водой в водоемы. Вспухание ила, его всплытие и пенообразование вызываются многими причинами, что связано с деятельностью различных групп микроорганизмов. Наиболее характерные причины данных процессов представлены в табл. 1.2.

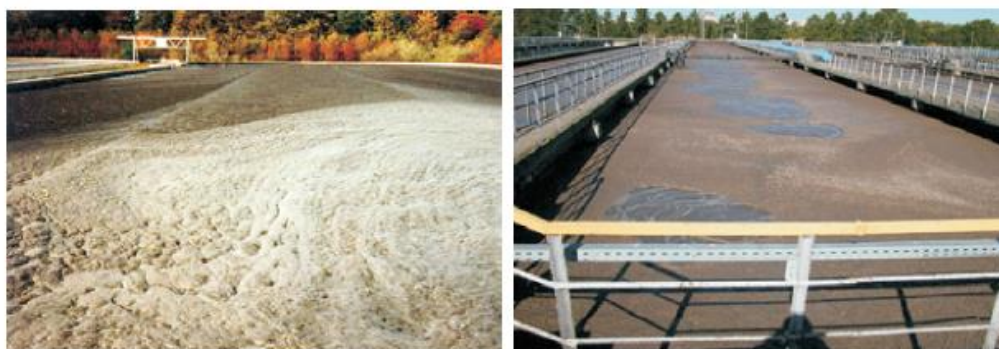
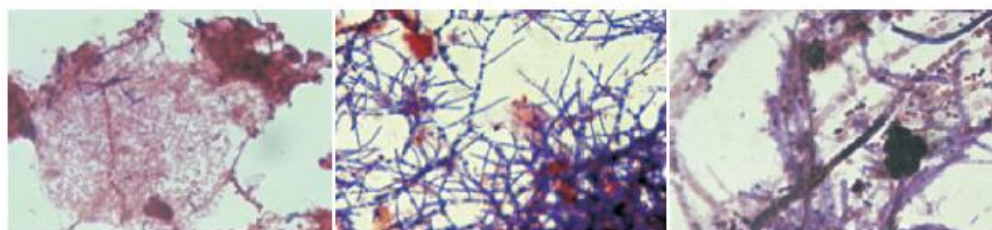


Рис. 1.7. Развитие процессов пенообразования в аэротенках



Здоровый активный ил

Вспухший активный ил

Пена

Рис. 1.8. Микроскопическая картина различных состояний активного ила [5]

Вспенивание ила чаще всего возникает вследствие массового разрастания бактерий рода *Nocardia* и *Microthrix*, которые представляют собой нитчатые формы микроорганизмов.

Таблица 1.2. Наиболее вероятные причины пенообразования и вспухания активного ила

Процессы	Сооружения, где в основном идет развитие процессов	Микроорганизмы, ответственные за развитие процессов	Причины развития процессов
Пенообразование и всплытие активного ила	Аэротенки, регенераторы и вторичные отстойники	Филаментные бактерии рода <i>Nocardia</i> и <i>Microthrix</i>	Низкая нагрузка на активный ил по органическим соединениям, низкая концентрация растворенного кислорода, резкое изменение температурного режима, наличие в сточных водах трудно окисляемых органических соединений, недостаток биогенных элементов (азота и/или фосфора)
Вспухание и всплытие активного ила	Аэротенки, регенераторы и вторичные отстойники	Слизеобразующие бактерии рода <i>Zoogloea</i>	Высокое содержание жирных кислот, высокая нагрузка на ил по органическим соединениям, недостаток биогенных элементов (азота и/или фосфора)
Всплытие отдельных скоплений активного ила	Вторичные отстойники	Денитрифицирующие микроорганизмы	Низкое содержание растворенного кислорода или его отсутствие, наличие нитратов в очищенной воде, высокие концентрации органических веществ в очищенной воде
Всплытие крупных скоплений активного ила темно-коричневого или черного цвета	Вторичные отстойники	Анаэробные газообразующие микроорганизмы	Отсутствие кислорода, наличие легко окисляемых органических веществ

В благоприятных условиях бактерии рода *Nocardia* и *Microthrix* растут в виде длинных тонких нитей, а при неблагоприятных для развития этих микроорганизмов условиях эти нити распадаются на отдельные клетки. Благоприятными условиями для развития бактерий рода *Nocardia* и *Microthrix* являются низкая нагрузка по органическим соединениям, появление в сточной воде трудно разлагаемых соединений и низкая концентрация растворенного кислорода.

Образующиеся нити бактерий имеют гидрофобную поверхность, что и приводит к их всплыванию вместе с частицами активного ила. Кроме того, эти микроорганизмы могут выделять ПАВ, также способствующие процессу пенообразования.

Вспухший активный ил, в отличие от здорового ила, характеризуется пониженной плотностью, что фиксируется визуально, и наличием всплывающей вверх фракции (рис. 1.9). С учетом того, что пена активного ила всплывает, то есть часть активного ила с наибольшей концентрацией нитчатых микроорганизмов, ответственных за развитие процессов вспухания и пенообразования, уходит из той части активного ила, которая участвует в определении величины илового индекса, формально определенный иловый индекс не является корректным показателем всплывающего ила. Иловый индекс как показатель седиментационных характеристик активного ила «работает» до тех пор, пока не начинается процесс всплывания ила.

Основные причины развития процесса вспухания активного ила:

- низкая концентрация растворенного кислорода в аэротенках;
- низкая нагрузка на активный ил по органическим соединениям;
- рН среды менее 6,5;
- наличие токсичных веществ в поступающих сточных водах;
- повышенные концентрации нефтепродуктов в сточных водах.

Мероприятия, позволяющие остановить развитие процесса вспухания, зависят от причин его развития. В любом случае следует обеспечить концентрацию растворенного кислорода в аэротенках

не ниже 1,5...2 мг/л, что обеспечивается включением в работу соответствующего количества воздухоподувных машин, а также увеличить на 50...100 % расход избыточного активного ила.



Рис. 1.9. Активный ил после 30 мин отстаивания в цилиндрах:
А — здоровый активный ил;
Б — вспушенный активный ил

В случае периодического снижения значения рН ниже 6,5 необходимо решать вопрос о подключении системы регулирования рН.

При низких нагрузках на активный ил органических соединений необходимо снизить дозу активного ила в аэротенках на 30...50 % в зависимости от текущей и проектной дозы активного ила и текущей нагрузки на ил по органическим соединениям.

При поступлении на очистные сооружения токсичных веществ и нефтепродуктов со сточными во-

дами необходимо обеспечить максимальный технически возможный расход избыточного активного ила в течение периода, равного текущему возрасту активного ила. (При эксплуатации сооружений по технологии нитри-денитрификации расход избыточного активного ила в рассматриваемой ситуации устанавливается таким образом, чтобы аэробный возраст активного ила не был ниже необходимого для реализации процесса нитрификации для текущей температуры сточных вод).

При уже развитом процессе пенообразования и возникновении массового вспенивания в аэротенках, регенераторах и вторичных отстойниках необходимо указанные выше меры дополнить следующими действиями (рис. 1.10):

- механически удалять пену с поверхности;
- обрабатывать (обрызгивать) пену раствором хлорной извести с дальнейшей ее подачей в голову сооружений.



Рис. 1.10. Удаление пены с поверхностей аэротенков

При поступлении токсичных органических веществ и при пенообразовании рекомендуются следующие технологические мероприятия:

1. При поступлении токсичных органических веществ необходимо увеличить в аэротенке процент регенерации до максимально возможного или снизить нагрузку на сооружение до минимально возможной.

2. При пенообразовании, вызванном поступлением нефтепродуктов или большого количества легкоокисляемой органики:

- исключить из технологического процесса аэротенки, наиболее пораженные процессом пенообразования, в которых ил имеет признаки нарушения микробиологического состава, перевести их в режим стабилизации без подачи сточной воды;

- за счет вывода части аэротенков из технологии очистки воды увеличить нагрузку на остальные;

- поддерживать концентрацию растворенного кислорода в аэротенках в точках, расположенных на расстоянии $1/3$ длины аэротенков от начала, не ниже 2 мг/л, на расстоянии $2/3$ длины аэротенков от начала — не ниже 3 мг/л;

- увеличить расход избыточного активного ила, обеспечив возраст активного ила порядка 5 сут при реализации технологии окисления органических соединений; при реализации в аэротенках технологий нитри-денитрификации необходимо обеспечить максимально возможный расход избыточного активного ила, который не приводит к снижению значения возраста активного ила ниже проектного для текущей температуры сточных вод;

- по возможности удалять пену с поверхности сооружений (каналов) механическими способами;

- установить боновые заграждения на выходе из аэротенков для предотвращения выноса пены в реку-водоприемник.

1.2.3. Количество образуемого осадка

Для минимизации количества избыточного активного ила система должна эксплуатироваться таким образом, чтобы микроорганизмы находились в фазе отмирания, однако накопление продуктов распада в этих условиях может существенно снизить качество очищенной воды. Наиболее оптимальный вариант — поддерживать бактерии в стационарной фазе, что обеспечит высокую эффективность очистки сточных вод, при этом количество избыточного активного ила будет существенно ниже по сравнению с эксплуатацией аэротенков в высоконагружаемых режимах.

В реальных эксплуатационных условиях количество избыточного активного ила в первую очередь зависит от следующих показателей:

- нагрузки на активный ил по органическим и взвешенным веществам;
- возраста активного ила;
- кислородного режима в аэротенках;
- температуры сточной воды.

Нагрузки по взвешенным и органическим веществам являются наиболее значимыми показателями, влияющими на количество приросшего активного ила и, как следствие, на количество избыточного ила.

В [6] дана следующая зависимость прироста активного ила P_i , мг/л, в аэротенках от значений БПК_{полн} и концентрации взвешенных веществ C_{cdp} сточной воды, поступающей в аэротенки

$$P_i = 0,8C_{cdp} + K_g L_{en}, \quad (1.14)$$

где K_g — коэффициент прироста; для городских и близких к ним по составу производственных сточных вод предлагается принимать 0,3 [6];

L_{en} — значение БПК_{полн} сточных вод, поступающих на биологическую очистку.

Формула (1.14) для определения величины прироста рассматривает эту величину как функцию двух параметров: концентрации взвешенных веществ и БПК_{полн} поступающей сточной воды. В формулу расчета прироста активного ила по [6] входит коэффициент зависимости прироста от БПК_{полн} поступающей сточной воды, значение которого рекомендуется принимать для городских сточных вод равным 0,3. Однако, как показывает опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод, коэффициент прироста K_g , заложенный в формулу (6.14) [6], не является величиной постоянной даже для илов одной станции, а зависит от многих факторов.

Исследования, проведенные на активном иле аэротенков старого блока Люберецких очистных сооружений (ЛОСст) [7—9], показали, что коэффициент прироста активного ила K_g существенно зависит от возраста активного ила и для городских сточных вод соответствует рекомендуемому в [6] значению $K_g = 0,3$ только при аэробном возрасте активного ила 5...6 сут. При иных значениях аэробного возраста активного ила коэффициент прироста ила будет иным.

В табл. 1.3 представлены данные, полученные для аэротенков ЛОСст при различных значениях возраста активного ила, прироста ила, концентрации взвешенных веществ и БПК_{полн} в сточной воде, поступающей в аэротенки, и рассчитанное по формуле (1.14) значение коэффициента прироста K_g .

Таблица 1.3. Зависимость коэффициента прироста K_g от возраста активного ила для аэротенков ЛОСст

Реальный возраст активного ила, сут	$C_{сфр}$, мг/л	$L_{от}$, мг/л	P_p , мг/л	K_g , рассчитанный по формуле (1.14)	$K_{g\text{ ср}}$
3	96	106	52,9	0,5	0,48
3	99	117	56,3	0,48	
3	105	121	55,5	0,46	
4	100	108	42,2	0,39	0,40
4	87	94	34,9	0,37	
4	92	114	50,1	0,44	
5	85	102	33,8	0,33	0,33
5	90	113	36,2	0,32	
5	101	119	40,5	0,34	
6	96	126	36,7	0,29	0,27
6	102	122	30,6	0,25	
6	87	104	28,1	0,27	
7	92	117	31,7	0,27	0,24
7	90	101	24,3	0,24	
7	93	111	24,4	0,22	
8	74	102	29,7	0,29	0,23
8	81	105	20,9	0,2	
8	76	95	19,9	0,21	
9	77	122	24,4	0,2	0,20
9	69	119	26,2	0,22	
9	83	113	21,4	0,19	
10	88	117	24,6	0,21	0,20
10	88	110	22,1	0,2	
10	57	65	14,2	0,22	
10	77	102	15,3	0,15	

На рис. 1.11 представлена полученная зависимость коэффициента прироста активного ила в реальных условиях эксплуатации аэротенков, работающих на городских сточных водах. Следует отметить, что исследования проводились на сооружениях, реализующих технологию только окисления органических загрязнений. В этих услови-

ях значение общего возраста активного ила соответствует значению аэробного возраста активного ила. Детальное рассмотрение понятий «общий возраст активного ила» и «аэробный возраст активного ила» представлено в гл. 2 настоящей книги.

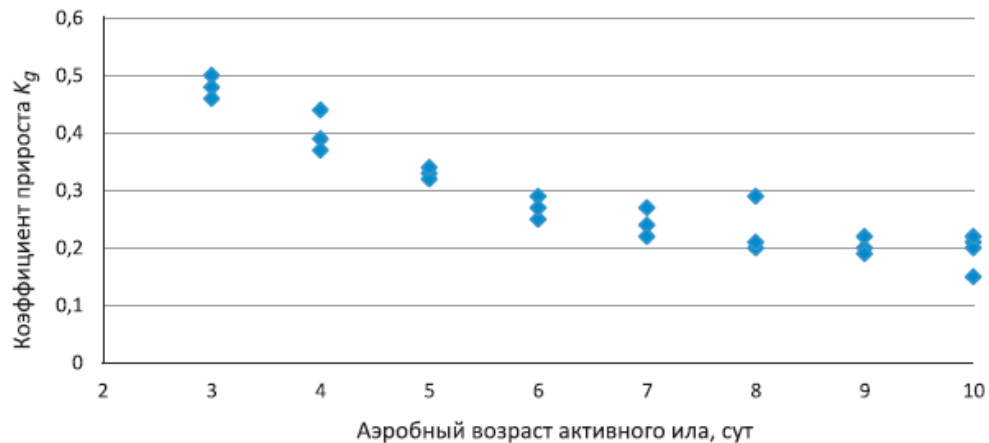


Рис. 1.11. Экспериментальная зависимость коэффициента прироста активного ила K_g от значения аэробного возраста активного ила для городских сточных вод

Из рис. 1.11 следует, что зависимость значения коэффициента прироста активного ила от значения аэробного возраста ила носит экспоненциальный характер и определяется как

$$K_g = e^{-k_{\theta a} \theta a} + 0,2, \quad (1.15)$$

где $k_{\theta a}$ — коэффициент качества воды, значение которого зависит от типа сточных вод, 1/сут;

θa — текущее значение аэробного возраста активного ила, сут.

Из формулы (1.15) с учетом данных, представленных на рис. 1.11, можно рассчитать, что $k_{\theta a}$ для городских и близких к ним по составу производственных сточных вод равен 0,42 1/сут.

Исходя из рассмотренного выше, прирост активного ила предлагается рассчитывать с учетом возраста активного ила по следующей формуле:

$$P_i = 0,8C_{cdp} + (e^{-k_{\theta a} \theta a} + 0,2)L_{en}. \quad (1.16)$$

Использование полученной расчетной зависимости дает возможность не только рассчитывать прогнозный прирост ила на очистных сооружениях, но и найти технологические решения для снижения его прироста для конкретной ситуации.

На рис. 1.12 представлены графические зависимости реального и расчетного прироста активного ила от его возраста для городских очистных сооружений [8, 9]. Расчетный прирост получен по формуле (1.16) с учетом полученных коэффициентов зависимости прироста от значения $BPK_{полн}$. Сравнение полученных кривых показывает практически полное их совпадение.

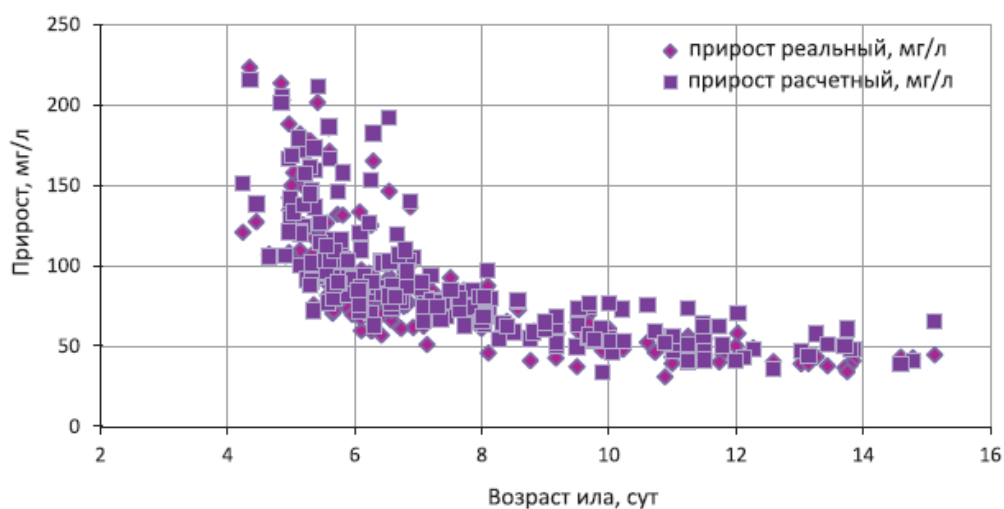


Рис. 1.12. Реальная и расчетная зависимости прироста активного ила от его возраста

Данные, представленные на рис. 1.11 и 1.12, и зависимости, описанные формулами (1.15) и (1.16), показывают, что основными методами снижения прироста активного ила являются увеличение его возраста и снижение значений $BPK_{полн}$ и концентрации взвешенных веществ в сточной воде, поступающей на биологическую очистку.

Поддерживать высокие значения возраста активного ила при уже существующих объемах сооружений является не всегда легкой задачей. Простым методом снижения количества избыточного активного ила является управление эксплуатационным режимом первичных

отстойников. Действенным подходом к повышению эффективности работы первичных отстойников и, тем самым, к уменьшению концентрации взвешенных веществ и значения $\text{БПК}_{\text{полн}}$ в сточных водах, поступающих на биологическую очистку, является снижение до минимально возможного уровня осадка в первичных отстойниках.

На рис. 1.13 представлены данные, полученные при исследовании зависимости эффективности осветления сточных вод от уровня осадка в первичных отстойниках, работающих в диапазоне проектных режимов как по гидравлической нагрузке, так и по качественным показателям поступающей сточной воды. Результаты были получены при аналогичных качественных и количественных характеристиках сточной воды, поступающей в первичные отстойники: амплитуда колебания расхода не превышала 5 % от среднего значения, концентрации взвешенных веществ поступающей сточной воды находились в диапазоне 210...233 мг/л, значения $\text{БПК}_{\text{полн}}$ сточной воды, поступающей в первичные отстойники, составляли 174...193 мг/л.

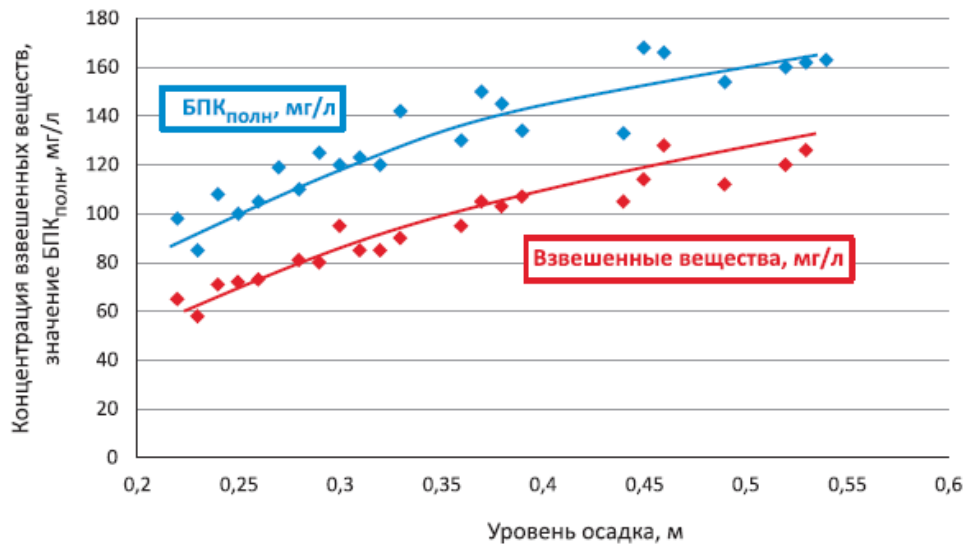


Рис. 1.13. Зависимость качественных показателей осветленной сточной воды после первичных отстойников от уровня осадка в них (при концентрации взвешенных веществ в поступающей сточной воде 210...233 мг/л, значениях $\text{БПК}_{\text{полн}}$ 174...193 мг/л)

Вопрос заключался в оценке возможности увеличить эффективность работы первичных отстойников в результате снижения уровня осадка и, соответственно, оценке влияния данных мероприятий на количество избыточного (приросшего) активного ила в аэротенках.

Полученные данные говорят о непосредственной зависимости концентрации взвешенных веществ и значения БПК_{полн} в осветленной воде (сточной воде после первичных отстойников) от уровня осадка в первичных отстойниках. Как видно из рис. 1.13, снижение уровня осадка в отстойниках с 0,55 до 0,3 м позволяет снизить концентрацию взвешенных веществ в осветленной воде со 130 до 80...85 мг/л, значение БПК_{полн} при этом снижается со 165...170 до 85...110 мг/л при прочих равных условиях.

Согласно формуле расчета прироста активного ила (1.16) дополнительное снижение концентрации взвешенных веществ и значения БПК_{полн} сточных вод в результате повышения эффективности работы первичных отстойников позволяет снизить прирост активного ила. Исследования проводились при работе аэротенков со значением аэробного возраста активного ила 7...8 сут. Согласно полученным ранее данным о зависимости коэффициента прироста активного ила K_g от возраста активного ила (см. рис. 1.11) значение K_g для возраста активного ила 7...8 сут составляет 0,23. Значение $K_g = 0,23$ и было принято в расчет прироста активного ила, выполненный по формуле (1.16) для различных концентраций взвешенных веществ и значений БПК_{полн} в осветленной воде, поступающей в аэротенки, которые соответствуют различным уровням осадка в первичных отстойниках.

В результате, используя полученные экспериментальные данные качества осветленной воды после первичных отстойников при различных уровнях осадка в сооружениях, подставив экспериментальные значения БПК_{полн} и концентрации взвешенных веществ в осветленной воде, поступающей в аэротенки, в формулу прироста активного ила (1.16) и определив по графику 1.11 значение K_g для реального возраста активного ила рассматриваемых аэротенков (7...8 сут), получаем зависимость прироста активного ила от уровня осадка в первичных отстойниках для рассматриваемых сооружений (рис. 1.14).

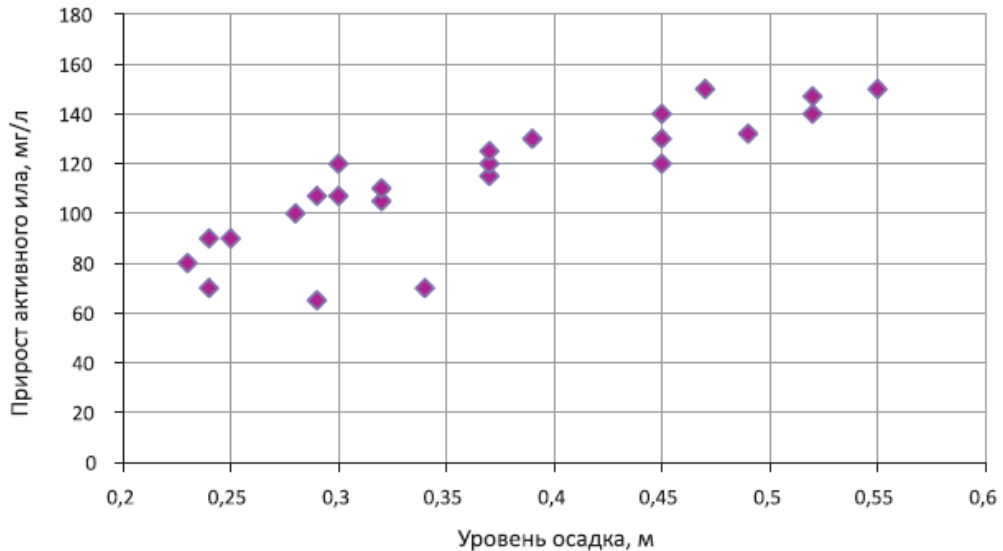


Рис. 1.14. Зависимость прироста активного ила от уровня осадка в первичных отстойниках

Оптимальный уровень осадка в первичных отстойниках, обеспечивающий минимальный прирост активного ила с учетом требуемого количества органических веществ для технологии биологической очистки рассматриваемого блока станции аэрации и технологических требований сооружений обработки осадка, определяется для конкретных условий по опыту эксплуатации сооружений.

Концентрация растворенного кислорода влияет на количество приросшего активного ила. На рис. 1.15 представлена обобщенная зависимость прироста активного ила от концентрации растворенного кислорода, полученная для аэротенков городских очистных сооружений. Качество сточных вод, поступающих на биологическую очистку, в ходе всего эксперимента находилось в диапазоне: БПК_{полн} — 110...132 мг/л, концентрация взвешенных веществ — 95...108 мг/л, аэробный возраст активного ила — 7...9 сут, температура сточной воды — 19...20 °С. В ходе исследований концентрация растворенного кислорода измерялась в точке, расположенной на расстоянии 2/3 длины аэротенка от точки ввода сточной воды.

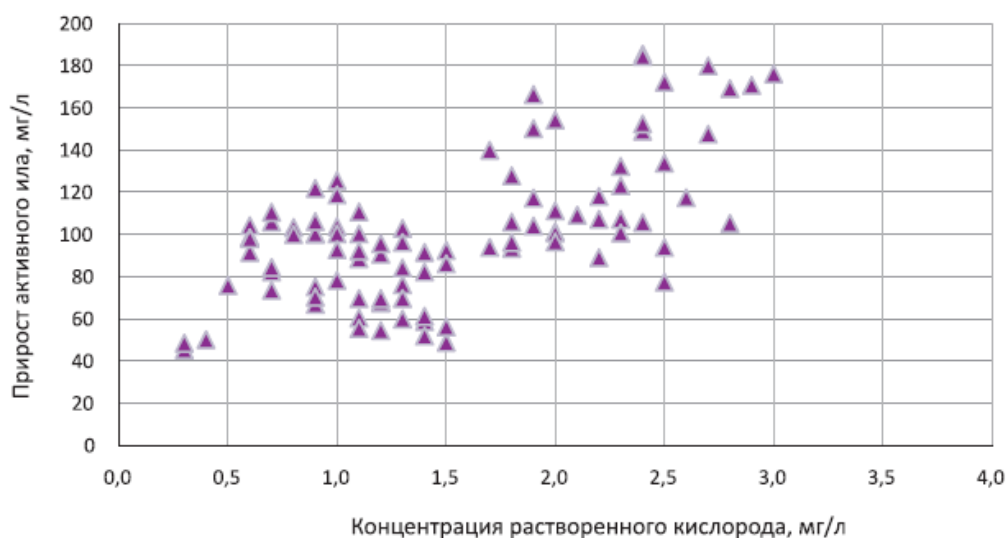


Рис. 1.15. Зависимость прироста активного ила от концентрации растворенного кислорода

Как видно из рис. 1.15, при увеличении концентрации растворенного кислорода с 1,0 до 2,5 мг/л прирост активного ила, при прочих равных условиях, увеличивается на 60...100 %.

Таблица 1.4. Технологические мероприятия, направленные на снижение прироста активного ила

Мероприятия	Комментарии
Снижение уровня осадка в первичных отстойниках до технологически возможного	При уровне осадка менее 0,15 м может наблюдаться снижение влажности сырого осадка
Увеличение возраста активного ила	При общем возрасте активного ила более 35...40 сут может наблюдаться существенное снижение скоростей биохимических процессов
Поддержание значения концентрации растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенков на уровне, не превышающем необходимое значение для реализации биохимических процессов	Оптимальные значения концентрации растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенков: 1,2...1,6 мг/л — для технологий очистки сточных вод только от органических соединений, 1,7...2,5 мг/л — для технологии нитриденитрификации

Температура сточных вод не является управляемым фактором при эксплуатации городских очистных сооружений, однако необходимо отметить, что изменение температуры с 15 до 25 °С дает увеличение прироста активного ила на 35...40 %.

1.2.4. Аэрационные системы аэротенков

Затраты на электроэнергию, потребляемую воздухоувлажнителями, обеспечивающими требуемый кислородный режим аэротенков, являются одними из основных при эксплуатации канализационных очистных сооружений. Количество потребляемой электроэнергии в данном случае зависит как от КПД воздухоувлажнителей и эффективности аэрационной системы, так и от количества кислорода, которое необходимо подать в аэротенки для обеспечения требуемой эффективности биологической очистки.

Применение современных энергоэффективных управляемых воздухоувлажнителей позволяет снизить удельное потребление электроэнергии на единицу количества производимого воздуха. Количество же воздуха, которое требуется подать в аэротенки для обеспечения необходимого количества кислорода, потребляемого на биологические процессы, напрямую зависит от эффективности аэрационной системы.

Классификация аэрационных систем. Аэрационная система представляет собой комплекс инженерного оборудования, который обеспечивает подачу и распределение воздуха (кислорода) в аэробных зонах аэротенков для создания необходимого кислородного режима, для реализации биохимических процессов и поддержания активного ила во взвешенном состоянии (в этом случае речь идет только о количестве воздуха). На рис. 1.16 дана классификация аэрационных систем по способам насыщения иловой смеси кислородом.

Системы аэрации, используемые в аэротенках, подразделяются на механические, пневматические, пневмомеханические и струйные (эжекторные). Выбор системы аэрации и схемы ее реализации для конкретных аэротенков производится индивидуально для рассматриваемых очистных сооружений с учетом таких факторов, как:

- технология биологической очистки сточных вод, реализуемая в аэротенках (окисление углеродсодержащих соединений

(с регенерацией активного ила или без регенерации), нитрификация, нитри-денитрификация, нитри-денитрификация и биологическое удаление фосфора);

- качество поступающих на биологическую очистку сточных вод и требования к очищенной воде;

- гидродинамические характеристики аэротенков (смесители, вытеснители, реакторы промежуточной гидродинамики потоков, аэротенки с рассредоточенной подачей воды и т. д.).



Рис. 1.16. Классификация аэрационных систем

Механические аэраторы. Несмотря на разнообразие конструкций механических аэраторов, принцип их действия одинаков и основан на вовлечении атмосферного воздуха непосредственно в аэрируемую жидкость вращающимся оборудованием аэратора и перемешивании вовлеченного воздуха с массой жидкости, находящейся в реакторе.

Механические аэраторы (рис. 1.17) можно разделить на две основные группы:

- поверхностные аэраторы;
- погружные аэраторы (аэраторы с затопленными лопастями).

Механические аэраторы в большинстве своем эксплуатируются с одинаковой скоростью вращения. Для снижения энергопотребления в ходе эксплуатации аэротенков с данным типом аэраторов рекомен-

дуются использовать двухскоростной регулятор или, что предпочтительнее, частотный преобразователь. Это позволяет поддерживать концентрацию растворенного кислорода в строго установленном диапазоне значений и исключить перерасход электроэнергии в реальных условиях колебания поступающей нагрузки как по органическим соединениям, так и по соединениям азота.

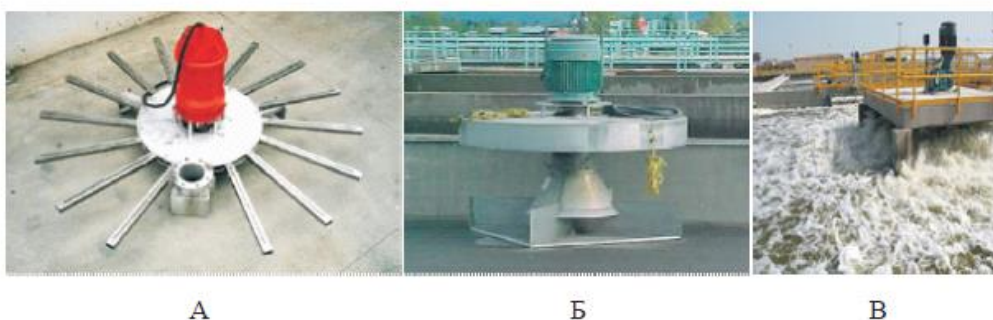


Рис. 1.17. Типичные механические аэраторы: А — погружной аэратор; Б, В — поверхностные аэраторы

Струйные (эжекторные) системы аэрации имеют различные конструктивные исполнения, однако в большинстве своем они состоят из следующих элементов: сопло для движения рабочей жидкости + патрубок для вовлечения воздуха из атмосферы + камера смешения + непосредственно диффузор (рис. 1.18).

Пневматическая система аэрации организует подачу сжатого кислородсодержащего газа (воздуха, технического кислорода) по трубопроводам (магистральным и распределительным) к аэраторам — устройствам для диспергирования газа в воде. Источником сжатого воздуха для аэрационных систем, используемых для биологической очистки сточных вод, служат турбокомпрессоры (турбовоздуходувки, турбоагнетатели, центробежные компрессоры и т. д.). В зависимости от размера образующихся на выходе из диспергаторов пузырьков воздуха различают аэраторы:

- мелкопузырчатые (диаметр пузырька 1...4 мм);
- среднепузырчатые (5...10 мм);
- крупнопузырчатые (более 10 мм).

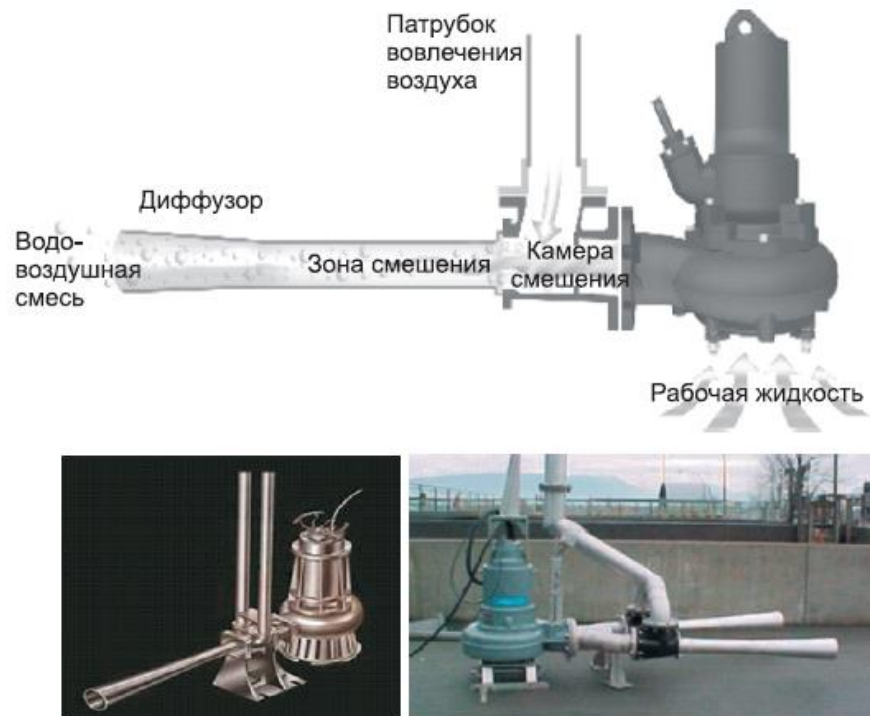


Рис. 1.18. Эжекторные аэраторы

Чем меньше диаметр воздушных пузырьков в процессе аэрации, тем (при прочих равных условиях) степень растворения кислорода воздуха в воде увеличивается, что очевидно из зависимостей, рассмотренных ниже.

Объем пузырька воздуха радиусом R_1 :

$$V_{1,\text{air}} = \frac{4}{3} \pi R_{1,\text{air}}^3.$$

Площадь поверхности пузырька воздуха радиусом R_1 :

$$S_{1,\text{air}} = 4\pi R_{1,\text{air}}^2.$$

Тогда отношение площади поверхности пузырька воздуха радиусом R_1 к его объему будет:

$$\frac{S_{1,\text{air}}}{V_{1,\text{air}}} = \frac{3}{R_{1,\text{air}}}. \quad (1.17)$$

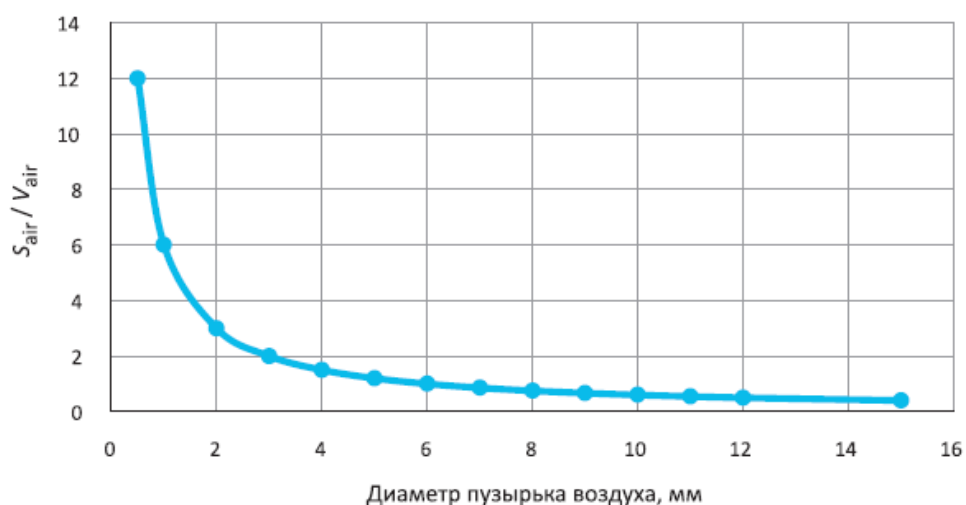


Рис. 1.19. Зависимость отношения площади поверхности пузырька воздуха к его объему от диаметра пузырька

Рис. 1.19 дает наглядное представление, как диаметр пузырьков воздуха влияет на растворимость кислорода, находящегося в воздушном пузырьке в жидкости: чем больше отношение площади поверхности к объему пузырька воздуха, тем доступнее и эффективнее процесс массопередачи кислорода. Аэрация мелкими (диаметром до 4 мм) пузырьками обеспечивает эффективность растворения кислорода 2...2,5 кг/(кВт·ч), в то время как эффективность аэрации средними и крупными пузырьками составляет 1,2 кг/(кВт·ч).

Поэтому, несмотря на то что средне- и крупнопузырчатая аэрация дает возможность использовать более низкие рабочие давления воздуха, для создания необходимого содержания кислорода в воде используются в подавляющем большинстве случаев мелкопузырчатые аэрационные системы. Крупнопузырчатые аэраторы могут быть эффективны для поддержания ила во взвешенном состоянии (в качестве «пневматических мешалок»), например, в аноксидных зонах аэротенков, если это не ведет к нарушению реализации процесса денитрификации и концентрация растворенного кислорода при этом не будет выше 0,15 мг/л. В противном случае необходимо поддерживать ил во взвешенном состоянии с помощью механического перемешивания.

Мелкопузырчатая аэрация. Классификация пневматических мелкопузырчатых аэраторов представлена на рис. 1.20.

Конструкция аэраторов и диспергирующий материал аэраторов являются основными факторами, которые учитывают при выборе и эксплуатации аэраторов.

Первым мелкопористым аэратором была плоская прямоугольная керамическая пластина. В России наиболее распространенным типом мелкопузырчатого аэратора являлась фильтросная пластина размером 300×300 мм и толщиной 35 мм, изготавливаемая из шамота, который связан смесью жидкого стекла с мелкой шамотной пылью, или из кварцевого песка и кокса, которые связаны бакелитовой смолой.

Фильтросные пластины заделывали в железобетонные каналы, устраиваемые в днище аэротенка, а в каналы подавался воздух по магистральным трубопроводам и стоякам. Фильтросные пластины имеют высокую эффективность использования кислорода воздуха, долговечны и легко восстанавливаются механической очисткой аэраторов. Недостатки фильтросных пластин следующие: проблемы получения однородного воздуховоспределения при присоединении нескольких пластин к одному воздуховоду; большая длительность монтажа, достигающая нескольких месяцев для одного аэротенка; необходимость в специальных водосбросных стояках, невозможность их применения при технологиях пульсирующей и переменной аэрации, когда воздух в аэробные зоны сооружений подается постоянно. Серьезным недостатком фильтросных пластин является их засорение, которое приводит к ухудшению распределения воздуха в иловой смеси. Наибольшее засорение происходит с внутренней стороны пластины и обусловлено наличием пыли, окалина и ржавчины в продуваемом воздухе. Вследствие этого в процессе эксплуатации аэрационной системы возрастает сопротивление в аэраторах. Для преодоления возрастающего сопротивления необходимо увеличивать напор воздуха в сети, и, как следствие, возрастает расход электроэнергии. Опыт эксплуатации аэрационных систем с фильтросными пластинами на городских очистных сооружениях показывает, что через 3...5 лет работы этих аэрационных систем потери напора возрастают в 3...5 раз.

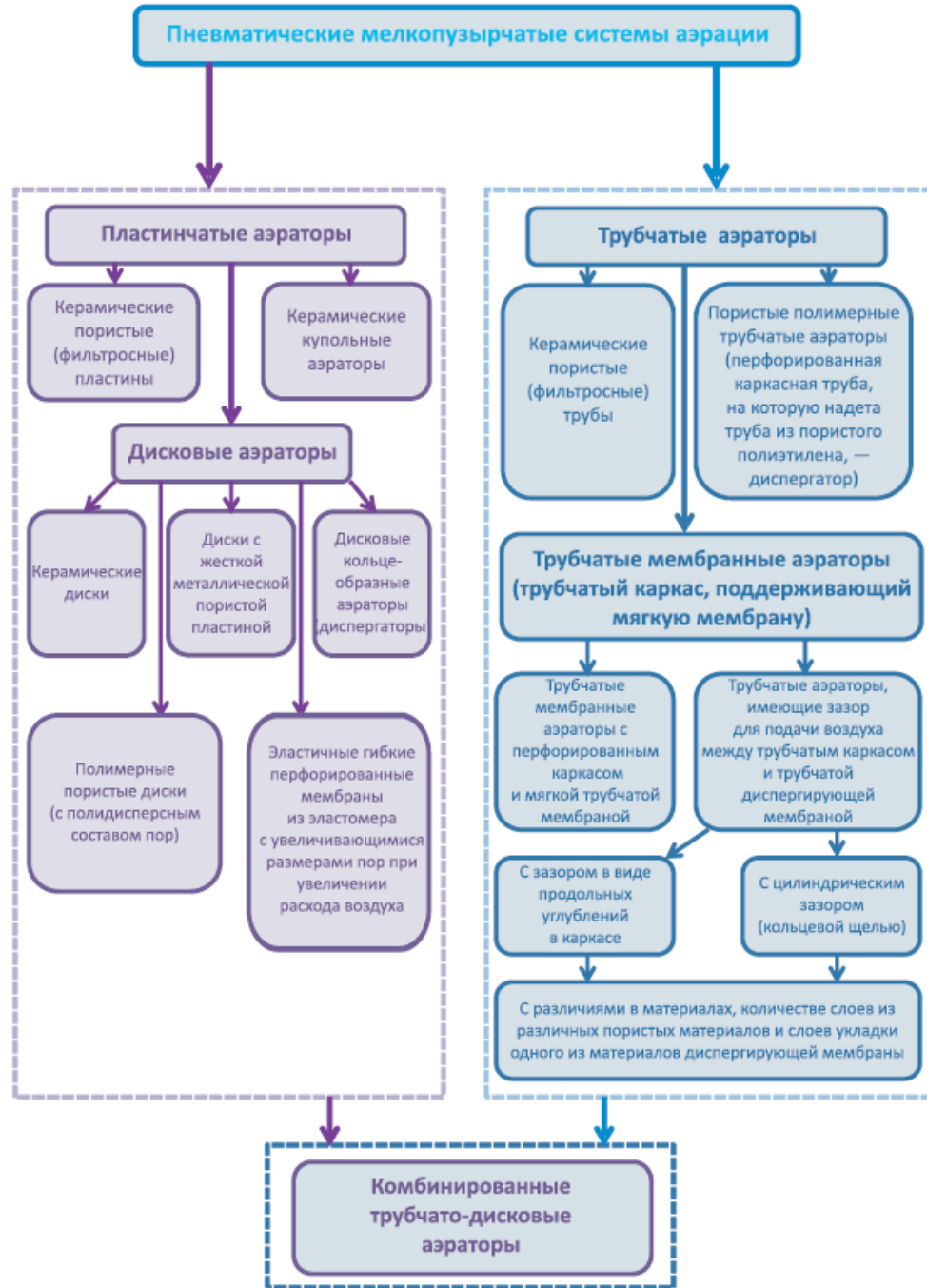


Рис. 1.20. Классификация пневматических мелкопузырчатых аэраторов

На рис. 1.21 представлены примеры керамических аэраторов — пластинчатых и дисковых.

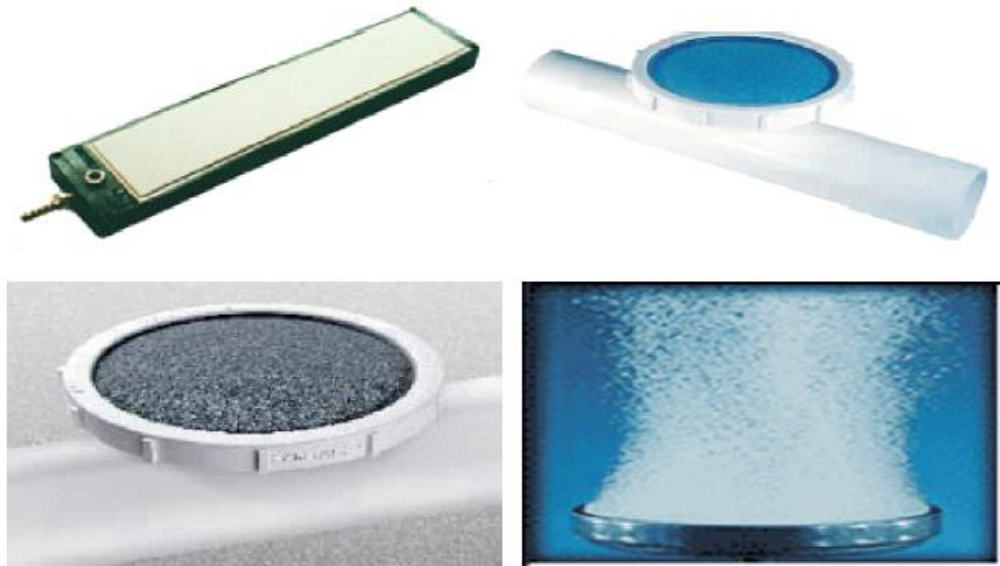


Рис. 1.21. Керамические аэраторы

Керамические аэраторы, как дисковые, так и пластинчатые, являются высокопроизводительными мелкопузырчатыми диспергаторами. Необходимо обратить внимание, что для обеспечения эффективной работы современных аэрационных систем на протяжении всего периода эксплуатации (5...7 лет) воздух, подаваемый на диспергаторы, должен быть полностью очищен от масел и профильтрован от частиц более 0,1 мкм. То есть перед подачей в магистральный воздуховод, после воздуходувных агрегатов, воздух должен проходить через специальный воздушный фильтр. Большинство современных аэрационных агрегатов оборудованы такими фильтрами, что не требует установки дополнительного оборудования. В ходе эксплуатации аэрационных систем в аэротенках аэраторы обрастают биомассой, засоряются органическими включениями сточных вод, также возможно отложение на аэраторах солей кальция, поэтому требуется периодическое очищение и регенерация аэраторов. Регенерация керамических аэраторов включает обработку жесткими щетками

и промывку горячей водой с мягкими моющими средствами. Возможна дезинфекция аэраторов путем обработки раствором (50 мг/л) гипохлорита натрия. Некоторые компании разработали для регенерации керамических аэраторов специальные способы, позволяющие проводить регенерацию, не опорожняя аэрационные резервуары и не используя ручной труд на механическую очистку поверхности диффузоров. Так, возможно избавляться от карбонатных отложений в диффузорах, не прекращая аэрацию: очищающий газ подается с внутренней стороны диффузора через воздухопроводящую систему; газ контактирует с водой в порах диффузора с образованием соляной кислоты, которая воздействует на карбонатные минеральные отложения, а также удаляет микрофлору с аэраторов.

В настоящее время все большее распространение получили мембранные аэраторы из полимерных материалов. В отличие от пористой керамики в мембранных аэраторах возможно получать различные, заранее заданные, размеры пор. Преимущества полимерных материалов по сравнению с керамическими: более легкий вес, возможность получать поры различных размеров и возможность использовать данные аэраторы в технологиях с пульсирующей и периодической аэрацией. Возможность работы аэраторов данного типа как в постоянном, так и в периодическом режиме объясняется тем, что мембранные аэраторы работают по принципу обратного клапана. При прекращении подачи воздуха поры мембран закрываются, не допуская поступления жидкости в аэраторы. Наиболее распространенным материалом, из которого изготавливают мембраны аэраторов, является ЭПДМ (этилен-пропилен-диен мономер, этилен-пропиленовый каучук). Химическая формула $[-CH_2CH_2-]_n-[CH(CH_3)CH_2-]_m$, международное обозначение EPDM. Однако такие аэраторы используют для сооружений, очищающих городские и близкие к ним по составу производственные сточные воды. Для аэраторов, используемых в сооружениях очистки агрессивных производственных сточных вод, таких как сточные воды нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов, для мембран аэраторов используют тефлон и силикон.

Примеры мембранных аэраторов представлены на рис. 1.22.



Рис. 1.22. Мембранные полимерные аэраторы

По долговечности полимеры практически не уступают керамике. Основным недостатком полимерных аэраторов является их способность деформироваться со временем, что ведет к снижению эффективности аэрации.

На рис. 1.23 приведена динамика эффективности одного из полимерных аэраторов (тип N) в ходе эксплуатации в течение 7 лет на городских очистных сооружениях.

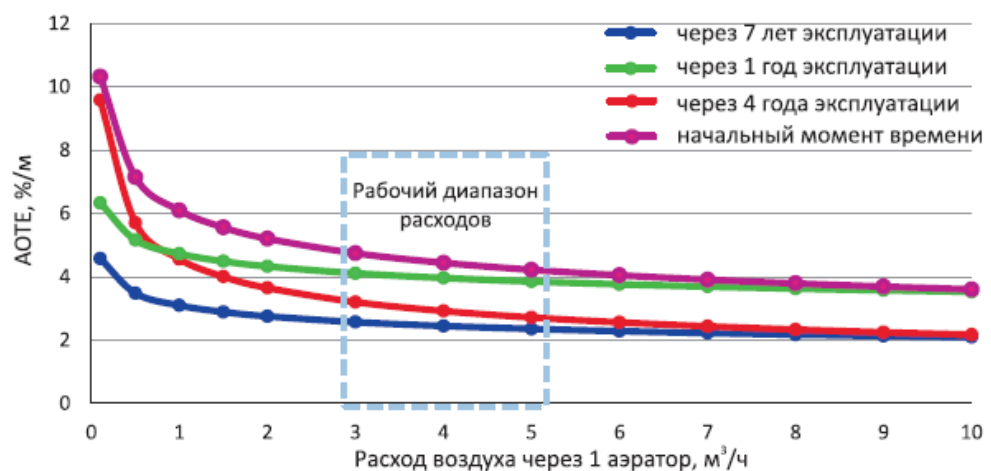


Рис. 1.23. Пример эффективности переноса кислорода в реальных условиях (AOTE — Actual Oxygen Transfer Efficiency) для мембранных аэраторов аэрационной системы N

Как видно из графика, эффективность полимерных аэраторов с течением времени снижается. В рабочем диапазоне расходов воздуха снижение за первые 3...4 года эксплуатации может достигать

30...35 %. Этот факт следует учитывать при реконструкции аэрационных систем. Для исключения ситуации, когда через 3...4 года после замены аэраторов воздуха в аэротенке не хватает для достижения требуемой эффективности очистки, расчет аэрационных систем следует проводить с учетом снижения эффективности.

Эффективность переноса кислорода воздуха является интегральным показателем эффективности работы аэрационных систем и представляет собой отношение количества воздуха, израсходованного для окисления массы загрязнений, поступивших в сооружение биологической очистки, к общему расходу воздуха, подаваемого в сооружение, выраженному в процентах. Эффективность переноса кислорода воздуха предлагается использовать в качестве оценки эффективности работы аэрационной системы, в качестве одного из основных параметров оперативного контроля работы сооружений.

При эксплуатации аэротенков, работающих только на окисление органических соединений, потребность в кислороде $S_{O,L}$, мг/л, определяется как:

$$S_{O,L} = 1,1(L_{en} - L_{ex}), \quad (1.18)$$

где L_{en} — значение БПК_{полн} сточных вод, поступающих на биологическую очистку, мг/л;

L_{ex} — значение БПК_{полн} сточных вод, прошедших биологическую очистку, мг/л.

Тогда количество кислорода на окисление органических соединений $Q_{O,L}$, кг/ч, определяется как:

$$Q_{O,L} = \frac{S_{O,L} Q_h}{1000}, \quad (1.19)$$

где Q_h — текущий часовой расход сточных вод, м³/ч.

При расчете требуемого количества кислорода для технологий нитрификации и нитри-денитрификации расчет следует проводить с учетом потребности в кислороде процесса нитрификации и снижения количества органических соединений, окисляемых растворенным кислородом, за счет потребления части органических соединений в ходе процесса денитрификации.

С учетом специфики этой главы рассмотрим расчет расхода воздуха, затрачиваемого на окисление органических соединений, м³/ч. При 100%-й (идеальной) эффективности использования кислорода расхода воздуха на окисление органических соединений $Q_{air,100\%}$, м³/ч, определяется как:

$$Q_{air,100\%} = \frac{Q_{O,L}}{0,21 \cdot 1,43}, \quad (1.20)$$

где 0,21 — объемное содержание кислорода в воздухе (20,9 %);

1,43 — плотность кислорода, кг/м³.

AOTE (Actual Oxygen Transfer Efficiency — реальная эффективность переноса кислорода) аэрационной системы, %/м, определяется как:

$$AOTE = \frac{Q_{air,100\%}}{Q_{air,real} h_{aer}} 100 \%, \quad (1.21)$$

где $Q_{air,real}$ — реальное количество воздуха Q_O , необходимое для обеспечения требуемого количества кислорода на биохимические процессы;

h_{aer} — глубина погружения аэраторов, м.

Реальную эффективность переноса кислорода (AOTE) на действующих аэротенках можно также определять экспериментально методом прямого измерения. В этом случае используется специальный купол, который перекрывает собой некоторую поверхность аэротенка и собирает газ, выходящий из аэротенка. Далее газ с поверхности аэротенка, собираемый куполом, отводится по трубопроводу, к которому подсоединен кислородомер, определяющий процентное содержание кислорода в отводящемся с поверхности аэротенка газе. Параллельно замеряется содержание кислорода в атмосферном воздухе. По разнице количества кислорода в атмосферном воздухе и газе, отводимом с поверхности всего аэротенка, рассчитывается количество кислорода, затраченное на биологическую очистку в рассматриваемой точке аэротенка. Эффективность использования кислорода определяется по разнице количества кислорода в атмосферном воздухе и газе, отводимом с поверхности аэротенка.

В паспортных характеристиках аэрационных систем указывается такой показатель, как *SOTE* (Standard Oxygen Transfer Efficiency) — стандартная эффективность переноса кислорода в чистой воде при 20 °С, %/м. *SOTE* зависит от глубины погружения аэраторов, типа аэраторов, расхода воздуха через единицу площади аэраторов и т. д. *SOTE* предоставляет фирма-производитель аэраторов вместе с сертификатом независимой лаборатории, подтверждающей данный показатель для рассматриваемой аэрационной системы.

SOTE является основным технологическим показателем, позволяющим сравнивать эффективности различных аэрационных систем.

SOTE представляет собой отношение количества растворенного в воде кислорода к количеству вносимого кислорода при стандартных условиях.

SAE (Standard Aeration Efficiency) — отношение количества растворенного в жидкости кислорода к количеству используемой электроэнергии. Обычно это значение составляет 1...2 килограмма кислорода на киловатт-час (1...2 кг О/(кВт·ч)) для механической системы аэрации и 2...8 кг О/(кВт·ч) для пневматической системы аэрации. *SAE* зависит от КПД воздуходувных машин, *SOTE* аэрационной системы и потерь напора по длине.

Выбор эффективной аэрационной системы является одним из определяющих факторов снижения энергопотребления на канализационных очистных сооружениях. Аэрационная система должна обеспечивать требуемый кислородный режим аэротенка в условиях реальной нестационарности входной нагрузки, то есть обеспечивать необходимое количество кислорода в часы максимальных нагрузок и не допускать перерасхода электроэнергии в часы минимальных нагрузок.

Наиболее простым и эффективным алгоритмом управления аэрационной системой является поддержание заданного диапазона концентраций растворенного кислорода в значимых точках аэробных зон аэротенков. Для аэротенков, реализующих технологии

окисления органических соединений, оптимальный диапазон концентрации растворенного кислорода 1,2...1,5 мг/л в точке, расположенной на расстоянии 2/3 длины от начала аэротенка-вытеснителя; для аэротенков с рассредоточенной подачей сточной воды значимая точка находится на расстоянии 1/2 длины аэротенка, для аэротенков-смесителей анализатор концентрации растворенного кислорода устанавливают в любой точке аэротенка, но не ближе, чем на расстоянии 1/3 от точки подачи сточной воды.

1.2.5. Основные факторы влияния на качество очищенной воды

Система биологической очистки сточных вод, запроектированная на окисление органических соединений, должна стабильно обеспечивать проектное качество очищенной воды при проектных значениях расходов и концентраций загрязнений. Несоответствие качественных показателей очищенной воды проектным значениям говорит или о несоответствии входных качественных и количественных характеристик сточных вод, поступающих на биологическую очистку, проектным данным, или о нарушениях технологического режима эксплуатации сооружений.

Рассмотрим основные факторы, которые влияют на скорость окисления органических соединений и, как следствие, на качество очищенных вод.

Температура сточных вод. Температура является одним из основных факторов, влияющих на биохимические процессы, в том числе на скорость окисления органических соединений: в биологических реакциях скорость процесса увеличивается при увеличении температуры. По аналогии с химическими процессами влияние температуры на скорость окисления органических соединений при биологической очистке сточных вод часто описывают, основываясь на уравнении Аррениуса. Зависимость скорости роста микроорганизмов μ_H участвующих в процессах окисления органических соединений, от температуры согласно уравнению Аррениуса описывается следующей формулой:

$$\mu_H = \mu_{H,0} e^{\frac{E}{RT}}, \quad (1.22)$$

где $\mu_{H,O}$ — максимальная скорость роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах окисления органических соединений, 1/сут;

E — энергия активации, Дж/моль;

R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

T — абсолютная температура, К.

В большинстве случаев для описания зависимости скорости роста микроорганизмов μ_H , участвующих в окислении органических соединений сточных вод в ходе биологической очистки, используют следующее уравнение, полученное из формулы (1.22):

$$\mu_H = \mu_{H, \max, 20^\circ\text{C}} \chi_A^{(T_i - 20)}, \quad (1.23)$$

где $\mu_{H, \max, 20^\circ\text{C}}$ — максимальная удельная скорость роста гетеротрофных микроорганизмов в аэробных условиях при температуре 20 °С, согласно [10, 11] это значение составляет 1,7...6,0 1/сут для городских сточных вод;

T_i — текущая температура сточных вод, °С;

χ_A — температурный коэффициент Аррениуса, значение которого составляет 1,04...1,08 1/град.

М. Хенце [10] предлагает учитывать влияние температуры на скорости роста микроорганизмов с помощью уравнения Вант-Гоффа:

$$\mu_H = \mu_{H, \max, 20^\circ\text{C}} e^{\chi(T_i - 20)}, \quad (1.24)$$

где χ — температурная константа, принимаемая 0,06...0,1 1/град [10].

На рис. 1.24 показаны расчетные зависимости скоростей роста микроорганизмов μ_H , рассчитанные по формулам (1.23) и (1.24), значение температурного коэффициента Аррениуса принималось 1,06 1/град, а значение температурной константы Вант-Гоффа — 0,08 1/град.

Сравнение результатов расчетов, выполненных по уравнениям (1.23) и (1.24), показывает, как видно из рис. 1.24, возможность использовать как уравнение Аррениуса, так и уравнение Вант-Гоффа

для расчетов скорости роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах аэробного окисления органических соединений.

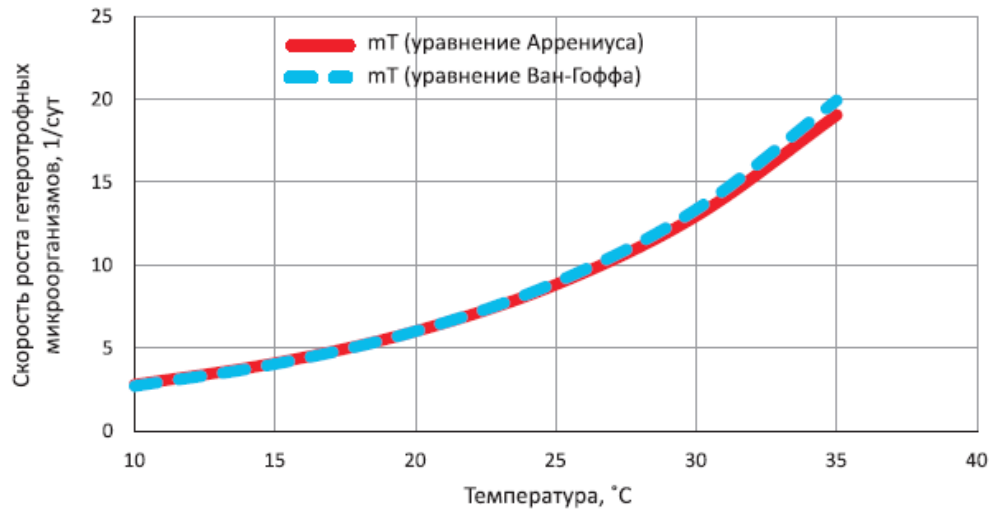


Рис. 1.24. Расчетные зависимости скорости роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах окисления органических соединений, от температуры, полученные из уравнений (1.23) и (1.24)

Необходимо отметить, что при температуре выше 36...38 °C скорости окисления органических соединений снижаются, а при температурах 43...45 °C практически равны нулю.

Как было показано выше (формула 1.10), скорость окисления органических соединений ρ_s прямо пропорциональна скорости роста микроорганизмов μ_H :

$$\rho_s = -\frac{1}{Y_H} \mu_H.$$

Соответственно максимальная скорость окисления $\rho_{s,\max}$ органических соединений прямо пропорциональна максимальной скорости роста гетеротрофных микроорганизмов $\mu_{H,\max}$, участвующих в процессах аэробного окисления органических соединений:

$$\rho_{s,\max} = -\frac{1}{Y_H} \mu_{H,\max}, \quad (1.25)$$

где Y_H — коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах окисления органических соединений, значение которого, в зависимости от качества конкретного стока, варьирует от 0,25 до 0,9 г ХПК/г ХПК. Для типовых городских сточных вод это значение находится в диапазоне 0,5...0,7 г ХПК/г ХПК [10, 12, 13].

Скорости процессов окисления органических соединений следует определять с учетом количества гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах аэробного окисления органических соединений, в общем количестве беззольного вещества биомассы активного ила. Исследования, описанные в [14], показывают, что количество гетеротрофных микроорганизмов (по массе), окисляющих в аэробных условиях органический субстрат, составляет 68 % (при значении возраста активного ила 5,2 сут) и 59 % (при значении возраста активного ила 10,4 сут) от общего количества беззольного вещества активного ила.

В [15] показано, что наблюдаемое (реальное) количество гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в окислении органических соединений в аэробных условиях, составляет (по массе) от общего количества беззольного вещества биомассы активного ила (для технологий окисления только органических соединений в аэробных условиях): 60...80 % при возрасте активного ила 12 сут, 45...60 % при возрасте активного ила 20 сут. Данные относятся к исследованиям, проводимым на городских сточных водах.

Расчетная максимальная скорость окисления органических соединений в аэробных условиях $\rho_{S, \max, \text{calc}}$ (мг ХПК/г БВАИ·ч) из формулы (1.25) и с учетом данных о количестве (в процентах) гетеротрофных микроорганизмов, окисляющих органический субстрат, рассчитывается по следующей формуле:

$$\rho_{S, \max, \text{calc}} = -\frac{1}{Y_H} \mu_{H, \max} \frac{X_H}{X}, \quad (1.26)$$

где Y_H — коэффициент прироста биомассы, г ХПК приростшей биомассы гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах окисления, на г ХПК потребленного субстрата;

X_H — концентрация гетеротрофных микроорганизмов, мг ХПК/л;

X — доза активного ила, мг ХПК/л.

Как показано в [16], 1 г сухого беззольного вещества активного ила (БВАИ) эквивалентен 1,42 г ХПК.

Рассчитанный по формулам (1.24)—(1.26) диапазон зависимостей максимальных скоростей окисления органических соединений $\rho_{S, \max, \text{calc}}$ от температуры сточных вод представлен на рис. 1.25.

Расчет выполнен для следующего диапазона кинетических характеристик: $\mu_{H, \max} = 1,7 \dots 3,0$ 1/сут, $Y_H = 0,67$ г ХПК/г ХПК; значение ХПК сухого вещества активного ила принималось 1,42 г ХПК/г БВАИ; количество гетеротрофных микроорганизмов в беззольном веществе активного ила (по массе) X_H / X принято 0,55.

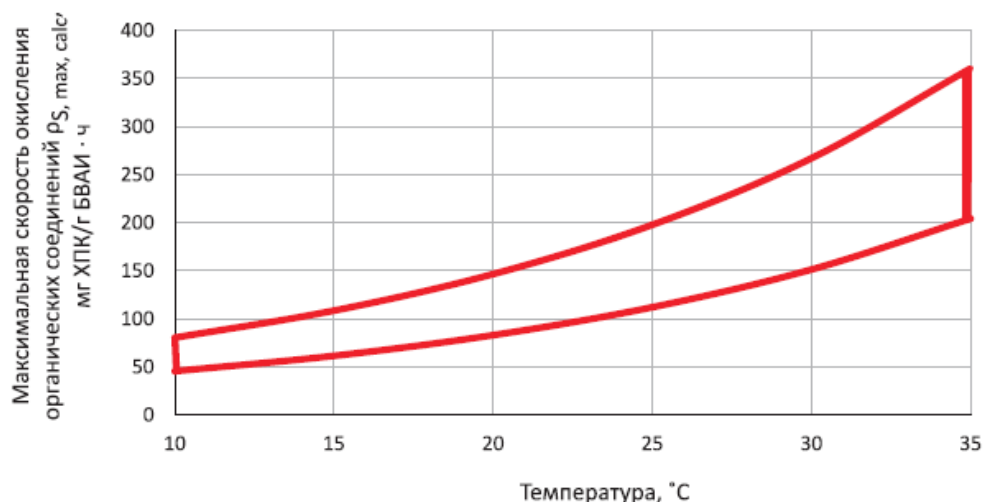


Рис. 1.25. Диапазон максимальных удельных скоростей окисления органических соединений (мг ХПК/г БВАИ·ч)

Концентрация растворенного кислорода. Влияние концентрации растворенного кислорода на скорость роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в аэробном окислении органических соединений, описывается следующей дробно-линейной функцией:

$$\mu_{H, 20^\circ\text{C}} = \mu_{H, \max, 20^\circ\text{C}} \frac{S_O}{S_O + K_{S, O}}, \quad (1.27)$$

где $\mu_{H, 20^\circ\text{C}}$ — текущая скорость роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в аэробном окислении органических соединений при температуре 20°C , 1/сут;

$K_{S,O}$ — константа полунасыщения по кислороду под аэробные условия для гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессе окисления органических соединений, мг/л, принимаемая, согласно [10], для городских сточных вод $0,5 \dots 1,0$ мг/л;

S_O — концентрация растворенного кислорода, мг/л.

Из формул (1.27) и (1.24) получаем формулу скоростей роста гетеротрофных микроорганизмов в зависимости от концентрации растворенного кислорода и температуры иловой смеси:

$$\mu_{H, 20^\circ\text{C}} = \mu_{H, \max, 20^\circ\text{C}} e^{\chi(T_i - 20)} \frac{S_O}{S_O + K_{S,O}}. \quad (1.28)$$

На рис. 1.26 представлены зависимости скоростей роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в аэробном окислении органических соединений, от концентрации растворенного кислорода для различных температур иловой смеси.

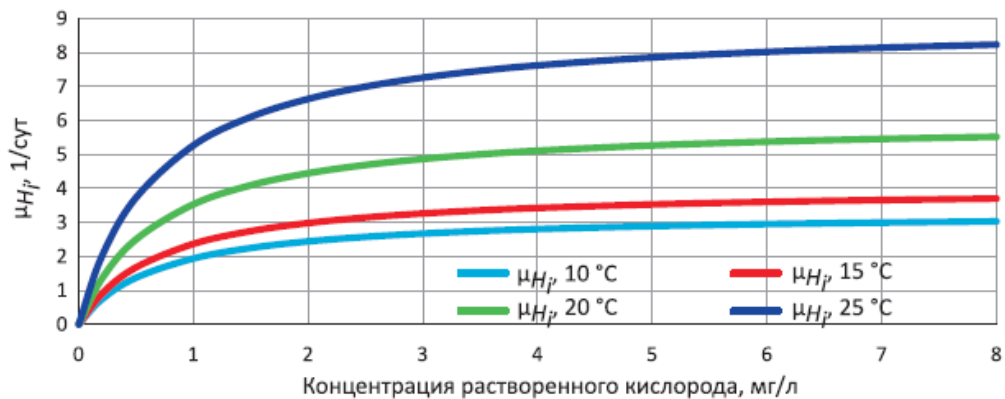


Рис. 1.26. Зависимость скоростей роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в аэробном окислении органических соединений, от концентрации растворенного кислорода (при $\frac{S_s}{S_s + K_s} \cong 1$)

Расчет скоростей роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в аэробном окислении органических соединений, выполнен по формуле (1.28) при следующих значениях кинетических параметров процесса: $\mu_{H, \max, 20^\circ\text{C}} = 3,0$ 1/сут; $\chi = 0,06$ 1/град; $K_{S,O} = 0,7$ мг/л.

Как видно из графиков, изображенных на рис. 1.26, увеличение концентрации растворенного кислорода с 0,5 до 1,0 мг/л ведет к увеличению скоростей роста в 1,4 раза, увеличение концентрации растворенного кислорода с 1,0 до 1,5 мг/л дает увеличение скорости роста в 1,15 раза, а изменение концентрации растворенного кислорода с 1,5 до 2,0 мг/л приводит к увеличению скоростей роста микроорганизмов только на 8 %.

В результате оптимальным с точки зрения скоростей процессов и эксплуатационных затрат диапазоном концентраций растворенного кислорода в аэротенках, реализующих процессы только окисления органических соединений, является диапазон 1,0...1,5 мг/л.

Значение рН. Значение рН сточных вод является одним из основных факторов, влияющих на скорость биохимических процессов, при этом достаточно часто в практике эксплуатации очистных сооружений этому параметру не уделяют достаточного внимания.

В [10] предложена следующая зависимость скорости роста гетеротрофных микроорганизмов от значения рН:

$$\mu_{H \max(\text{pH})} = \mu_{H \max(\text{pH}_{\text{opt}})} \frac{K_{\text{pH}}}{K_{\text{pH}} + (10^{\text{pH}_{\text{opt}} - \text{pH}_i} - 1)}, \quad (1.29)$$

где $\mu_{H \max(\text{pH})}$ — максимальная удельная скорость роста микроорганизмов при текущем значении рН, 1/сут;

$\mu_{H \max(\text{pH}_{\text{opt}})}$ — максимальная удельная скорость роста микроорганизмов при оптимальном для данного вида микроорганизмов значении рН (pH_{opt}), 1/сут.

Для большинства гетеротрофных микроорганизмов активного ила, участвующих в аэробных процессах окисления органических соединений сточных вод, оптимальное значение рН составляет 7...8 1/сут; K_{pH} — рН-константа, равная 150...250 для процессов роста гетеротрофных микроорганизмов активного ила при реализа-

ции процессов окисления органических соединений сточных вод в аэротенках.

На рис. 1.27 даны расчетные зависимости скоростей роста гетеротрофных микроорганизмов от значения рН при максимальных скоростях роста гетеротрофных микроорганизмов 4,0 и 8,0 1/сут (при 20 °С).

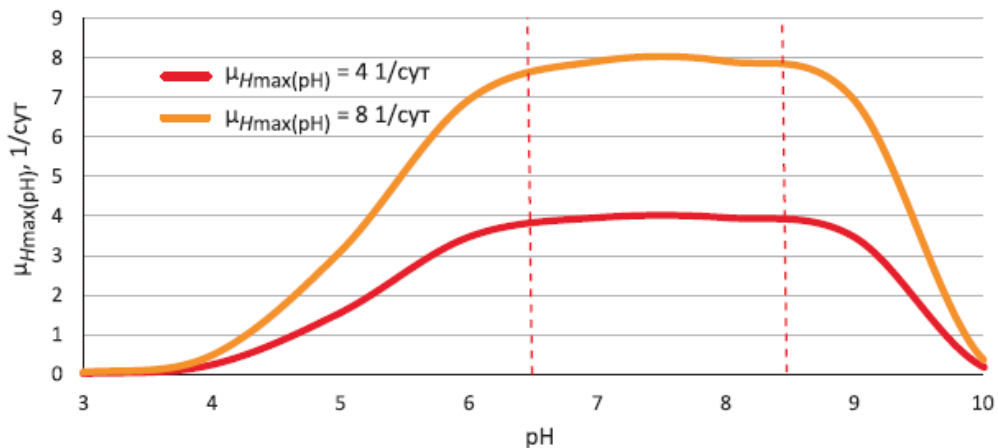


Рис. 1.27. Расчетные зависимости удельных скоростей роста гетеротрофных микроорганизмов от значения рН при максимальных скоростях роста гетеротрофных микроорганизмов 4,0 и 8,0 1/сут

Как видно из полученных графиков, наибольшие скорости процессов соответствуют диапазону рН 6,5...8,5. Проведенные экспериментальные исследования говорят, что оптимальный диапазон рН для большинства гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах окисления органических соединений сточных вод, реализуемых в аэротенках, составляет 7,0...7,5, а рабочий равен 6,5...8,5.

Содержание биогенных элементов. Для эффективного ведения процессов окисления органических соединений в аэротенках необходимо обеспечить количество азота и фосфора в поступающих на биологическую очистку сточных водах исходя из следующего соотношения: $XPK_{бр} : N : P$ как 100 : 5 : 1, где $XPK_{бр}$ — биоразлагаемая часть органических соединений, выраженная через XPK .

В Российской Федерации более привычным является соотношение, где биоразлагаемая часть органических соединений, содержащихся в сточных водах, определяется через $BPK_{полн}$:

$$BPK_{полн} : N : P = 100 : 5 : 1.$$

При недостатке биогенных элементов наблюдается ухудшение качества очистки по органическим соединениям, вплоть до полного срыва процесса. На городских очистных сооружениях такая проблема, как правило, не возникает. Однако технологи очистных сооружений промышленных предприятий достаточно часто сталкиваются с обозначенной проблемой. Если при проектировании очистных сооружений промышленных предприятий данный факт не был учтен, то для повышения эффективности очистки при несоблюдении указанного выше соотношения органических соединений и биогенных элементов необходимо установить систему дозирования азота и/или фосфора.

Наличие токсичных веществ. Некоторые вещества, поступающие на биологическую очистку, являются токсичными для гетеротрофных микроорганизмов. Это приводит к ухудшению и даже нарушению работы сооружений биологической очистки. Токсичные примеси ингибируют биоценоз активного ила в аэротенке, что может привести к попаданию загрязняющих веществ в очищенную воду, сбрасываемую в водоприемник. Нефтепродукты и легкоокисляемые органические соединения могут вызвать изменение седиментационных характеристик ила. Причиной нарушения процесса осаждения ила может быть вспухание, вызванное разрастанием филаментобразующих бактерий (причиной является нарушение кислородного режима), и дефлокуляция (причиной являются шоковые нагрузки токсикантов). Индикатором токсически индуцированной дефлокуляции является быстрое повышение количества взвешенных веществ в очищенной воде до 40...80 мг/л и более.

В [5] описываются результаты влияния различных токсичных веществ на процессы очистки сточных вод и предлагаются мероприятия по их устранению. Исследования в лабораторных условиях проводились на реальной сточной воде и активном иле из действующих аэротенков. Токсичное действие ионов тяжелых металлов анализи-

ровали, добавляя в активный ил сульфаты меди и цинка. Было получено, что медь (при концентрациях более 4 мг/л) снижает окислительную активность микроорганизмов активного ила на 60...70 % от первоначального значения. Цинк обладает токсическим действием только при достижении концентрации 10 мг/л в иловой смеси и снижает активность гетеротрофных микроорганизмов на 39 % от первоначального значения. Влияние токсичных органических веществ было изучено при добавлении фенола с концентрацией 20 мг/л в иловую смесь. В результате было выявлено 100%-е подавление нитрификационной активности и отсутствие влияния на гетеротрофную активность ила. При оценке влияния нефтепродуктов на седиментационные характеристики активного ила было установлено, что вспухание ила происходило через 24 ч после добавления нефтепродуктов в иловую смесь. Было отмечено появление нитчатых форм бактерий в реакторах с добавлением нефтепродуктов и легкоокисляемых органических веществ. Максимальное вспухание при добавлении легкоокисляемых веществ наблюдалось на четвертые сутки, при добавлении нефтепродуктов — на пятые сутки. Наиболее массивное пенообразование отмечено в присутствии нефтепродуктов. Возвращение ила к нормальному состоянию наблюдалось через 11 суток. Результаты лабораторных исследований позволили рекомендовать следующие технологические мероприятия при попадании токсичных веществ на сооружения биологической очистки:

1. Токсичный активный ил, содержащий тяжелые металлы, направлять в илоуплотнители с последующим обезвоживанием и захоронением. Недостаток активного ила в аэротенке компенсировать подачей его из сооружений, не затронутых токсическим сбросом.

2. При поступлении токсичных органических веществ на сооружения биологической очистки необходимо увеличить в аэротенках процент регенерации до максимально возможного или снизить, насколько возможно, нагрузку на сооружение.

При поступлении нефтепродуктов или большого количества легкоокисляемых органических соединений в аэротенки и развитии процесса пенообразования необходимо проводить мероприятия, предложенные на с. 34—40.

Рассмотренные выше причины, влияющие на эффективность очистки сточных вод от органических соединений и взвешенных веществ, говорят о том, что биологическая очистка сточных вод представляет собой сложный и многофакторный процесс.

При ухудшении качества очищенной воды необходимо провести полное обследование сооружений, качественных и количественных характеристик поступающих сточных вод. Определить причину проблем, оперативно разработать и провести мероприятия по их устранению можно только благодаря комплексному анализу ситуации.

1.3. Мероприятия по устранению нарушений технологического режима аэротенков

Таблица 1.5. Примеры нарушения работы сооружений биологической очистки сточных вод и мероприятия по их устранению

Превышение концентрации взвешенных веществ на выходе из вторичных отстойников над проектными значениями	
Причины	Мероприятия
- Гидравлическая нагрузка на вторичные отстойники превышает проектные значения; - доза активного ила в аэротенках превышает проектные значения	- Обеспечить проектную нагрузку на каждую единицу отстойников на проектном уровне; - обеспечить проектное значение дозы активного ила на проектном уровне; - снизить уровень ила во вторичных отстойниках до 0,2...0,3 м
Значение илового индекса превышает проектные значения	- При нагрузке по органическим соединениям 500 мг БПК _{полн} /г БВАИ и выше необходимо снизить уровень осадка в первичных отстойниках до 0,1...0,2 м и увеличить дозу активного ила до проектного значения; - при нагрузках по органическим соединениям менее 100...150 мг БПК _{полн} /г БВАИ следует увеличить уровень осадка в первичных отстойниках до 0,4...0,6 м и снизить дозу активного ила на 30 %; - при соотношениях БПК _{полн} : N : P менее чем 100 : 5 : 1 предусмотреть дозирование недостающих биогенных элементов
Всплытие отдельных скоплений активного ила	- Обеспечить концентрацию растворенного кислорода в иловой смеси, поступающей на вторичные отстойники, не менее 2,0 мг/л; - снизить уровень осадка во вторичных отстойниках до 0,1...0,2 м

Окончание табл. 1.5

Всплытие крупных скопленений активного ила темно-коричневого или черного цвета	- Обеспечить концентрацию растворенного кислорода в иловой смеси, поступающей на вторичные отстойники, не менее 2,0 мг/л; - снизить уровень осадка во вторичных отстойниках до 0,1...0,2 м; - обеспечить эффективную работу систем сбора и удаления ила
Развитие процессов пенообразования и вспухания	Обеспечить концентрацию растворенного кислорода в аэротенках 1,5...2 мг/л, увеличить расход избыточного активного ила до максимально возможного значения, определить причину развития процессов пенообразования и вспухания и провести дополнительные мероприятия в зависимости от причин развития данных процессов, рассмотренных выше
Превышение значения БПК_{полн} в фильтрованной пробе на выходе из аэротенков	
Причины	Мероприятия
Высокая гидравлическая нагрузка на аэротенки	Обеспечить проектную гидравлическую нагрузку на каждый отдельный аэротенк
Низкая концентрация растворенного кислорода в аэротенках	Обеспечить концентрацию растворенного кислорода в диапазоне 0,7...1,2 мг/л в первой четверти аэротенков и 1,0...1,5 мг/л для остального объема аэробной зоны аэротенка
Сброс токсичных примесей и нефтепродуктов со сточными водами	Увеличить расход воздуха, обеспечить концентрацию растворенного кислорода в диапазоне 1,0...1,5 мг/л в первой четверти аэротенков и не менее 2,0 мг/л для остального объема аэробной зоны аэротенка и увеличить расход избыточного активного ила на 50...100 % в течение периода, равного текущему возрасту активного ила
Недостаточное количество биогенных элементов в поступающих сточных водах (азота и фосфора)	Обеспечить дозирование соответствующих биогенных элементов
Превышение значения БПК_{полн} на выходе из вторичных отстойников при соответствии значения БПК_{полн} в фильтрованной пробе на выходе из аэротенков проектному значению	
Причины	Мероприятия
Неэффективная работа вторичных отстойников	Обеспечить проектное качество очищенной воды по взвешенным веществам на выходе из вторичных отстойников
Превышение влажности избыточного активного ила, отводимого со вторичных отстойников, над проектным значением	
Причины	Мероприятия
- Уровень ила во вторичных отстойниках менее 0,2...0,3 м; - изменение качественного состава активного ила	Повысить уровень ила во вторичных отстойниках до 0,3 м и более

Таблица 1.6. Примеры практического устранения нарушений технологического режима работы сооружений биологической очистки

Сооружение	Нарушение параметра	Мероприятия
Аэротенки	Превышение расхода поступающих сточных вод на отдельные аэротенки над проектным	Равномерное перераспределение потоков сточных вод, поступающих на различные аэротенки
	Концентрация растворенного кислорода ниже проектного значения	Регулирование распределения воздуха при существующем расходе воздуха по длине аэротенка, обеспечивающее концентрацию растворенного кислорода в диапазоне 0,7...1,2 мг/л в первой четверти аэротенков и 1,0...1,5 мг/л для остального объема аэробной зоны аэротенка. При недостаточности данного мероприятия увеличить расход воздуха, подаваемого в рассматриваемый аэротенк
	Концентрация растворенного кислорода выше проектного значения	Регулирование подачи воздуха при существующем расходе воздуха по длине аэротенка, обеспечивающее концентрацию растворенного кислорода в диапазоне 0,7...1,2 мг/л в первой четверти аэротенков и 1,0...1,5 мг/л для остального объема аэробной зоны аэротенка. При недостаточности данного мероприятия уменьшить расход воздуха, подаваемого в рассматриваемый аэротенк
	Уменьшение дозы активного ила	Снижение расхода избыточного активного ила и/или увеличение уровня осадка в первичных отстойниках
	Увеличение дозы активного ила	Увеличение расхода избыточного активного ила и/или снижение уровня осадка в первичных отстойниках
Вторичные отстойники	Увеличение расхода поступающих сточных вод	Перераспределение нагрузки между отстойниками

Глава 2. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА (ПРОЦЕССЫ НИТРИ-ДЕНИТРИФИКАЦИИ)

2.1. Фракции азота в городских сточных водах

Азот, поступающий со сточными водами на очистные сооружения, находится в виде органических и неорганических соединений.

Органический азот в городских сточных водах является компонентом органических соединений, главным образом белков, пептидов, аминов, амидов, аминокислот и их производных. Его источником являются фекалии, пищевые отходы, омертвевшие растительные и животные клетки, а также сточные воды различных отраслей промышленности, прошедшие локальные очистные сооружения предприятий или, если позволяет качество производственных сточных вод, сбрасываемые в городскую канализационную сеть без очистки.

Неорганические соединения азота в сточных водах, поступающих на очистку, представлены восстановленными формами NH_4^+ и NH_3 (ион аммония и растворенный аммиак) и окисленными формами NO_2^- и NO_3^- (нитриты и нитраты). Восстановленные формы азота в большом количестве образуются при гидролизе мочевины — продукта жизнедеятельности человека. Кроме того, процесс аммонификации белковых соединений при транспортировании сточных вод по сетям также приводит к образованию соединений аммония.

В городских сточных водах азот в окисленных формах (в виде нитритов и нитратов), как правило, отсутствует. Окисленные формы азота отсутствуют даже в том случае, если какие-либо производственные стоки имели в своем составе нитраты и нитриты, так как при транспортировании сточных вод по системе водоотведения в условиях анаэробноза активно протекают процессы денитрификации.

Нитраты и нитриты восстанавливаются группой денитрифицирующих бактерий до молекулярного азота.

На рис. 2.1 представлен классификатор соединений азота сточных вод, поступающих на очистные сооружения.

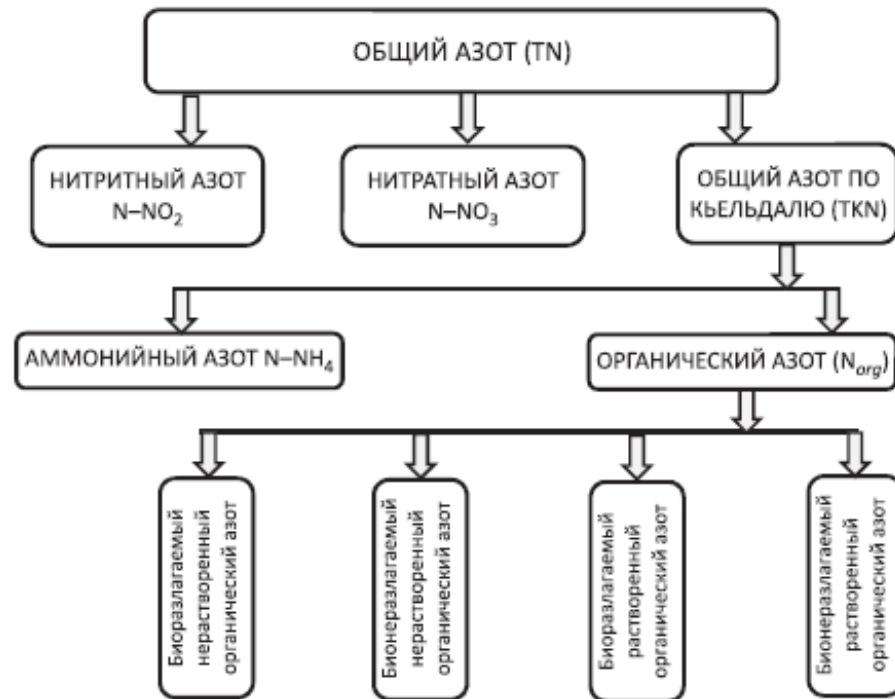


Рис. 2.1. Классификатор соединений азота, содержащегося в сточных водах

Как видно из рис. 2.1, понятие «общий азот» (TN) включает в себя сумму концентраций общего азота по Кьельдалю, азота нитратов и азота нитритов.

Общий азот по Кьельдалю (TKN) состоит из аммонийного азота и органического азота.

В восстановленной форме азот в сточных водах может быть как аммонийный, так и аммиачный. При нейтральной или кислой реакции среды в сточных водах преобладает аммонийный азот (N-NH₄); когда pH среды достигает 8 и более, преобладает аммиачная форма азота (N-NH₃).

Фракция органического азота (N_{org}) в городских сточных водах зависит как от количественного и качественного состава производственных сточных вод, поступающих в канализационную сеть города, так и от расстояния от объекта канализования до городских очистных сооружений. В анаэробных условиях при движении сточных вод по канализационной сети происходят процессы аммонификации — превращение органического азота в минеральный азот, разложение сложного белка до аммиака, и, как следствие, при увеличении расстояния от источника поступления органического азота в городскую канализационную сеть до очистных сооружений органическая составляющая азота в составе сточных вод уменьшается, а неорганическая увеличивается.

В табл. 2.1 представлены обобщенные данные по содержанию азота в городских сточных водах.

Таблица 2.1. Содержание азота в городских сточных водах

Формы азота	Тип сточных вод, мг/л		
	Концентрированные	Разбавленные	Низкоконцентрированные
Общий по Кьельдалю	80...95	35...50	13...25
Органический	40...45	15...20	3...10
Аммонийный	40...50	20...30	10...15

Состав производственных сточных вод зависит не только от типа производства, но и от технологии, которая применяется на конкретном предприятии. В большинстве стран Западной Европы требования к качеству очищенных вод предъявляются в зависимости от типа сточных вод и производительности очистных сооружений, в России основополагающим фактором является тип водоема — приемника сточных вод (табл. 2.2).

Анализ табл. 2.2 показывает разницу не только значений определенных качественных характеристик очищенных сточных вод, но и самих контролируемых показателей. Особое внимание следует обратить на разницу контролируемых показателей по формам азота.

Таблица 2.2. Требования к качеству очищенных вод в различных странах

Параметр	Россия				Страны Евросоюза	
	Водоём, категория водопользования				До 100 000 эквивалентных жителей (ЭЖ)	Более 100 000 ЭЖ
	Для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий [17]	Для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест [17]	Водоёмы рыбохозяйственного назначения [18]	Водоёмы рыбохозяйственного назначения [18]		
Биологическая потребность в кислороде БПК ₅ , мг О ₂ /л	2	4	—	—	До 25	До 25
Химическая потребность в кислороде ХПК, мг О ₂ /л	15	30	—	—	До 120	До 80
Общий азот N _{общ} , мг/л	—	—	—	—	15	10
Аммоний-ион NH ₄ ⁺ , мг/л	—	—	—	0,5	—	1 (по N-NH ₄)
Нитрат-анион NO ₃ ⁻ , мг/л	—	—	—	40	—	—
Нитрит-анион NO ₂ ⁻ , мг/л	—	—	—	0,08	—	—
Общий фосфор P _{общ} , мг/л	—	—	—	—	До 2	0,1...1,0
Фосфаты (по P)	—	—	—	0,05 — олиготрофные водоемы, 0,15 — мезотрофные, 0,20 — эвтрофные	—	—

В Российской Федерации к качеству очищенной воды предъявляются требования по каждому из следующих соединений: аммоний-иону, нитрат-аниону и нитрит-аниону. В странах Евросоюза, в большинстве случаев, предъявляют интегральные требования по азоту — по азоту общему, и только в отдельных случаях дополнительные требования предъявляются по азоту аммонийному $N-NH_4$ (как правило, минимальное требуемое значение 1,0 мг/л). При этом требование по азоту нитритов в странах Европы, Соединенных Штатах Америки, Канаде, Австралии вообще не устанавливается.

Таким образом, сравнивая требования к качеству очищенных вод в России и странах Евросоюза по азоту, можно говорить о сопоставимых требованиях к качеству очищенных вод по азоту нитратному и о существенно более жестких нормативах в России по аммонийному азоту и азоту нитритов.

2.2. Удаление соединений азота из сточных вод.

Процессы биологической очистки

Удаление азота из сточных вод происходит в результате биологического окисления аммонийного азота до нитритов и затем окисления нитритов до нитратов (процессы нитрификации) с последующей денитрификацией, то есть восстановлением нитритов и нитратов до газообразного азота. Часть азота потребляется на клеточный синтез бактерий. Параллельно происходят процессы лизиса и самоокисления клеток бактерий, в результате чего органический азот клеток микроорганизмов переходит в аммонийный азот.

Но основные методы удаления азота из сточных вод — это реализация процессов нитрификации и денитрификации, для которых необходимо создание специфических условий непосредственно в сооружениях биологической очистки.

На рис. 2.2 представлена принципиальная схема удаления азота из сточных вод при создании в сооружениях условий для реализации процессов нитрификации и денитрификации.

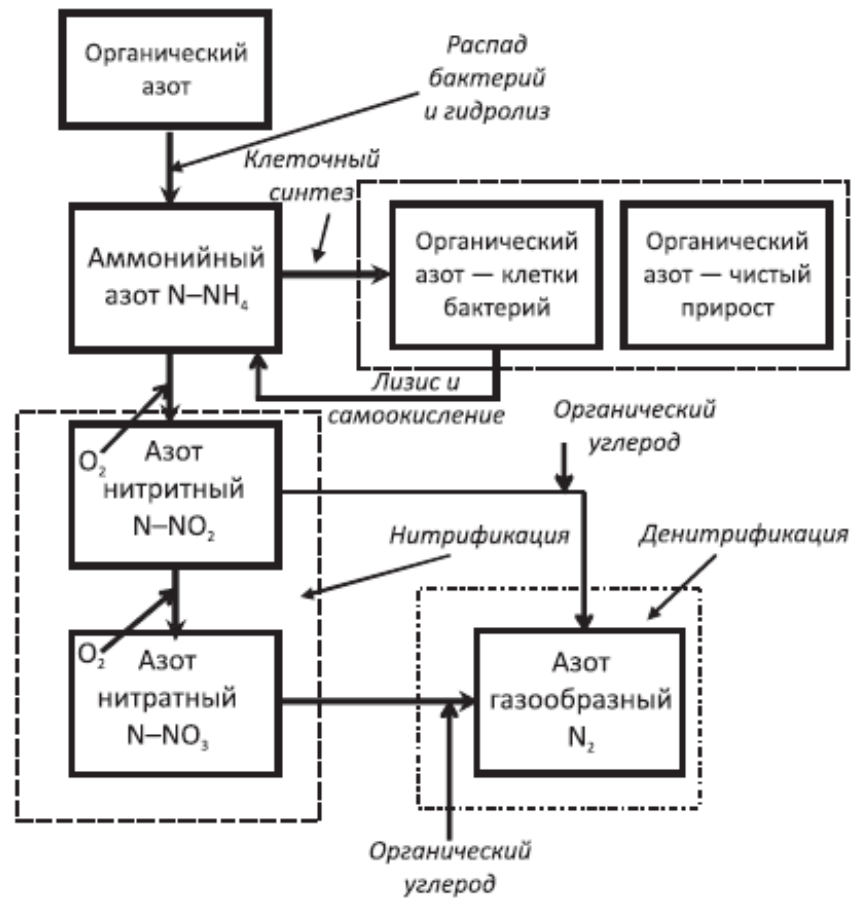
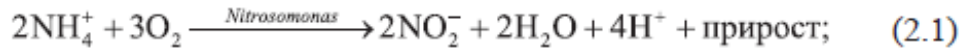


Рис. 2.2. Схема процессов удаления азота из сточных вод

2.2.1. Нитрификация. Теория процесса

Нитрификация представляет собой процесс биологического окисления аммония до нитритов и далее нитритов — до нитратов.

Бактерии, участвующие в процессах нитрификации, представляют собой автотрофные микроорганизмы, использующие в процессе своей жизнедеятельности углерод в неорганической форме (CO_2). Процесс нитрификации представляет собой двухстадийный процесс. В ходе первой стадии бактерии рода *Nitrosomonas* осуществляют биологическое окисление аммония до нитритов, а на второй стадии с помощью бактерий рода *Nitrobacter* происходит окисление нитритов до нитратов:



Как видно из уравнений (2.1) и (2.2), для полного проведения процесса нитрификации необходимо, чтобы скорость 2-й реакции (окисление нитритов до нитратов) была выше (по крайней мере не ниже), чем скорость 1-й реакции (окисление аммония до нитритов). В противном случае будет наблюдаться накопление нитритов, концентрации которых в очищенной воде могут достигать 2...7 мг/л и выше. Говоря о микроорганизмах *Nitrosomonas* и *Nitrobacter*, участвующих в процессах нитрификации, мы указываем именно эти виды бактерий как наиболее часто выявляемые в ходе данных реакций. Помимо *Nitrosomonas*, другие бактерии, такие как *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, а также некоторые бактерии родов *Nitrosolobus* и *Nitrosovibrio* могут автотрофно окислять аммиак. Во второй стадии процесса нитрификации — автотрофного окисления нитритов, — помимо бактерий рода *Nitrobacter* принимают участие бактерии родов *Nitrospira*, *Nitrococcus* и *Nitrospina*.

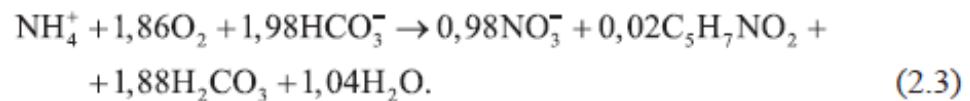
Уравнения (2.1) и (2.2) позволяют рассчитать количество кислорода, необходимое для проведения процесса нитрификации. Для первой стадии процесса, как видно из уравнения (2.1), на 2 моля NH_4 потребляется 3 моля O_2 . Масса двух молей азота (молярная масса азота 14 г/моль) составляет $2 \cdot 14 = 28$ г N- NH_4 , масса трех молей кислорода (молярная масса кислорода 32 г/моль) составляет $3 \cdot 32 = 96$ г O_2 . Из уравнения (2.1) получаем, что на окисление 28 г аммонийного азота требуется 96 г кислорода, или на окисление 28 мг аммонийного азота потребляется 96 мг кислорода. Таким образом, на первой стадии процесса нитрификации на окисление 1 мг аммонийного азота до нитритов необходимо 3,43 мг кислорода. При окислении двух молей NH_4 , как видно из уравнения (2.1), образуется 2 моля NO_2 . Из уравнения (2.2) определяем, что на окисление двух молей NO_2 необходим 1 моль O_2 . Таким образом, в ходе второй стадии процесса нитрификации на окисление $2 \cdot 14 = 28$ мг N- NO_2 расходуется $1 \cdot 32 = 32$ мг O_2 , или на окисление 1 мг нитритов N- NO_2 в ходе второй стадии процесса нитрификации необходимо 1,14 мг кислорода O_2 . Суммарно для

проведения двух стадий процессов нитрификации для окисления 1 мг аммонийного азота до нитратного азота необходимо затратить $3,43 + 1,14 = 4,57$ мг кислорода O_2 .

Эффективность нитрификации в ходе биологической очистки сточных вод зависит, в первую очередь, от количества нитрифицирующих микроорганизмов (нитрификаторов) в массе беззольного вещества активного ила (БВАИ). Прирост клеточной биомассы для бактерий *Nitrosomonas* составляет 0,05...0,3 г БВАИ/г N-NH₄, для *Nitrobacter* это значение составляет 0,02...0,08 г БВАИ/г N-NO₂.

Скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов в разы ниже, чем скорости роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессах окисления органических соединений, что представляет одну из основных проблем эксплуатации сооружений биологической очистки, реализующих процессы нитрификации.

Суммарная реакция, включающая и окисление аммония, и синтез биомассы, описывается следующим уравнением:



Как видно из уравнения (2.3), при реализации процесса нитрификации из $1 \cdot 14 = 14$ мг N-NH₄ образуется $0,02 \cdot 113 = 2,26$ мг биомассы микроорганизмов (C₅H₇NO₂, молярная масса — 113 г/моль, или 113 мг/ммоль), или из 1 мг аммонийного азота N-NH₄ образуется 0,16 мг биомассы. Таким образом, для суммарного процесса нитрификации коэффициент прироста нитрифицирующей биомассы составляет 0,16 г БВАИ/г окисленного аммонийного азота. Уравнение (2.3) позволяет также рассчитать, что на окисление 1 мг N-NH₄ требуется 4,33 мг O₂, что несколько ниже значения 4,57 мг, рассчитываемого по формулам (2.1) и (2.2). Это объясняется тем, что, как видно из уравнения (2.3), неорганический углерод, который потребляется автотрофными микроорганизмами в ходе процесса нитрификации, также является акцептором электронов, что в конечном итоге снижает потребность в кислороде.

Однако учитывая тот факт, что прирост биомассы не является величиной постоянной и при определенных условиях может вообще отсутствовать, то как при проектировании сооружений биологической очистки, так и при их эксплуатации

количество кислорода, необходимое для реализации процессов нитрификации, рассчитывают по формулам (2.1) и (2.2), то есть оно должно быть не менее 4,57 мг кислорода O_2 на окисление 1 мг азота аммонийного до нитратов.

Уравнение (2.3) показывает, что на каждый моль $N-NH_4$ в ходе процесса нитрификации потребляется 2 моля HCO_3^- , что соответствует 2 экв. щелочности.

При окислении 1 мг аммонийного азота уменьшение щелочности составляет 7,14 мг (как $CaCO_3$). Расчет потребляемой щелочности в ходе процесса нитрификации необходимо проводить как при проектировании сооружений, так и при их эксплуатации. При исчерпании щелочности процесс нитрификации останавливается.

2.2.2. Нитрификация. Математическое описание процесса

Существующее сегодня многообразие математических моделей, описывающих работу канализационных очистных сооружений, приводит к проблеме выбора метода расчета, позволяющего наиболее достоверно и полно ответить на поставленный в конкретной ситуации вопрос [19—26, 13, 10].

Наиболее широкое распространение в настоящее время получила модель Activated Sludge Model (ASM), описывающая биохимические процессы в ходе биологической очистки сточных вод, которая была разработана Международной ассоциацией качества вод (IAWQ Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment) в 1987 г. С тех пор она является наиболее детализированной моделью процесса биологической очистки сточных вод в плане рассмотрения различных компонентов загрязнений воды и типов микроорганизмов, а также

процессов, происходящих внутри и вне клеток. В настоящий момент уже разработаны несколько модификаций данной модели [25] и существует несколько пакетов программ, реализующих расчеты по моделям ASM: Bio Win, Simba, GPS-X, STOAT и др.

Уравнения аэробного роста нитрифицирующих автотрофных микроорганизмов μ_{A1} , 1/сут, в моделях ASM основываются на уравнениях Моно и имеют вид:

Для *первой стадии процесса нитрификации*:

$$\mu_{A1} = \mu_{\max,A1} \frac{S_{\text{NH}_4}}{S_{\text{NH}_4} + K_{S,\text{NH}_4,A}} \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{S,\text{O}_2,A_1}} - b_{A1}, \quad (2.4)$$

где μ_{A1} — текущая скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов, участвующих в 1-й стадии процесса нитрификации, 1/сут;

$\mu_{\max,A1}$ — максимальная удельная скорость роста нитрифицирующих бактерий 1-й стадии процесса нитрификации, 1/сут;

$K_{S,\text{NH}_4,A}$ — константа полунасыщения по аммонийному азоту, мг N-NH₄/л;

S_{NH_4} — текущая концентрация N-NH₄, мг/л;

K_{S,O_2,A_1} — константа полунасыщения по кислороду для 1-й стадии процесса нитрификации, мг/л;

S_{O_2} — текущая концентрация растворенного кислорода иловой смеси, мг/л;

b_{A1} — константа распада нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии процесса нитрификации, 1/сут.

Для *второй стадии процесса нитрификации* уравнение, описывающее рост нитрифицирующих микроорганизмов, имеет вид:

$$\mu_{A2} = \mu_{\max,A2} \frac{S_{\text{NO}_2}}{S_{\text{NO}_2} + K_{S,\text{NO}_2,A}} \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{S,\text{O}_2,A_2}} - b_{A2}, \quad (2.5)$$

где μ_{A2} — текущая скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов, участвующих во 2-й стадии процесса нитрификации, 1/сут;