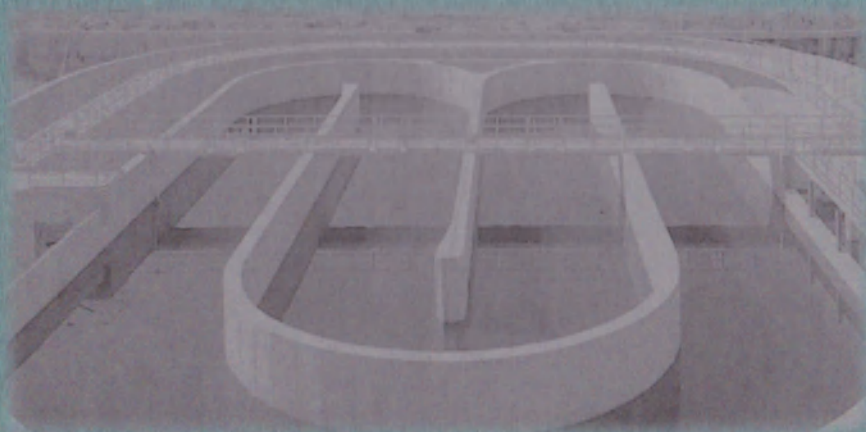


**О. В. Харькина**

# **ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**



**Волгоград. Панорама. 2015**

## ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД. КОНЦЕПЦИЯ 10 ШАГОВ

О. В. Харькина

## ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

УЧЕБНИКИ, ДИПЛОМЫ, ДИССЕРТАЦИИ -  
полные тексты  
На сайте электронной библиотеки  
[www.учебники.информ2000.рф](http://www.учебники.информ2000.рф)

НАПИСАНИЕ на ЗАКАЗ:

1. Диссертации и научные работы
2. Дипломы, курсовые, рефераты, чертежи...
3. Школьные задания

Онлайн-консультации

ЛЮБАЯ тематика, в том числе ТЕХНИКА

Приглашаем авторов

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. Харькина. 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 нестандартных 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

© Харькина О. В., 2015

## Оглавление

|   |     |
|---|-----|
| Предисловие автора .....  | 6   |
| Используемые обозначения .....  | 8   |
| Глава 1. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД<br>ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ .....                                | 16  |
| 1.1. Взаимодействие микроорганизмов активного ила и органических<br>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<br>режима аэротенков .....                          | 72  |
| Глава 2. БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД<br>ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА<br>(ПРОЦЕССЫ НИТРИ-ДЕНИТРИФИКАЦИИ) .....    | 75  |
| 2.1. Фракции азота в городских сточных водах .....  | 75  |
| 2.2. Удаление соединений азота из сточных вод. Процессы<br>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<br>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<br>процесса .....                                   | 124 |
| 2.3. Схемы реализации процессов нитри-денитрификации .....  | 129 |
| 2.4. Эксплуатация очистных сооружений, реализующих процессы<br>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 |

*Светлой памяти моего Учителя  
доктора технических наук,  
профессора Репина Бориса Николаевича  
посвящаю эту книгу*

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Эта книга открывает серию «Очистка сточных вод. Концепция 10 шагов».

Текущее и последовательно перспективное ужесточение в РФ требований к сбросу очищенных сточных вод в водоемы диктует осознание неизбежности реконструкции большинства сооружений биологической очистки сточных вод под технологии удаления азота и фосфора. И — начинается одновременно массовая реконструкция, запуск в работу и эксплуатация технологически совершенно других очистных сооружений. Этот аврал естественным образом приводит к тому, что ни у проектировщиков, ни у служб эксплуатации очистных сооружений нет времени и возможности для приобретения знаний и опыта работы с новыми сооружениями.

Мне повезло всю мою профессиональную деятельность работать на опережение. После защиты кандидатской диссертации по теме «Разработка технологии очистки производственных сточных вод в аэротенках периодического действия» судьба привела меня в Инженерно-технологический центр по проблемам канализации (ИТЦ) Мосводоканала, который был создан 15 мая 1997 г. в структуре МГУП «Мосводоканал» специально для разработки и внедрения на сооружениях московской канализации новейших технологий очистки городских сточных вод и обработки осадка. При создании ИТЦ был намечен основной круг проблем, требовавших незамедлительного решения еще в конце 90-х годов прошлого века: удаление из сточных вод биогенных элементов, обеззараживание очищенных вод, совершенствование технологий обработки осадка. Была собрана команда специалистов, азартно добивавшаяся уникальных результатов. Мы работали, учились и профессионально росли вместе с коллегами Управления канализации, Люберецких и Курьяновских очистных сооружений как инженеры, технологи, проектировщики и ученые. Каждый из нас сегодня, рассказывая о разработанных и реализованных на московских канализационных очистных сооружениях технологиях, реконструированных и построенных новых сооружениях, с гордостью говорит не «я», а — «Это делали мы!»

Причина написания этой книги — отчасти даже личная: я решила, что нужно собрать и структурировать мой профессиональный опыт и знания, чтобы поделиться ими с теми, кто сегодня решает задачи, которые возникают при проектировании и эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод.

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 нестандартных ситуациях, и выбора обоснованных путей инвестирования.

Эта книга никогда бы не появилась, если бы не моя семья. Мой папа Душко Виктор Степанович научил меня своим примером работать честно и добросовестно, не бояться идти вперед и менять свою жизнь. Моя мама Душко Светлана Васильевна — ее любовь просто помогает жить. Спасибо брату, что научил меня не бояться падать. Сын и муж стойчески вынесли все мои творческие капризы в процессе подготовки книги, ее структурирования и редактирования.

Эта книга посвящена памяти моего Учителя Репина Бориса Николаевича, который был и остается для меня примером человека исключительной порядочности и благородства, настоящего профессионала высшего класса, он научил меня любить нашу специальность и не бояться ставить яркие и порой недостижимо высокие цели.

Я благодарна моим руководителям и коллегам, с которыми довелось работать в Мосводоканале: Храменкову Станиславу Владимировичу за создание нашего замечательного Инженерно-технологического центра и за реальную поддержку науки и специалистов; Данилову Дмитрию Александровичу за то, что учил, а порой и жестко заставлял работать без халтуры и отвечать за слова и результаты; Козлову Михаилу Николаевичу за безмерное терпение и помощь; С. А. Стрельцову, С. Н. Панкову, Н. И. Дерглазову, технологическому отделу Курьяновских очистных сооружений, технологическому отделу Люберецких очистных сооружений за интересную совместную работу, достигнутые результаты и, самое главное, за возможность работать с замечательными людьми. Особую признательность я выражаю коллективу Инженерно-технологического центра Мосводоканала за безоговорочную поддержку, доверие и энтузиазм.

Книга, пожалуй, не заинтересует тех, кто привык быстро получать однозначные безальтернативные ответы на любые вопросы. Эта книга для того читателя, который любит нашу специальность и получает удовольствие как от самого процесса постановки и решения серьезной задачи, так и от достижения значимого результата в процессе кропотливого труда.

*С уважением,  
Оксана Харькина*

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

|                     |  |  |
|---------------------|--|--|
| ХПК                 | химическое потребление кислорода; представляет собой химическую окисляемость массы органических соединений сточных вод; кислородный эквивалент общего количества органических веществ в сточной воде   | $\text{мг O}_2/\text{л} = \text{г O}_2/\text{м}^3$ |
| БПК                 | биологическое потребление кислорода; представляет собой количество растворенного кислорода, потребляемого за установленное время и в определенных условиях при биохимическом окислении содержащихся в воде органических веществ; кислородный эквивалент биологически окисляемых органических веществ | $\text{мг O}_2/\text{л} = \text{г O}_2/\text{м}^3$ |
| БПК <sub>полн</sub> | количество кислорода, потребленного микроорганизмами на окисление всего количества биоразлагаемых органических соединений  | $\text{мг O}_2/\text{л} = \text{г O}_2/\text{м}^3$ |
| БПК <sub>5</sub>    | биологическое потребление кислорода микроорганизмами за 5 суток  | $\text{мг O}_2/\text{л} = \text{г O}_2/\text{м}^3$ |
| ТОС                 | Total Organic Carbon; общий органический углерод   | $\text{мг/л} = \text{г/м}^3$                       |
| $\mu_H$             | удельная скорость роста гетеротрофных микроорганизмов  | 1/сут  |

|           |  |  |
|-----------|--|--|
| $b_H$     | коэффициент отмирания гетеротрофных микроорганизмов  | 1/сут  |
| $OC_{ct}$ | окислительная мощность аэротенков; количество загрязнений, снимаемых в единицу времени массой активного ила, находящейся в единице объема сооружений | $\text{мг}/(\text{л}\cdot\text{сут}) = \text{г}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$ |
| $\rho_s$  | удельная скорость окисления органических соединений  | $\text{мг}/(\text{г}\cdot\text{ч}) = \text{г}/(\text{кг}\cdot\text{ч})$      |
| $X$       | доза активного ила   | $\text{г/л} = \text{кг/м}^3$   |
| $Z$       | зольность активного ила  | доли единицы   |
| $I$       | иловый индекс; представляет собой объем активного ила, содержащий один грамм сухого вещества после тридцатиминутного отстаивания                     | $\text{см}^3/\text{г}$   |
| $v_t$     | скорость осаждения (скорость седиментации) активного ила   | $\text{мм/с}$  |
| $P_t$     | прирост активного ила  | $\text{мг/л} = \text{г/м}^3$   |
| $K_g$     | коэффициент прироста активного ила   | —  |
| AOTE      | Actual Oxygen Transfer Efficiency; эффективность переноса кислорода в реальных условиях  | %/м  |
| SOTE      | Standard Oxygen Transfer Efficiency; стандартная эффективность переноса кислорода в чистой воде при 20 °C  | %/м  |
| SAE       | Standard Aeration Efficiency; отношение количества растворенного в жидкости кислорода к количеству используемой электроэнергии                       | $\text{кг O}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$                                      |
| $S_{oL}$  | потребность в кислороде  | $\text{мг/л} = \text{г/м}^3$   |
| $S_o$     | концентрация растворенного кислорода   | $\text{мг/л} = \text{г/м}^3$   |
| $K_{sO}$  | константа полунасыщения по кислороду для гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в процессе окисления органических соединений                     | $\text{мг/л} = \text{г/м}^3$   |

|                  |   |                         |
|------------------|---|-------------------------|
| $Q_{O_2}$        | количество кислорода на окисление органических соединений   | кг/ч                    |
| $Q_h$            | часовой расход сточных вод  | м <sup>3</sup> /ч       |
| $Q_d$            | суточный расход сточных вод   | м <sup>3</sup> /сут     |
| $Q_{air}$        | расход воздуха  | м <sup>3</sup> /ч       |
| БВАИ             | беззольное вещество активного ила   | —                       |
| TN               | Total Nitrogen; общий азот, включает в себя сумму концентраций общего азота по Кьельдалю (TKN), азота нитратов (N–NO <sub>3</sub> ) и азота нитритов (N–NO <sub>2</sub> ) | мг/л = г/м <sup>3</sup> |
| TKN              | общий азот по Кьельдалю, включает в себя сумму концентраций азота аммонийного (N–NH <sub>4</sub> ) и азота органического (N <sub>org</sub> )                              | мг/л = г/м <sup>3</sup> |
| ASM              | Activated Sludge Model, математическая модель процесса биологической очистки сточных вод  | —                       |
| $\mu_{A1}$       | удельная скорость роста нитрифицирующих бактерий 1-й стадии процесса нитрификации   | 1/сут                   |
| $K_{S, NH_4}$    | константа полунасыщения по аммонийному азоту  | мг N–NH <sub>4</sub> /л |
| $K_{S, O_2, A1}$ | константа полунасыщения по кислороду для 1-й стадии процесса нитрификации   | мг/л = г/м <sup>3</sup> |
| $b_{A1}$         | константа распада нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии процесса нитрификации  | 1/сут                   |
| $\mu_{A2}$       | удельная скорость роста нитрифицирующих бактерий 2-й стадии процесса нитрификации   | 1/сут                   |
| $K_{S, NO_2}$    | константа полунасыщения по азоту нитритов   | мг N–NO <sub>2</sub> /л |
| $K_{S, O_2, A2}$ | константа полунасыщения по кислороду для 2-й стадии процесса нитрификации   | мг/л = г/м <sup>3</sup> |

|                        |  |                         |
|------------------------|--|-------------------------|
| $b_{A2}$               | константа распада нитрифицирующих микроорганизмов 2-й стадии процесса нитрификации   | 1/сут                   |
| $P_{A1}$               | скорость 1-й стадии процесса нитрификации  | мг/г БВАИ·сут           |
| $P_{A2}$               | скорость 2-й стадии процесса нитрификации  | мг/г БВАИ·сут           |
| $\theta_{tot}$         | SRT <sub>tot</sub> — Sludge Retention Time Total, общий возраст активного ила; представляет собой отношение количества всего активного ила, находящегося в системе, к количеству отводимого активного ила                    | сут                     |
| $\theta_{tot, design}$ | проектное значение общего возраста активного ила, принимаемое для расчета сооружений   | сут                     |
| $\theta_a$             | SRT <sub>aerob</sub> — Sludge Retention Time Aerobic, аэробный возраст активного ила; представляет собой отношение количества активного ила, находящегося в аэробных зонах аэротенков, к количеству отводимого активного ила | сут                     |
| $\theta_{a, design}$   | проектное значение аэробного возраста активного ила, принимаемое для расчета сооружений  | сут                     |
| $V_{aer}$              | объем аэротенка  | м <sup>3</sup>          |
| $V_{aerob}$            | объем аэробной зоны аэротенка  | м <sup>3</sup>          |
| $\rho_{D, NO_3}$       | удельная скорость денитрификации   | мг/г·ч                  |
| $\mu_{max, H}$         | максимальная удельная скорость роста гетеротрофных микроорганизмов   | 1/сут                   |
| $K_{S, S}$             | константа полунасыщения по органическим соединениям  | мг/л = г/м <sup>3</sup> |
| $K_{NO_3}$             | константа полунасыщения по нитратам  | мг/л = г/м <sup>3</sup> |
| $K_{O_2, H(NO_3)}$     | константа полунасыщения при ингибировании кислородом   | мг/л = г/м <sup>3</sup> |

|                 |   |                         |
|-----------------|---|-------------------------|
| $Y_H$           | коэффициент прироста гетеротрофных бактерий   | г БВАИ/г ХПК            |
| $\eta_H$        | фактор снижения активности гетеротрофных микроорганизмов в анаэробных условиях  | —                       |
| $R_I$           | рецикл возвратного активного ила, представляет собой отношение расхода возвратного активного ила к расходу поступающей на биологическую очистку сточной воды    | —                       |
| $R_N$           | нитратный рецикл, представляет собой отношение расхода нитратного рецикла к расходу поступающей на биологическую очистку сточной воды                           | —                       |
| $Q_{was}$       | расход избыточного активного ила  | м <sup>3</sup> /сут     |
| $Q_{mud}$       | расход первичного осадка  | м <sup>3</sup> /сут     |
| $X_{was}$       | доза избыточного активного ила  | г/л = кг/м <sup>3</sup> |
| ПО              | первичный отстойник   | —                       |
| ВО              | вторичный отстойник   | —                       |
| ТО              | третичный отстойник   | —                       |
| ТР              | Total Phosphorus; общий фосфор, представляет собой сумму концентраций фосфора, содержащегося во всех фосфатах, присутствующих в сточных водах                   | мг/л = г/м <sup>3</sup> |
| $X_{Me}$        | стехиометрическая доза реагента   | мг/л = г/м <sup>3</sup> |
| $\beta$ -фактор | коэффициент, учитывающий превышение фактического количества реагента, требуемого для осаждения одного моля фосфора, над расчетным стехиометрическим количеством | моль/моль               |
| РАО             | Polyphosphate-Accumulating Organisms; ФАО, фосфатаккумулирующие микроорганизмы  | —                       |

|                   |   |   |
|-------------------|---|---|
| VFA               | Volatile Fatty Acids; ЛЖК, летучие жирные кислоты   | —   |
| NADH <sub>2</sub> | никотинамидадениндинуклеотид  | —   |
| РНА               | ПГА, полигидроксиалканоат   | —   |
| РНВ               | ПГБ, полигидроксibuтират  | —   |
| АТФ               | АТФ, аденозинтрифосфат  | —   |
| НАс               | ацетат  | —   |
| $\mu_{РАО}$       | скорость роста фосфатаккумулирующих микроорганизмов в аэробных условиях   | 1/сут   |
| $\rho_{НАс}$      | скорость потребления ацетата  | г/г·сут   |
| $q_{РНА}$         | константа скорости накопления полигидроксиалканоатов  | г $X_{РНА}$ /г $X_{РАО}$ ·сут                       |
| $X_{РАО}$         | концентрация фосфатаккумулирующих микроорганизмов   | мг ХПК/л = г ХПК/м <sup>3</sup>                     |
| $X_{PP}$          | концентрация запасенных полифосфатов в ФАО  | мг Р/л = г Р/м <sup>3</sup>                         |
| $K_{НАс}$         | константа полунасыщения по ацетату  | мг/л = г/м <sup>3</sup>                             |
| $K_{АЛК}$         | константа полунасыщения по щелочности ( $HCO_3^-$ )   | ммоль $HCO_3^-$ /л = моль $HCO_3^-$ /м <sup>3</sup> |
| $\rho_{PO_4}$     | скорость потребления фосфатов в аэробных условиях   | г/сут   |
| $q_{PP}$          | константа скорости накопления полифосфатов  | г $X_{PP}$ /г $X_{РАО}$ ·сут                        |
| $K_{PO_4}$        | константа полунасыщения по фосфору  | мг/л = г/м <sup>3</sup>                             |
| Eh                | редокс-потенциал, Redox-Reduction-Oxidation Reaction, окислительно-восстановительный потенциал, представляет собой меру способности химических веществ присоединять электроны | мВ  |
| GAO               | Glycogen Accumulating Organisms — ГАО, гликогенаккумулирующие организмы   | —   |



|                 |  |                                   |
|-----------------|--|-----------------------------------|
| DPB             | Denitrifying Phosphorus Removing Bacteria — денитрифицирующие фосфатаккумулирующие организмы   | —                                 |
| WWTP            | Waste Water Treatment Plant — канализационные очистные сооружения  | —                                 |
| HRT             | Hydraulic Retention Time — гидравлическое время пребывания сточной воды в сооружении   | ч                                 |
| $t_{at}$        | гидравлическое время пребывания сточной воды в аэротенке   | ч                                 |
| $Q_{ss}$        | поверхностная нагрузка на вторичные отстойники; количество сточной воды, проходящей через единицу площади отстойника в единицу времени   | м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·ч |
| F/M Ratio       | отношение количества питательных веществ к массе микроорганизмов; отношение суточного количества органического субстрата, поступающего со сточными водами на биологическую очистку, к массе беззольного вещества активного ила (БВАИ), находящегося в аэротенках | кг БПК <sub>5</sub> /кг БВАИ·сут  |
| $M(S)$          | поступающая нагрузка по рассматриваемому ( $i$ ) загрязняющему веществу  | кг/сут                            |
| $S_i$           | концентрация рассматриваемого ( $i$ ) загрязняющего вещества   | мг/л или г/м <sup>3</sup>         |
| $q_i$           | нагрузка на активный ил по загрязняющему веществу ( $i$ ); масса загрязняющих веществ в граммах (кг), приходящаяся на один грамм (килограмм) беззольного вещества активного ила (БВАИ) в сутки   | кг/кг·сут                         |
| $\mathcal{E}_v$ | эффективность удаления загрязняющих веществ ( $i$ ) в рассматриваемом ( $j$ ) сооружении   | %                                 |

|                        |  |                         |
|------------------------|--|-------------------------|
| $N_{req}$              | минимально требуемая концентрация азота в поступающих на биологическую очистку сточных водах для эффективного ведения биохимических процессов очистки сточных вод в сооружении             | мг/л                    |
| $P_{req}$              | минимально требуемая концентрация фосфора в поступающих на биологическую очистку сточных водах для эффективного ведения биохимических процессов очистки сточных вод в сооружении           | мг/л                    |
| $N_{add}$              | дополнительная (к $N_{req}$ ) концентрация азота, которую должен обеспечивать внешний источник азота для эффективного ведения биохимических процессов очистки сточных вод в сооружении     | мг/л                    |
| $P_{add}$              | дополнительная (к $P_{req}$ ) концентрация фосфора, которую должен обеспечивать внешний источник фосфора для эффективного ведения биохимических процессов очистки сточных вод в сооружении | мг/л                    |
| $\theta_{a, start-up}$ | Аэробный возраст активного ила на 1-м этапе запуска очистных сооружений  | сут                     |
| $X_{start-up}$         | Доза активного ила на 1-м этапе запуска очистных сооружений  | г/л = кг/м <sup>3</sup> |

## 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 флоки (хлопки) (рис. 1.1) — зооглейные скопления микроорганизмов, простейших, колероваток, 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.

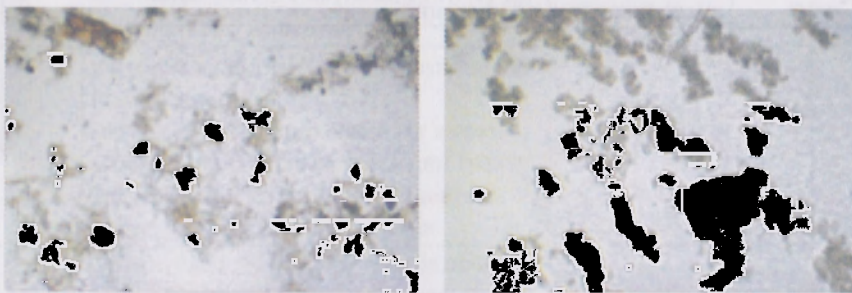
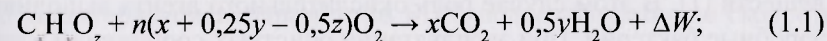


Рис. 1.1. Флоки (хлопки) активного ила

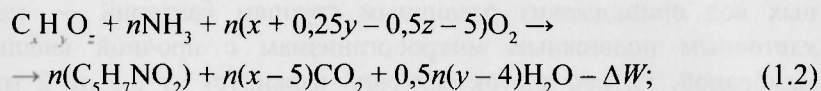
Доминирующая роль в процессе биологической очистки сточных вод принадлежит различным группам бактерий — одноклеточным подвижным микроорганизмам с прочной внешней мембраной. Размер клеток бактерий варьирует от 0,5 до 2 мкм. Типичными представителями биоценоза активного ила являются бактерии родов *Pseudomonas*, *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:

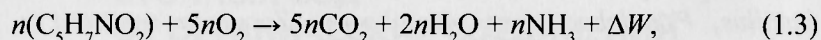
*Окисление органического вещества:*



*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 БПК<sub>5</sub> — биологическое потребление кислорода микроорганизмами за 5 суток. При анализе определяется количество кислорода, потребленного за установленное время (при определении БПК<sub>5</sub> — за 5 суток) без доступа света при 20 °С 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 БПК<sub>полн</sub> (БПК полное). БПК<sub>полн</sub> 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 БПК<sub>полн</sub>. Как правило, полное окисление достигается в течение 20 суток, в этом случае БПК<sub>полн</sub> принимают как БПК<sub>20</sub>.

*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 характеризующиеся параметром БПК, 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 — ТОС).

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 хлопья ила. Взаимодействие микроорганизмов активного ила и органических загрязнений, поступающих в аэротенки со сточными водами, носит ферментативный характер (рис. 1.3). В основе данного про-

цесса 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).

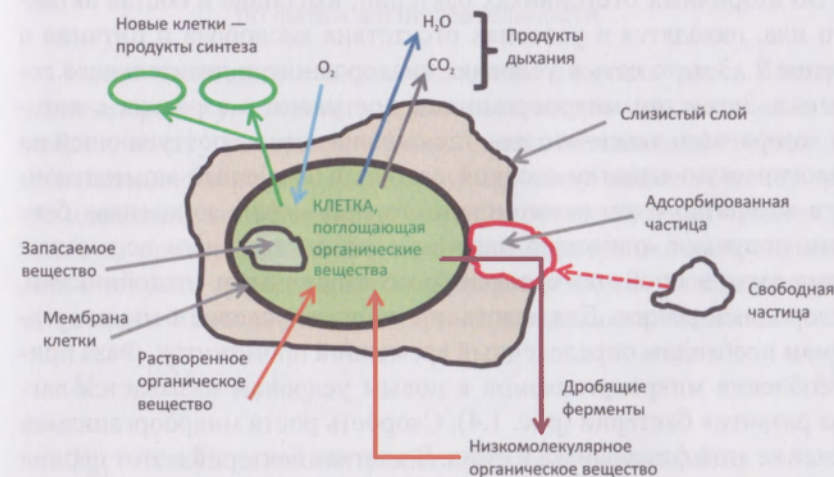


Рис. 1.3. Схема метаболизма в клетке бактерии

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  $t$ :

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

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

Из уравнения (1.4) получаем удельную скорость роста микроорганизмов  $\mu_{H,i}$  1/сут:

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

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 ( $k_H X_{H,i} = b_H X_{H,r}$ , 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:

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

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

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

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  $OC_{ar}$ , кг/(м<sup>3</sup>·сут) — это количество загрязнений, снимаемых в единицу времени массой активного ила, находящейся в единице объема сооружений.

Окислительная мощность аэротенков рассчитывается по формуле

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

где  $\rho_s$  — удельная скорость окисления органических соединений, мг/(г·ч) = г/(кг·ч);

$X_i$  — доза активного ила в аэротенках, г/л = кг/м<sup>3</sup>;

$Z$  — зольность активного ила, доли единицы.

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

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

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 приросшей 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 образуемого 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 дм<sup>3</sup> в цилиндр и отстаивают в течение 30 мин, затем измеряют объем, занимаемый активным илом.

Иловый индекс  $I$ , см<sup>3</sup>/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), см<sup>3</sup>;

$X$  — массовая концентрация активного ила, г/см<sup>3</sup>.

Рабочий диапазон значений илового индекса активного ила аэротенков, реализующих процессы окисления органических соединений, составляет 80...120 см<sup>3</sup>/г. Если значение илового индекса активного ила данных сооружений более 140 см<sup>3</sup>/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-

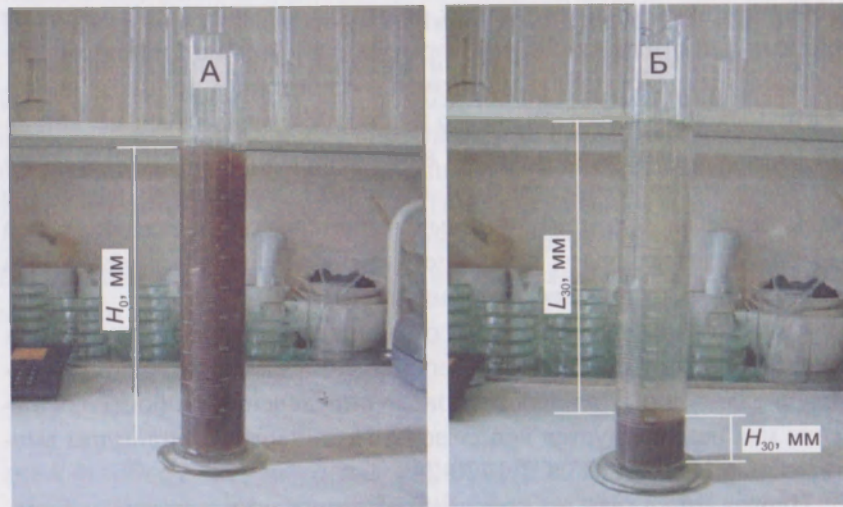
ления во вторичных отстойниках оптимальным является получение крупных и плотных хлопков, которые быстро оседают, при этом надосадочная жидкость обладает низкой мутностью. В процессе очистки сточных вод хлопки активного ила могут измельчаться механически (в ходе аэрации, мешалками в анаэробных и аноксидных 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 см<sup>3</sup> (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 см<sup>3</sup>) 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  $L_t$ , 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  | $L_p$<br>мм | $v_p$<br>мм/с | $H_p$<br>мм | $L_p$<br>мм | $v_p$<br>мм/с | $H_p$<br>мм | $L_p$<br>мм | $v_p$<br>мм/с | $H_p$<br>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    | $L_p$<br>мм | $v_p$<br>мм/с | $H_p$<br>мм | $L_p$<br>мм | $v_p$<br>мм/с | $H_p$<br>мм | $L_p$<br>мм | $v_p$<br>мм/с | $H_p$<br>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  $t_t$ ;

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

$t_t$  — текущее время эксперимента от начального момента времени, с;

$t_{t-1}$  — 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  $t_t$  — кривые Кинша (рис. 1.6), которые представляют собой зависимости уровня осадка от продолжительности осаждения [4], по которым и оцениваются седиментационные свойства активного ила.

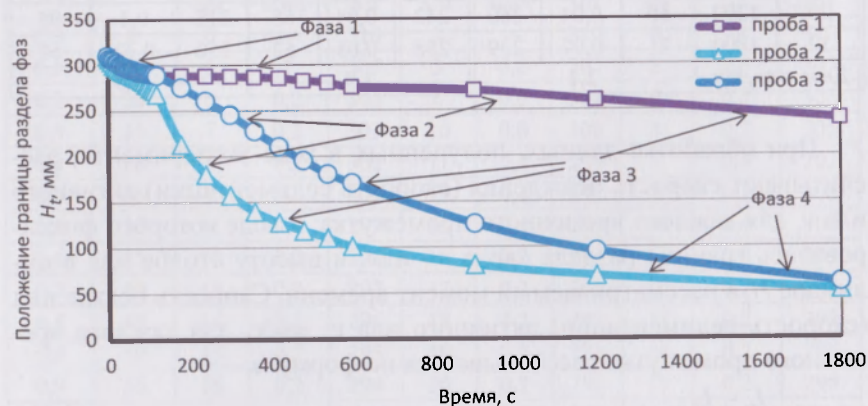


Рис. 1.6. Кривые кинетики снижения границы раздела «вода — ил»

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 флоккуляции* 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 флоккуляции — флоккуляция 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 флоккуляции 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 флоккуляции 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 флоккуляции активного ила с резкого увеличения скорости 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.

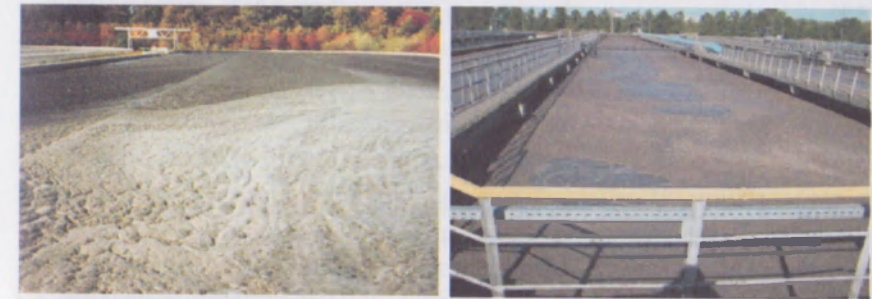
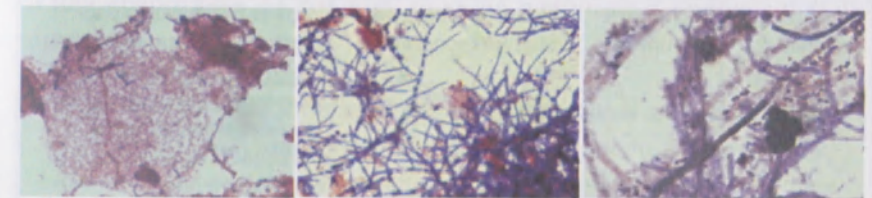


Рис. 1.7. Развитие процессов пенообразования в аэротенках



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 всплытию вместе с частицами активного ила. Кроме того, эти микроорганизмы могут выделять ПАВ, также способствующие процессу пенообразования.

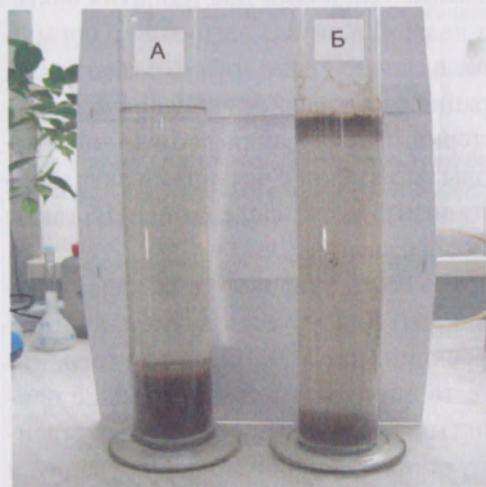
Вспухший активный ил, в отличие от здорового ила, характеризуется пониженной плотностью, что фиксируется визуально, и наличием всплывающей вверх фракции (рис. 1.9). С учетом того, что пена активного ила всплывает, то есть часть активного ила с наибольшей концентрацией нитчатых микроорганизмов, ответственных за развитие процессов вспухания и пенообразования, уводится 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;
- pH 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 воздухоподводящих 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 — вспухший 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 водами 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<sub>полн</sub> и концентрации взвешенных веществ  $C_{сдп}$  сточной воды, поступающей в аэротенки

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

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<sub>полн</sub> 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<sub>полн</sub> поступающей сточной воды. В формулу расчета прироста активного ила по [6] входит коэффициент зависимости прироста от БПК<sub>полн</sub> 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.

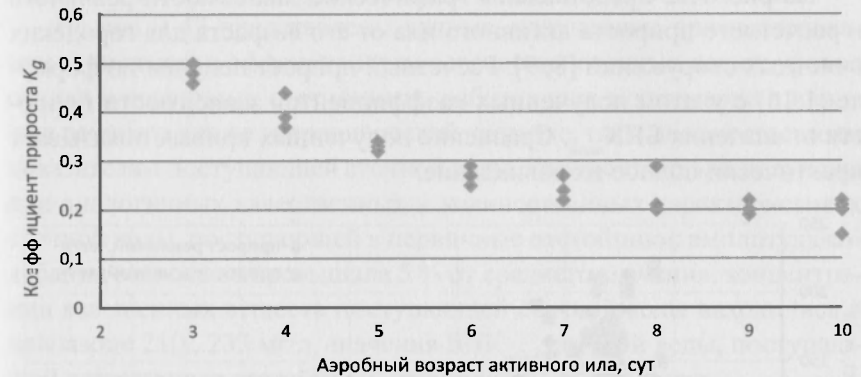
В табл. 1.3 представлены данные, полученные для аэротенков ЛОСст при различных значениях возраста активного ила, прироста ила, концентрации взвешенных веществ и БПК<sub>полн</sub> в сточной воде, поступающей в аэротенки, и рассчитанное по формуле (1.14) значение коэффициента прироста  $K_g$ .

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

| Реальный возраст активного ила, сут | $C_{cdp}$ , мг/л | $L_{en}$ , мг/л | $P_i$ , 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

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

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

$\theta a$  — 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:

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

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.

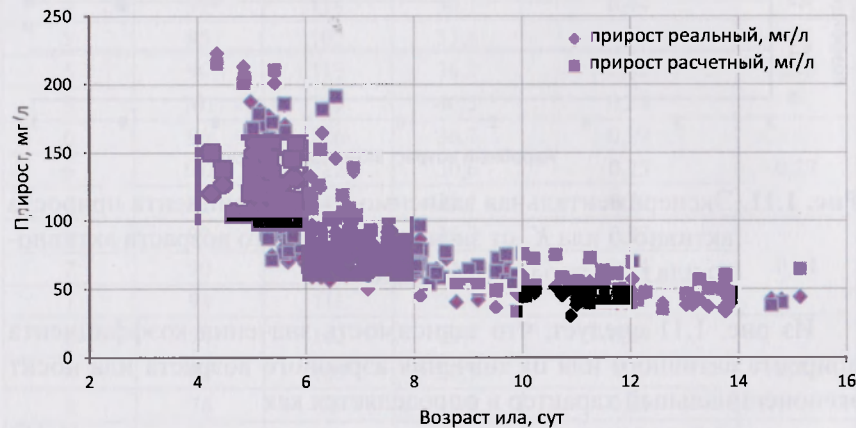


Рис. 1.12. Реальная и расчетная зависимости прироста активного ила от его возраста

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  $BPK_{полн}$  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  $BPK_{полн}$  сточной воды, поступающей в первичные отстойники, составляли 174...193 мг/л.

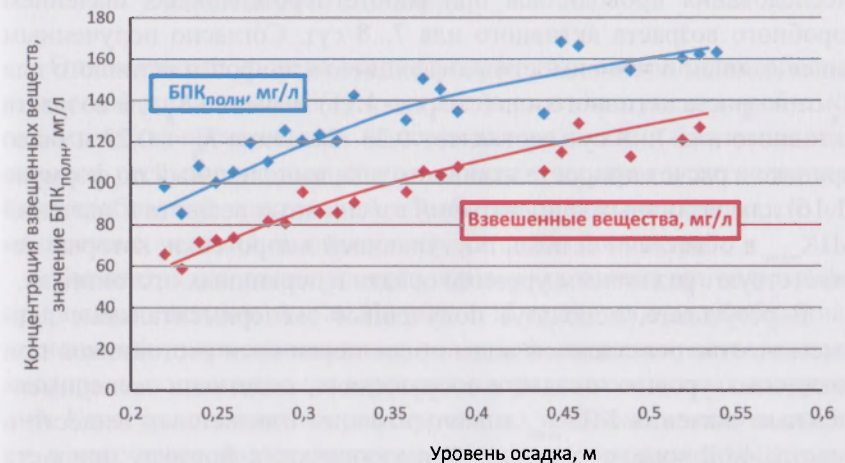


Рис. 1.13. Зависимость качественных показателей осветленной сточной воды после первичных отстойников от уровня осадка в них (при концентрации взвешенных веществ в поступающей сточной воде 210...233 мг/л, значениях  $BPK_{полн}$  174...193 мг/л)



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<sub>полн</sub> 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<sub>полн</sub> 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<sub>полн</sub> 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<sub>полн</sub> 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<sub>полн</sub> 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).

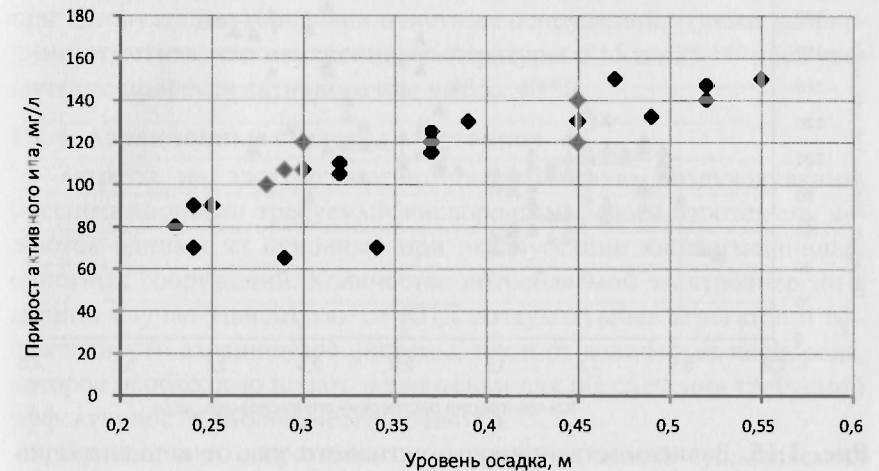
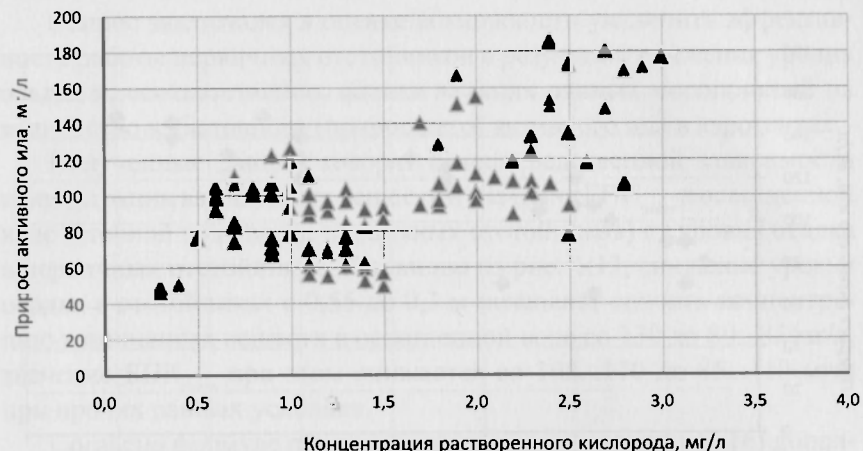


Рис. 1.14. Зависимость прироста активного ила от уровня осадка в первичных отстойниках

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<sub>полн</sub> — 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 воздухоудувками, обеспечивающими требуемый кислородный режим аэротенков, являются одними из основных при эксплуатации канализационных очистных сооружений. Количество потребляемой электроэнергии в данном случае зависит как от КПД воздухоудувных агрегатов и эффективности аэрационной системы, так и от количества кислорода, которое необходимо подать в аэротенки для обеспечения требуемой эффективности биологической очистки.

Применение современных энергоэффективных управляемых воздухоудувных машин 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

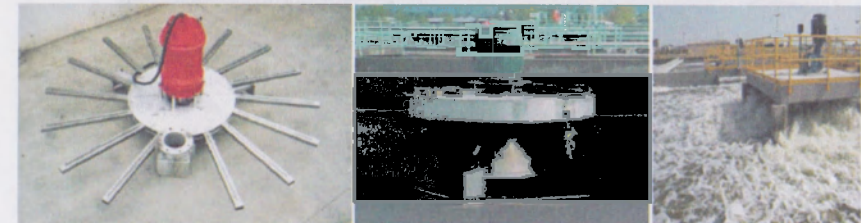
**Механические аэраторы.** Несмотря на разнообразие конструкций механических аэраторов, принцип их действия одинаков и основан на вовлечении атмосферного воздуха непосредственно в аэрируемую жидкость вращающимся оборудованием аэратора и перемешивании вовлеченного воздуха с массой жидкости, находящейся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

дуется 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.



А Б В

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, турбонагнетатели, 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).

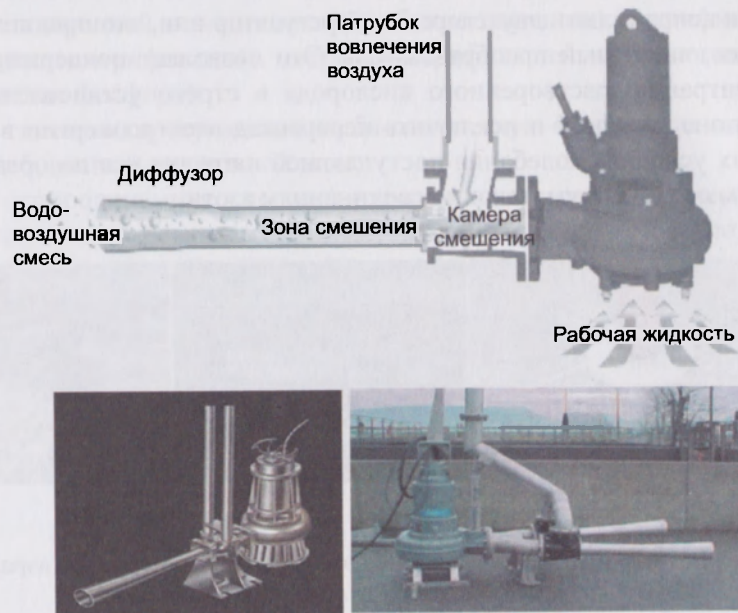


Рис. 1.18. Эжекторные аэраторы

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  $R_1$ :

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

Площадь поверхности пузырька воздуха радиусом  $R_1$ :

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

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

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

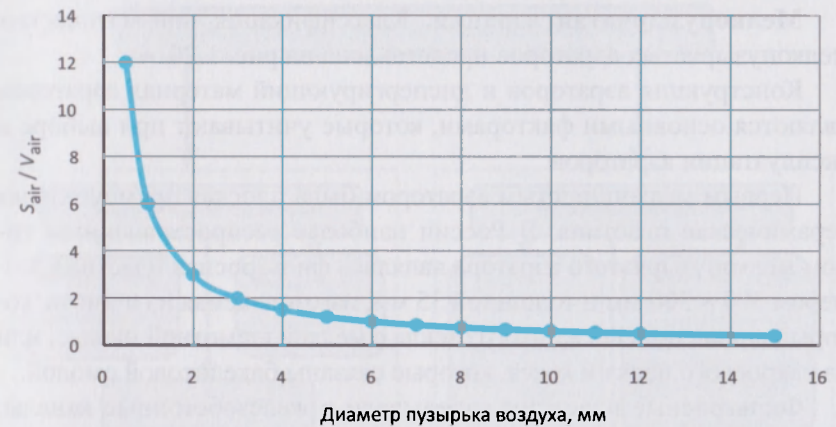


Рис. 1.19. Зависимость отношения площади поверхности пузырька воздуха к его объему от диаметра пузырька

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 воздушораспределения 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 непостоянно. 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.

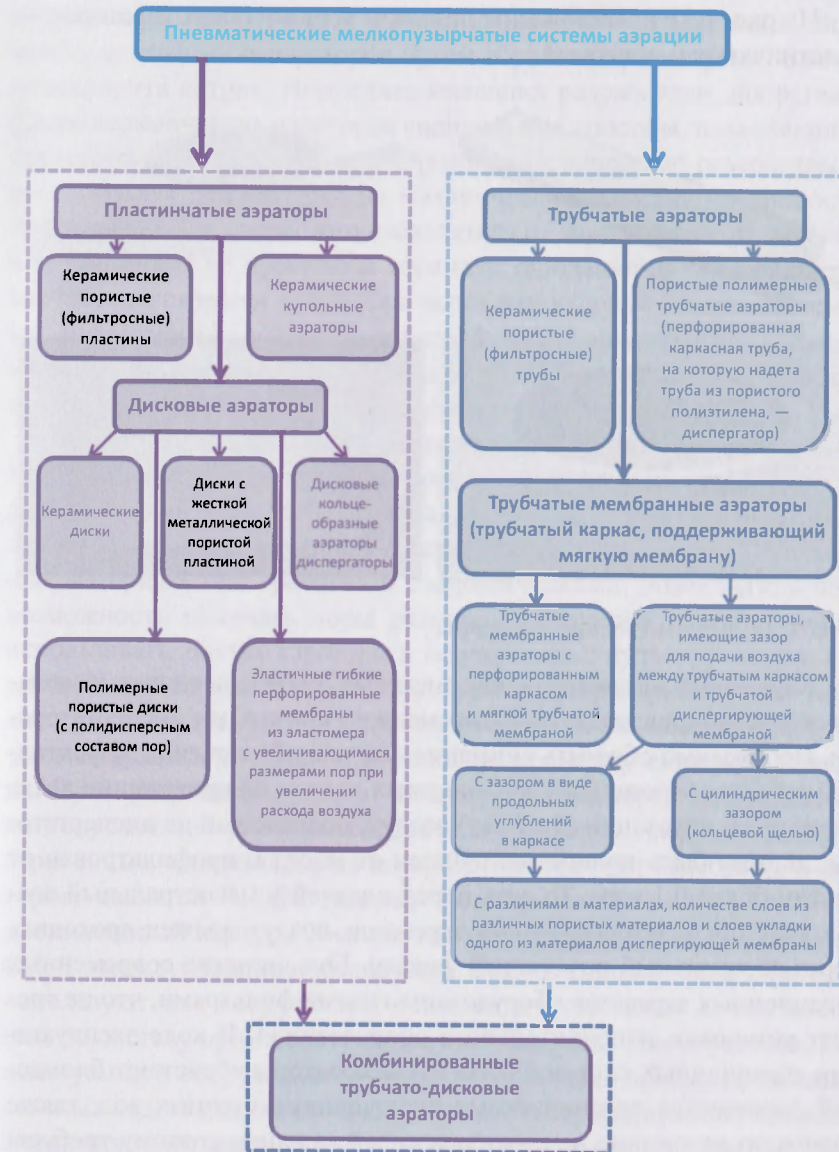


Рис. 1.20. Классификация пневматических мелкопузырчатых аэраторов

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  $[-CH_2CH_2-]_n-[CH(CH_2)CH_2-]_m$ , 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.

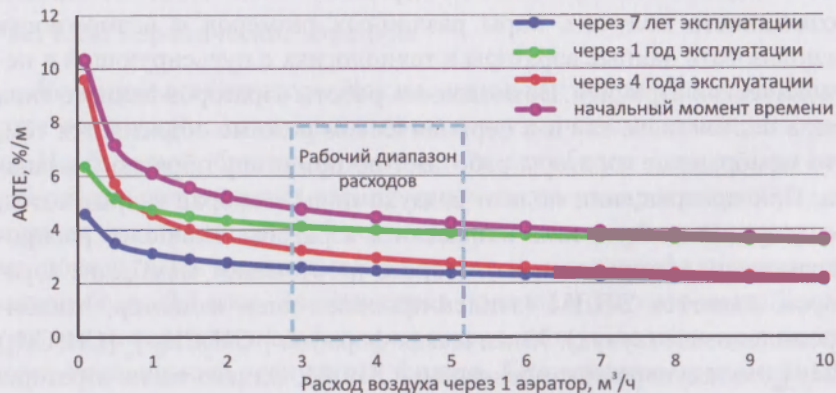
Примеры мембранных аэраторов представлены на рис. 1.22.



**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<sub>полн</sub> сточных вод, поступающих на биологическую очистку, мг/л;

$L_{ex}$  — значение БПК<sub>ст</sub> 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, м<sup>3</sup>/ч. При 100%-й (идеальной) эффективности использования кислорода воздуха расход воздуха на окисление органических соединений  $Q_{air,100\%}$ , м<sup>3</sup>/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/м<sup>3</sup>.

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

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

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 воздухоподъемных 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  $\mu_H$ , 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  $\mu_{H,0}$  — 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  $\mu_H$ , 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;

$\chi_A$  — температурный коэффициент Аррениуса, значение которого составляет 1,04...1,08 1/град.

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

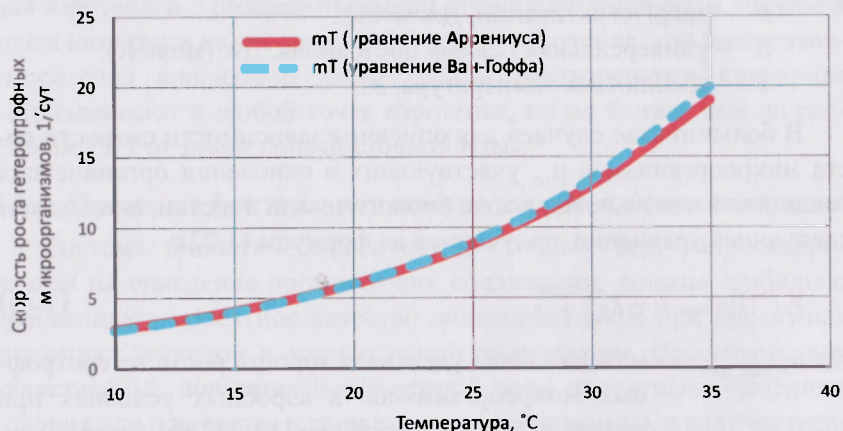
$$\mu_H = \mu_{H, \max, 20^\circ\text{C}} e^{\chi(T_i - 20)}, \quad (1.24)$$

где  $\chi$  — температурная константа, принимаемая 0,06...0,1 1/град [10].

На рис. 1.24 показаны расчетные зависимости скоростей роста микроорганизмов  $\mu_H$ , 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  $\rho_s$  прямо пропорциональна скорости роста микроорганизмов  $\mu_H$ :

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

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  $\rho_{s,max,calc}$  (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:

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

где  $Y_H$  — коэффициент прироста биомассы, г ХПК приростившей 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.

Расчитанный 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.

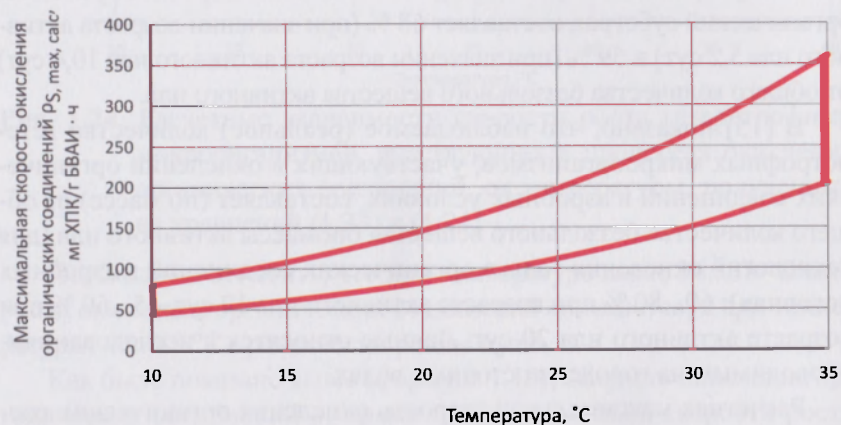


Рис. 1.25. Диапазон максимальных удельных скоростей окисления органических соединений (мг ХПК/г БВАИ·ч)

**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 °С, 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...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.

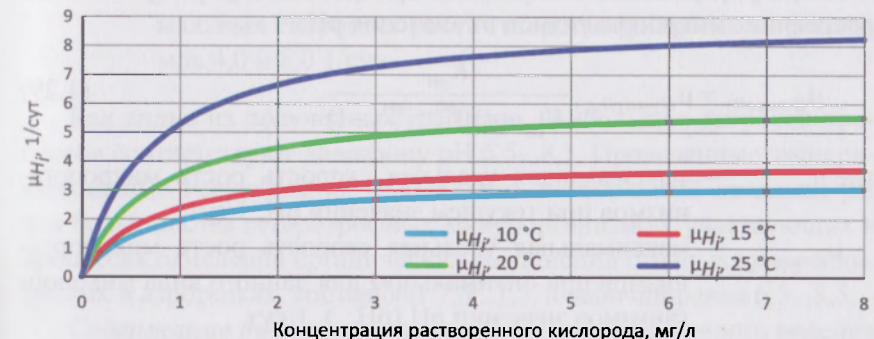


Рис. 1.26. Зависимость скоростей роста гетеротрофных микроорганизмов, участвующих в аэробном окислении органических соединений, от концентрации растворенного кислорода (при  $\frac{S_S}{S_S + K_S} \cong 1$ )

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;  $K_{SO} = 0,7$  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 pH.** Значение pH 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 pH:

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

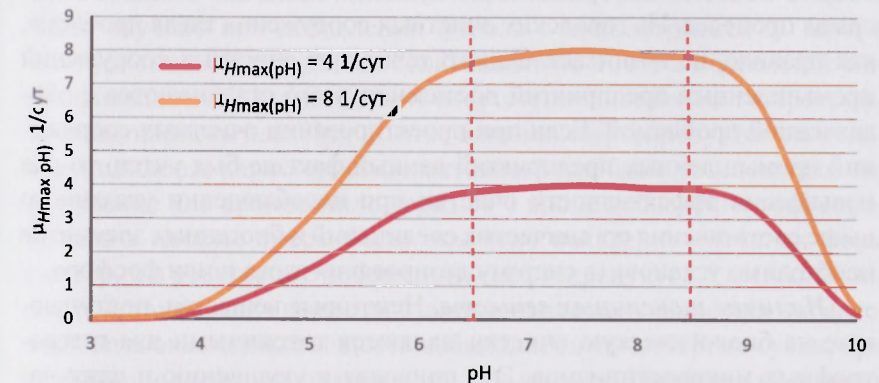
где  $\mu_{H \max(\text{pH})}$  — максимальная удельная скорость роста микроорганизмов при текущем значении pH, 1/сут;

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

Для большинства гетеротрофных микроорганизмов активного ила, участвующих в аэробных процессах окисления органических соединений сточных вод, оптимальное значение pH составляет 7...8 1/сут;  $K_{\text{pH}}$  — pH-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 pH 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 pH при максимальных скоростях роста гетеротрофных микроорганизмов 4,0 и 8,0 1/сут

Как видно из полученных графиков, наибольшие скорости процессов соответствуют диапазону pH 6,5...8,5. Проведенные экспериментальные исследования говорят, что оптимальный диапазон pH 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:  $\text{ХПК}_{\text{б/р}} : \text{N} : \text{P}$  как 100 : 5 : 1, где  $\text{ХПК}_{\text{б/р}}$  — биоразлагаемая часть органических соединений, выраженная через ХПК.

В Российской Федерации более привычным является соотношение, где биоразлагаемая часть органических соединений, содержащихся в сточных водах, определяется через БПК<sub>полн</sub>:

$$\text{БПК}_{\text{полн}} : \text{N} : \text{P} = 100 : 5 : 1.$$

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;<br>- доза активного ила в аэротенках превышает проектные значения | - Обеспечить проектную нагрузку на каждую единицу отстойников на проектном уровне;<br>- обеспечить проектное значение дозы активного ила на проектном уровне;<br>- 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 <sub>полн</sub> /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;<br>- при нагрузках по органическим соединениям менее 100...150 мг БПК <sub>полн</sub> /г БВАИ следует увеличить уровень осадка в первичных отстойниках до 0,4...0,6 м и снизить дозу активного ила на 30 %;<br>- при соотношениях БПК <sub>полн</sub> : 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;<br>- снизить уровень осадка во вторичных отстойниках до 0,1...0,2 м  |

### Окончание табл. 1.5

| Всплытие крупных скоплений активного ила темнокоричневого или черного цвета  | - Обеспечить концентрацию растворенного кислорода в иловой смеси, поступающей на вторичные отстойники, не менее 2,0 мг/л;<br>- снизить уровень осадка во вторичных отстойниках до 0,1...0,2 м;<br>- 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 <sub>полн</sub> 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 <sub>полн</sub> на выходе из вторичных отстойников при соответствии значения БПК <sub>полн</sub> 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;<br>- 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.

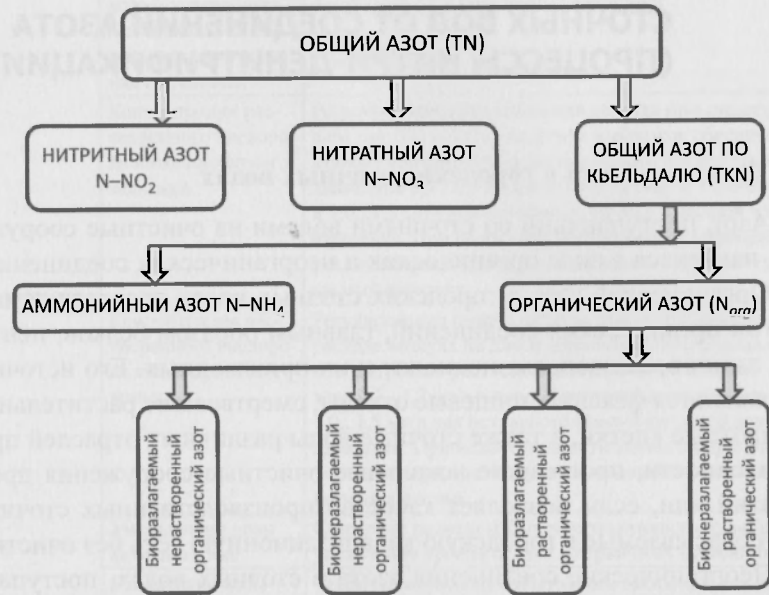
Органический азот в городских сточных водах является компонентом органических соединений, главным образом белков, пептидов, аминов, амидов, аминокислот и их производных. Его источником являются фекалии, пищевые отходы, омертвевшие растительные и животные клетки, а также сточные воды различных отраслей 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  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NH}_3$  (ион аммония и растворенный аммиак) и окисленными формами  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$  (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 анаэробно-активного протекания процессов 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 ( $N-NH_4$ ); когда pH среды достигает 8 и более, преобладает аммиачная форма азота ( $N-NH_3$ ).

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

2.2. Удаление соединений азота из сточных вод. Процессы биологической очистки

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<sub>4</sub> (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.

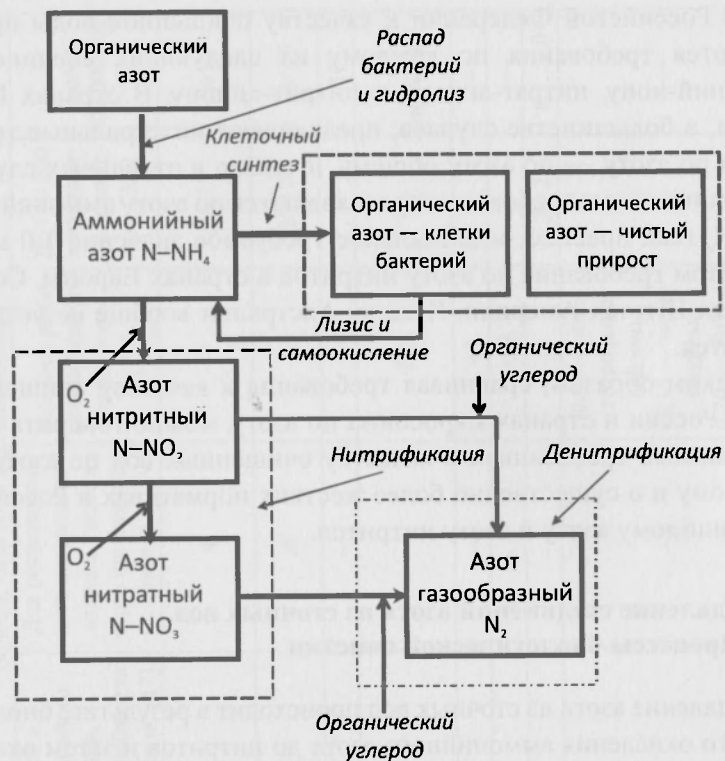
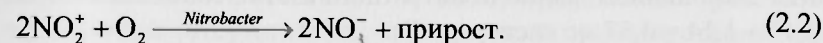
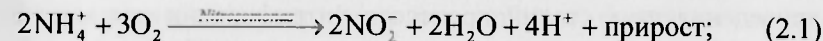


Рис. 2.2. Схема процессов удаления азота из сточных вод

### 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<sub>2</sub>). 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*.

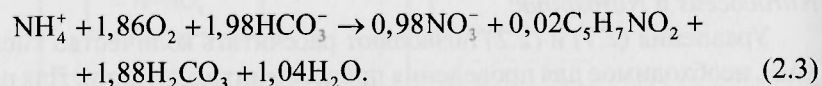
Уравнения (2.1) и (2.2) позволяют рассчитать количество кислорода, необходимое для проведения процесса нитрификации. Для первой стадии процесса, как видно из уравнения (2.1), на 2 моля NH<sub>4</sub> потребляется 3 моля O<sub>2</sub>. Масса двух молей азота (молярная масса азота 14 г/моль) составляет 2·14 = 28 г N-NH<sub>4</sub>, масса трех молей кислорода (молярная масса кислорода 32 г/моль) составляет 3·32 = 96 г O<sub>2</sub>. 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<sub>4</sub>, как видно из уравнения (2.1), образуется 2 моля NO<sub>2</sub>. Из уравнения (2.2) определяем, что на окисление двух молей NO<sub>2</sub> необходим 1 моль O<sub>2</sub>. Таким образом, в ходе второй стадии процесса нитрификации на окисление 2·14 = 28 мг N-NO<sub>2</sub> расходуется 1·32 = 32 мг O<sub>2</sub>, или на окисление 1 мг нитритов N-NO<sub>2</sub> в ходе второй стадии процесса нитрификации необходимо 1,14 мг кислорода O<sub>2</sub>. 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  $N-NH_4$ , для *Nitrobacter* это значение составляет 0,02...0,08 г БВАИ/г  $N-NO_2$ .

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  $N-NH_4$  образуется  $0,02 \cdot 113 = 2,26$  мг биомассы микроорганизмов ( $C_5H_7NO_2$ , молярная масса — 113 г/моль, или 113 мг/ммоль), или из 1 мг аммонийного азота  $N-NH_4$  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  $N-NH_4$  требуется 4,33 мг  $O_2$ , 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  $ICO_3^-$ , 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**  $\mu_1$ , 1/сут, в моделях ASM основываются на уравнениях Моно и имеют вид:

Для **первой стадии процесса нитрификации**:

$$\mu_{A1} = \mu_{\max,A1} \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{S,NH_4,A}} \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{S,O_2,A}} - b_{A1}, \quad (2.4)$$

где  $\mu_{A1}$  — 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;

$K_{S,NH_4,A}$  — константа полунасыщения по аммонийному азоту, мг N-NH<sub>4</sub>/л;

$S_{NH_4}$  — текущая концентрация N-NH<sub>4</sub>, мг/л;

$K_{S,O_2,A}$  — 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:

$$\mu_{A2} = \mu_{\max,A2} \frac{S_{NO_2}}{S_{NO_2} + K_{S,NO_2,A}} \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{S,O_2,A}} - b_{A2}, \quad (2.5)$$

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

$\mu_{\max,A2}$  — максимальная удельная скорость роста нитрифицирующих бактерий 2-й стадии процесса нитрификации, 1/сут;

$K_{S,NO_2,A}$  — константа полунасыщения по азоту нитритов, мг N-NO<sub>2</sub>/л;

$S_{NO_2}$  — текущая концентрация N-NO<sub>2</sub>, мг/л;

$K_{S,O_2,A2}$  — константа полунасыщения по кислороду для 2-й стадии процесса нитрификации, мг/л;

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

$b_{A2}$  — константа распада нитрифицирующих микроорганизмов 2-й стадии процесса нитрификации, 1/сут.

Кинетические константы процессов нитрификации зависят от качественных характеристик сточных вод, поступающих на биологическую очистку, и технологических и конструктивных решений организации процессов биологической очистки. В табл. 2.3 представлены некоторые значения кинетических констант суммарного процесса обеих стадий нитрификации, полученные различными исследователями на различных по составу сточных водах.

**Таблица 2.3.** Кинетические константы процессов нитрификации (при 20 °С)

| Константа              | [25, 26]    | [27]        | [28]      | [29, 30]    |
|------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| $\mu_{\max,A}$ , 1/сут | 0,34...0,65 | 0,33...0,65 | 0,8...1,0 | 0,45...0,52 |
| $K_{S,NH_4,A}$ , мг/л  | 0,6...3,6   | 1,0         | 0,6       | 1,1         |
| $K_{S,O_2,A}$ , мг/л   | 0,5...2,0   | —           | —         | 1,1...1,9   |
| $b_A$ , 1/сут          | 0,05...0,15 | 0,04        | 0,0       | 0,11        |

Даже для городских сточных вод данные только небольшого количества исследователей показывают (см. табл. 2.3), что максимальные скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов могут отличаться для различных городских сточных вод в несколько раз, что приводит к соответствующей разнице в скоростях процессов и, соответственно, в расчетных объемах сооружений.

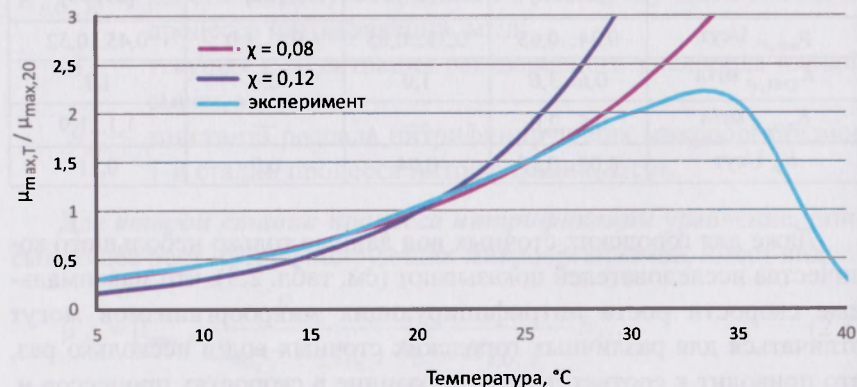
Уравнения (2.4) и (2.5) описывают зависимости скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов от текущей концентрации

субстратов и концентрации растворенного кислорода. Однако на скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов влияет также и температура иловой смеси. Скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов  $\mu_{\max,A}(T^{\circ}\text{C})$  (как 1-й, так и 2-й стадии) при текущей температуре иловой смеси  $T$  можно описать с помощью уравнения Вант-Гоффа:

$$\mu_{\max,A}(T^{\circ}\text{C}) = \mu_{\max,A}(20^{\circ}\text{C}) e^{\chi(T-20)}, \quad (2.6)$$

где  $\mu_{\max,A}(20^{\circ}\text{C})$  — максимальная скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов (при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ ), 1/сут;  
 $\chi$  — температурная константа, 1/град.

Результаты расчета скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии процесса нитрификации, выполненного по уравнению (2.6), представлены на рис. 2.3. Расчет проведен для значений  $\chi = 0,08$  1/°C и  $\chi = 0,12$  1/°C, которые были приняты в соответствии с данными экспериментальных исследований по определению температурных констант данного процесса [26]. Также на графике представлены результаты экспериментов, в ходе которых определялись скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии процесса нитрификации [26].



**Рис. 2.3.** Зависимость скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии процесса нитрификации от температуры

Как видно из рис. 2.3, выражение (2.6) применимо для описания зависимости скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии процесса нитрификации от температуры в диапазоне от  $5$  до  $20...25^{\circ}\text{C}$  (в зависимости от значения  $\chi$ ).

Как показывают экспериментальные исследования зависимости скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов от текущей температуры иловой смеси, максимальные скорости процессов достигаются при температуре  $32...35^{\circ}\text{C}$ , и при дальнейшем повышении температуры скорости начинают резко снижаться.

Из теории биохимических процессов [31] известно, что изменение количества субстрата пропорционально скорости роста микроорганизмов, участвующих в данном процессе:

$$\rho_{j,S} = \frac{1}{Y_{j,\max}} \mu_j X_B, \quad (2.7)$$

где  $\rho_{j,S}$  — скорость изменения субстрата  $S$  в ходе рассматриваемого  $j$ -го биохимического процесса, мг/л·сут;

$X_B$  — концентрация биомассы микроорганизмов, участвующих в рассматриваемом  $j$ -м биохимическом процессе, мг/л;

$\mu_j$  — текущая удельная скорость роста микроорганизмов, участвующих в рассматриваемом  $j$ -м биохимическом процессе, 1/сут;

$Y_{j,\max}$  — максимальный коэффициент прироста микроорганизмов, участвующих в рассматриваемом  $j$ -м биохимическом процессе, мг/мг.

В табл. 2.4 приведены значения кинетических констант, используемых в уравнениях нитрификации (2.4)—(2.6). Необходимо отметить, что данные значения были получены авторами [26, 32] для исследуемых ими городских сточных вод, при этом необходимо иметь в виду, что все кинетические константы биохимических процессов являются специфическими для различных типов сточных вод. В ходе как проектирования очистных сооружений, так и их эксплуатации эти константы требуют определения (корректировки). При невозможности проведения работ по определению значений кинетических констант допускается для расчетов на

стадии проектирования использовать значения констант, которые были определены для сточных вод аналогичного состава.

**Таблица 2.4.** Значение кинетических констант процессов нитрификации (при 20 °С) [26, 32]

| Константа                | Значения    |
|--------------------------|-------------|
| $\mu_{\max, A1}$ , 1/сут | 0,34...0,8  |
| $K_{S, NH_4, A1}$ , мг/л | 0,6...3,6   |
| $K_{S, O_2, A1}$ , мг/л  | 0,5...2,0   |
| $b_{A1}$ , 1/сут         | 0,05...0,15 |
| $\mu_{\max, A2}$ , 1/сут | 0,6...1,0   |
| $K_{S, NO_2, A2}$ , мг/л | 0,8...1,2   |
| $K_{S, O_2, A2}$ , мг/л  | 0,5...1,5   |
| $b_{A2}$ , 1/сут         | 0,03...0,06 |
| $\chi_1$ , 1/град        | 0,08...0,12 |
| $\chi_2$ , 1/град        | 0,07...0,10 |

С учетом выражений (2.4)—(2.7) получаем следующие зависимости скоростей нитрификации от условий проведения процессов:

Для первой стадии процесса нитрификации:

$$\rho_{A1} = \frac{1}{Y_{A1}} (\mu_{\max, A1(20^\circ C)} e^{\chi_1(T-20)} \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{S, NH_4, A1}} \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{S, O_2, A1}} - b_{A1}) X_{B, A1}, \quad (2.8)$$

где  $\rho_{A1}$  — текущая скорость 1-й стадии процесса нитрификации (окисление аммония до нитритов), мг/г БВАИ·сут;

$Y_{A1}$  — коэффициент прироста нитрифицирующей биомассы для аммоний-окисляющих микроорганизмов (микроорганизмов 1-й стадии процессов нитрификации), г ХПК/г N-NH<sub>4</sub>;

$\mu_{\max, A1(20^\circ C)}$  — максимальная удельная скорость роста нитрифицирующих бактерий 1-й стадии процесса нитрификации при температуре 20 °С, 1/сут;

$K_{S, NH_4, A}$  — константа полунасыщения по аммонийному азоту, мг N-NH<sub>4</sub>/л;

$S_{NH_4}$  — текущая концентрация N-NH<sub>4</sub>, мг/л;

$K_{S, O_2, A1}$  — 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;

$X_{B, A1}$  — концентрация нитрифицирующей биомассы активного ила, участвующей в 1-й стадии процесса нитрификации, г ХПК/л.

Для второй стадии процесса нитрификации:

$$\rho_{A2} = \frac{1}{Y_{A2}} (\mu_{\max, A2(20^\circ C)} e^{\chi_2(T-20)} \frac{S_{NO_2}}{S_{NO_2} + K_{S, NO_2, A2}} \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{S, O_2, A2}} - b_{A2}) X_{B, A2}, \quad (2.9)$$

где  $\rho_{A2}$  — текущая скорость 2-й стадии процесса нитрификации (окисление нитритов до нитратов), мг/г БВАИ·сут;

$Y_{A2}$  — коэффициент прироста нитрифицирующей биомассы для нитрит-окисляющих микроорганизмов (микроорганизмов 2-й стадии процесса нитрификации), г ХПК/г N-NO<sub>2</sub>;

$\mu_{\max, A2(20^\circ C)}$  — максимальная удельная скорость роста нитрифицирующих бактерий 2-й стадии процесса нитрификации при 20 °С, 1/сут;

$K_{S, NO_2, A}$  — константа полунасыщения по азоту нитритов, мг N-NO<sub>2</sub>, мг/л;

$S_{NO_2}$  — текущая концентрация N-NO<sub>2</sub>, мг/л;

$K_{S, O_2, A2}$  — константа полунасыщения по кислороду для 2-й стадии процесса нитрификации, мг/л;

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

$b_{A2}$  — константа распада нитрифицирующих микроорганизмов 2-й стадии процесса нитрификации, 1/сут;

$X_{B,A2}$  — концентрация нитрифицирующей биомассы активного ила, участвующей во 2-й стадии процесса нитрификации, г ХПК/л.

Уравнения (2.8) и (2.9) позволяют определить основные факторы, влияющие на скорость и эффективность процессов нитрификации как первой, так и второй стадий.

### 2.2.3. Нитрификация.

#### Факторы, влияющие на эффективность процесса

Концентрация растворенного кислорода, как следует из формул (2.4) и (2.5), существенно влияет на скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов и, как следствие, пропорционально — на скорости процессов нитрификации (уравнения (2.8) и (2.9)). На рис. 2.4 приведены результаты расчетов, выполненных по уравнениям (2.4) и (2.5) для условия, когда лимитирующим фактором является концентрация растворенного кислорода. Значения кинетических констант приняты из табл. 2.4.

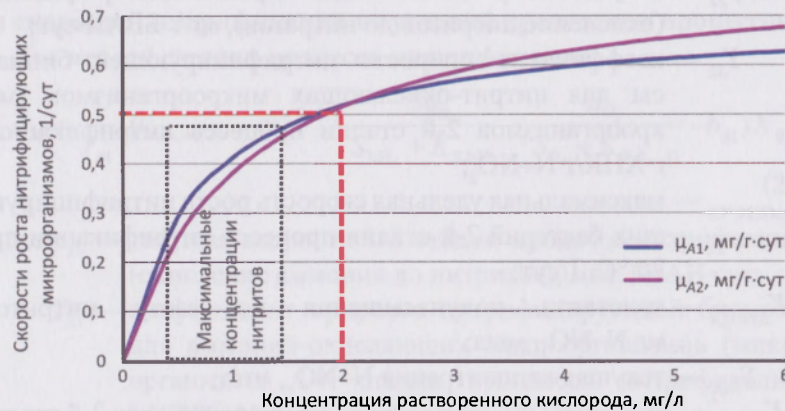


Рис. 2.4. Зависимость скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов 1-й  $\mu_{A1}$  и 2-й  $\mu_{A2}$  стадий процесса нитрификации от концентраций растворенного кислорода

Концентрация растворенного кислорода является определяющим фактором реализации процессов нитрификации обеих стадий. Особенно чувствительны к недостаточному количеству кислорода бактерии, участвующие в процессе окисления нитритов до нитратов, то есть нитрифицирующие микроорганизмы 2-й стадии. Как видно из рисунка 2.4, при концентрациях растворенного кислорода ниже 2 мг/л скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии выше, чем скорости роста микроорганизмов 2-й стадии.

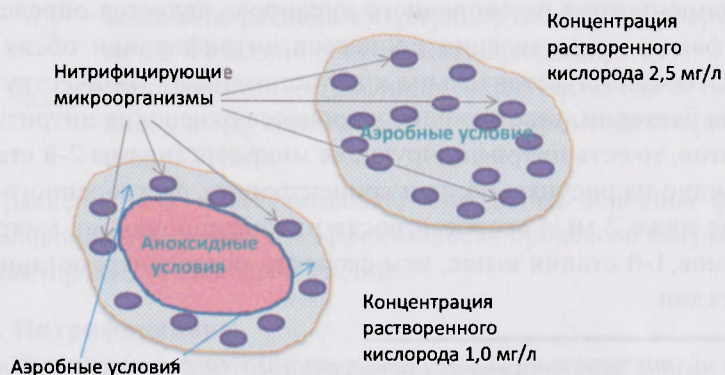
*При низких концентрациях растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенков скорости образования нитритов превышают скорости окисления нитритов до нитратов, что ведет к увеличению концентрации нитритов в очищенной воде до 1...5 мг/л. При эксплуатации аэротенков, работающих по технологии глубокой нитрификации, концентрация растворенного кислорода должна быть не менее 2,0 мг/л.*

Как видно из графика, увеличение концентрации растворенного кислорода с 2,0 до 4,0 мг/л приводит к увеличению скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов лишь на 20 %, поэтому является неоправданным с точки зрения эксплуатационных затрат методом интенсификации процессов нитрификации.

Концентрация растворенного кислорода 2,0...2,5 мг/л является оптимальной при реализации процессов нитрификации.

На рис. 2.5 показано схематичное распределение кислородных условий внутри хлопка активного ила [32] в ходе реализации процесса нитрификации.

При концентрации растворенного кислорода в иловой смеси более 2,0 мг/л внутри всего хлопка активного ила создаются аэробные условия, что дает возможность развития нитрифицирующих микроорганизмов во всем хлопке активного ила. В этом случае для развития нитрифицирующих микроорганизмов используется 100 % объема аэробной зоны сооружения (рис. 2.5).



**Рис. 2.5.** Кислородные условия внутри хлопка активного ила при различных концентрациях растворенного кислорода в иловой смеси

При концентрациях растворенного кислорода в иловой смеси 1,0...1,5 мг/л аэробные условия для роста нитрифицирующих микроорганизмов создаются только на периферии хлопка активного ила. В периферийном объеме хлопка активного ила реализуются процессы нитрификации, в результате которых образуются нитраты. Во внутреннем объеме хлопка ила растворенный кислород отсутствует, но присутствуют нитраты, образованные во внешнем объеме хлопка ила. Таким образом, во внутренней области хлопка ила создаются аноксидные условия, в которых рост нитрифицирующих микроорганизмов не происходит. В результате при концентрации растворенного кислорода 1,0...1,5 мг/л для развития нитрифицирующих микроорганизмов используется не все 100 % объема аэробной зоны, что приводит к снижению в несколько раз эффективности процесса нитрификации.

*Уменьшение диаметра хлопка активного ила и/или повышение эффективности перемешивания иловой смеси в аэротенках позволяет повысить эффективность процессов нитрификации без увеличения эксплуатационных затрат на аэрацию.*

**Температура сточных вод** является одним из основных факторов, влияющих на протекание реакций нитрификации. На рис. 2.6 представлена зависимость скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов, участвующих в 1-й и 2-й стадиях процессов нитрификации, от температуры сточных вод, рассчитанная нами по формуле (2.6) и с учетом значений кинетических констант из табл. 2.4.



**Рис. 2.6.** Зависимость скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов 1-й и 2-й стадий процесса нитрификации от температуры сточных вод

Как видно из графика, при температуре сточных вод ниже 15...17 °C скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии, участвующих в процессе окисления  $\text{NH}_4$  до  $\text{NO}_2$ , выше, чем скорость роста микроорганизмов 2-й стадии, участвующих в процессах окисления  $\text{NO}_2$  до  $\text{NO}_3$ . В результате происходит накопление нитритов, и, как следствие, концентрация нитритов в очищенной воде увеличивается. Концентрация нитритов в очищенной воде при низких температурах может повышаться до 3 мг/л и более в случае, если не проводился расчет сооружений на качество очистки до  $\text{N-NO}_2 = 0,02$  мг/л при минимальных температурах сточных вод, характерных для рассматриваемых условий.

Следует отметить, что температура, при которой проводится процесс биологической очистки, является параметром, на который практически невозможно влиять при эксплуатации производственных сооружений.



*Искусственное повышение температуры поступающих на биологическую очистку сточных вод или иловой смеси непосредственно в сооружениях требует значительных эксплуатационных затрат, и к такому методу прибегают, как правило, при наличии на производстве своих собственных теплоносителей.*

**Аэробный возраст активного ила** является базовым критерием расчета аэротенков при реализации процесса нитрификации. При эксплуатации сооружений важно различать понятия «общий возраст активного ила» и «аэробный возраст активного ила». Общий возраст активного ила представляет собой промежуток времени, за который происходит полное обновление активного ила в сооружениях биологической очистки сточных вод [1]. Аэробный возраст активного ила — промежуток времени, за который происходит полное обновление аэробного активного ила в сооружениях очистки сточных вод. Аэробный активный ил — это сообщество зоогенных колоний бактерий и простейших организмов, которые развиваются в аэробных условиях.

Аэробный возраст активного ила, как и общий возраст активного ила, измеряется в сутках. Обеспечение проектного значения аэробного возраста активного ила является ответственностью инженеров, эксплуатирующих очистные сооружения. Возраст ила влияет на то, в какой форме ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) азот будет содержаться в биологически очищенной воде. Например, при аэробном возрасте ила от 4 до 6 сут в активном иле, как правило, доминируют бактерии рода *Nitrosomonas*. Поддержание аэробного возраста ила в пределах этих значений будет приводить к доминированию нитрита в качестве продукта нитрификации, и, как следствие, после биологической очистки будет наблюдаться превышение значений нитритов над проектными значениями.

При эксплуатации очистных сооружений следует постоянно (ежедневно) контролировать фактические значения общего и аэробного возрастов активного ила.

**Общий возраст активного ила** ( $\text{SRT}_{\text{от}}$  — Sludge Retention Time Total)  $\theta_{\text{от}}$  представляет собой отношение количества активного ила,

находящегося в системе (в аэротенках, регенераторах, вторичных отстойниках, каналах иловой смеси и возвратного активного ила), к количеству отводимого активного ила:

$$\theta_{\text{от}} = \frac{N_{\text{aer}} V_{\text{aer}} X_{\text{aer}} + N_{\text{reg}} V_{\text{reg}} X_{\text{reg}} + V_{\text{chan}} X_{\text{chan}} + V_{\text{sl.ST}} X_{\text{sec.ST}}}{X_{\text{was}} Q_{\text{was}}}, \quad (2.10)$$

- где  $N_{\text{aer}}$  — количество работающих аэротенков;  
 $V_{\text{aer}}$  — объем одного аэротенка,  $\text{м}^3$ ;  
 $X_{\text{aer}}$  — доза активного ила в аэротенках (средняя по всем аэротенкам),  $\text{г/л}$ ;  
 $N_{\text{reg}}$  — количество работающих регенераторов;  
 $V_{\text{reg}}$  — объем одного регенератора,  $\text{м}^3$ ;  
 $X_{\text{reg}}$  — доза активного ила в регенераторах (средняя по всем регенераторам),  $\text{г/л}$ ;  
 $V_{\text{chan}}$  — объем всех каналов активного ила,  $\text{м}^3$ ;  
 $X_{\text{chan}}$  — доза активного ила в каналах (средняя по всем каналам),  $\text{г/л}$ ;  
 $V_{\text{sl.ST}}$  — общий объем ила во вторичных отстойниках,  $\text{м}^3$ ;  
 $X_{\text{sec.ST}}$  — доза активного ила во вторичных отстойниках (средняя по всем отстойникам),  $\text{г/л}$ ;  
 $X_{\text{was}}$  — доза избыточного активного ила,  $\text{г/л}$ ;  
 $Q_{\text{was}}$  — расход избыточного активного ила,  $\text{м}^3/\text{сут}$ .

В ходе эксплуатационного контроля сооружений предлагается использовать более простую формулу, которая не учитывает количество активного ила во вторичных отстойниках, каналах иловой смеси и каналах возвратного активного ила. Это связано с тем, что определение точного количества активного ила во вторичных отстойниках или не представляется возможным, или являет собой достаточно трудозатратный процесс. При этом количество активного ила во вторичных отстойниках составляет не более 1...2 % от количества ила в аэротенках и регенераторах, количество же активного ила в каналах вообще составляет десятые доли процента от количества активного ила, находящегося в аэротенках и регенераторах.

При расчете общего возраста ила предлагается следующая простая формула:

$$G_{tot} = \frac{N_{aer} V_{aer} X_{aer} + N_{reg} V_{reg} X_{reg}}{X_{was} Q_{was}} \quad (2.11)$$

Аэробный возраст активного ила  $\theta_a$  ( $SRT_{aerob}$ ) в ходе эксплуатации сооружений рассчитывается по формуле:

$$\theta_a = \frac{N_{aerob} V_{aerob} X_{aerob}}{X_{was} Q_{was}}, \quad (2.12)$$

где  $N_{aerob}$  — количество аэробных зон всех аэротенков;  
 $V_{aerob}$  — объем аэробной зоны одного аэротенка, м<sup>3</sup>;  
 $X_{aerob}$  — доза активного ила в аэробной зоне, г/л.

Расчет значений общего и аэробного возрастов активного ила в ходе эксплуатации сооружений проводится по среднесуточным данным для фактической дозы активного ила в сооружениях, фактической дозы избыточного активного ила и расхода избыточного активного ила за предыдущие сутки.

*Данные о возрасте ила обновляются один раз в сутки, этот параметр является одним из наиболее важных технологических параметров. Обеспечение требуемого возраста активного ила регулируется расходом избыточного ила.*

Возраст активного ила, который необходимо поддерживать в ходе эксплуатации сооружений, определяется на стадии проектирования с учетом качественных показателей поступающих сточных вод, требований к качеству очищенной воды, расчетной температуры иловой смеси и реализуемой технологии биологической очистки. При проектировании очистных сооружений аэробный возраст активного ила определяется как величина, обратная расчетному значению скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов:

$$\theta_{a,A1} = \frac{1}{\mu_{A1}}; \quad (2.13)$$

$$\theta_{a,A2} = \frac{1}{\mu_{A2}}. \quad (2.14)$$

Определив из выражений (2.4)—(2.6) скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов, из уравнений (2.13) и (2.14) определяют минимальные значения аэробного возраста активного ила, обеспечивающие качество очищенной воды как по  $N-NH_4$  ( $\theta_{a,A1}$ ), так и по  $N-NO_2$  ( $\theta_{a,A2}$ ). Далее из двух полученных значений  $\theta_{a,A1}$  и  $\theta_{a,A2}$  определяется максимальное, которое и принимается за расчетное значение аэробного возраста активного ила  $\theta_a$  при расчете и проектировании аэротенков.

Для расчета сооружений принимается проектное значение аэробного возраста активного ила, которое определяется как произведение значения возраста активного ила, полученного из формул (2.13) и (2.14), на коэффициент надежности  $SF$ :

$$\theta_{a,design} = \theta_a SF, \quad (2.15)$$

где  $SF$  — фактор надежности, значение которого зависит от состава сточных вод, кратковременных изменений температуры сточных вод и/или pH среды, которые влекут за собой изменения значений максимальных скоростей роста нитрифицирующих бактерий, и требований к качеству очищенной воды по аммонийному азоту и азоту нитритов.

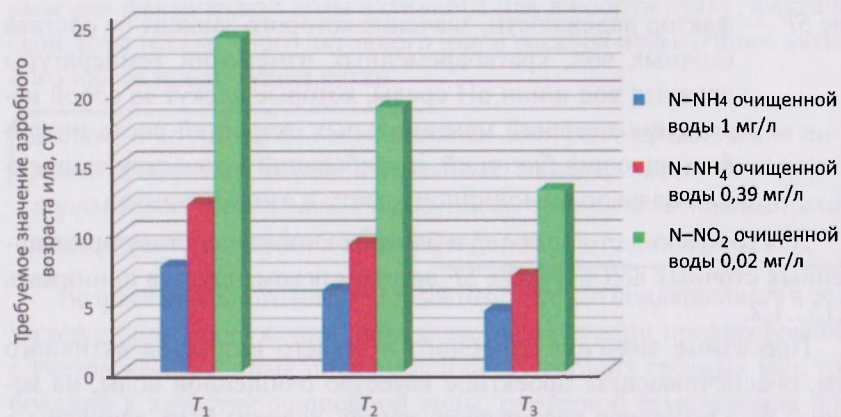
Для городских сточных вод и близких к ним по составу промышленных сточных вод значение  $SF$  автором рекомендуется принимать 1,15...1,2.

Проектные значения аэробного и общего возрастов активного ила, обеспечивающие проектное качество очищенной воды, на которые был выполнен расчет сооружений, должны быть записаны в Технологическом регламенте очистных сооружений, и поддержание их проектных значений в ходе работы сооружений — ответственность эксплуатирующего персонала.

Как было показано в табл. 2.2, разница в требованиях к качеству очищенной воды в России и странах Евросоюза существенна. В большинстве стран к качеству очищенных вод предъявляются требования только по общему азоту и в отдельных случаях — дополнительные требования по азоту аммонийному. Требования по азоту нитритов практически во всех странах не устанавливаются.

Продemonстрируем, как разница в требованиях к очищенной воде по аммонийному азоту и азоту нитритов отражается на объемах сооружений, которые позволяют достичь необходимого качества очищенной воды.

На рис. 2.7 представлены результаты проведенного нами расчета значений аэробного возраста активного ила, при которых обеспечивается следующее качество очищенной воды: аммонийный азот 1 мг/л, качество очищенной воды по азоту нитритов не лимитируется (сценарий 1 — синие гистограммы); аммонийный азот 0,39 мг/л и качество очищенной воды по азоту нитритов не лимитируется (сценарий 2 — красные гистограммы); аммонийный азот 0,39 мг/л и азот нитритов 0,02 мг/л (сценарий 3 — зеленые гистограммы). Расчеты каждого сценария выполнены для различных температур  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ .



**Рис. 2.7.** Значения аэробного возраста активного ила для различных значений температуры иловой смеси при прочих равных условиях

Из представленных результатов видно, что если для обеспечения требуемых нормативов качества очищенной воды по аммонийному азоту ( $N-NH_4 = 1,0$  мг/л) для европейских стран значение аэробного возраста активного ила должно составлять (в диапазоне рабочих температур иловой смеси  $T_1...T_3$ ) 5...8 сут, то для выполнения рос-

сийских требований по аммонийному азоту ( $N-NH_4 = 0,39$  мг/л) значения аэробного возраста активного ила должны быть 7...12 сут для рассматриваемого диапазона температур. Однако данные значения аэробного возраста активного ила не позволяют обеспечить требования к качеству очищенной воды по азоту нитритов (при сценарии 2 значения аэробного возраста активного ила обеспечивают качество очищенной воды по азоту нитритов только 0,07...0,11 мг/л, что в 3,5...5,5 раз выше требуемых значений).

*Для обеспечения требуемого российскими нормами качества очищенной воды по азоту нитритов (0,02 мг/л) значение аэробного возраста активного ила для рассматриваемых сточных вод должно составлять 13...24 сут в аналогичном диапазоне температур иловой смеси. На данный факт необходимо обращать внимание при выборе метода расчета аэротенков.*

В настоящее время при проектировании сооружений биологической очистки, работающих по технологии удаления азота и фосфора, многие проектные организации используют методику расчета аэротенков Standard ATV-DVWK-A131 E. Dimension of Single-Stage Activated Sludge Plants 2000 [33]. Данная методика используется сегодня в странах Евросоюза для расчета сооружений биологической очистки городских сточных вод, хотя параллельно применяются и другие методы расчета. Это комплексная методика, позволяющая рассчитывать сооружения биологической очистки сточных вод, работающие по различным технологическим схемам. Данная методика используется в западных странах более 10 лет и прошла испытание временем.

В основу данной методики (разделы расчетов аэротенков) положены эмпирические зависимости, которые являются следствием расчетов по формулам ферментативной кинетики процессов, в том числе и указанной выше модели ASM 2d. При этом расчет проводится на качественные показатели очищенной воды, соответствующие стандартам западных стран, а именно на общий азот — 10 мг/л и аммонийный азот — 1 мг/л.

Расчет минимального аэробного возраста активного ила  $\theta_{a,design}$ , определяющего объем зоны нитрификации, в ATV-DVWK-A131 E производится по формуле

$$\theta_{a,design} = SF \cdot 3,4 \cdot 1,103^{15-T}, \quad (2.16)$$

где 3,4 — произведение величины, обратной значению максимальной скорости роста аммоний-окисляющих бактерий *Nitrosomonas* при 15 °С, и коэффициента запаса, равного 1,6 сут;

$T$  — температура иловой смеси в биологическом реакторе, °С.

Формула (2.16) ATV-DVWK-A131 E дает минимальный аэробный возраст активного ила, который обеспечивает концентрацию аммонийного азота очищенной воды 1 мг/л, что существенно ниже, чем значение аэробного возраста ила, необходимое для достижения значений  $N-NH_4$  и  $N-NO$ , в очищенной воде, равных соответственно 0,39 и 0,02 мг/л. Этот нюанс становится решающим для определения необходимого объема аэротенков при проектировании и строительстве комплекса очистных сооружений.

При расчете аэробной зоны аэротенка  $V_{aerob}$  для городских сточных вод лимитирующим фактором является, как правило, обеспечение требуемого для процесса нитрификации аэробного возраста активного ила  $\theta_{a,design}$ .

Из формул (2.12) и (2.15) требуемый суммарный объем аэробной зоны аэротенка  $V_{aerob}$ , м<sup>3</sup>:

$$V_{aerob} = \frac{\theta_a SF X_{was} Q_{was}}{X_{aer}}. \quad (2.17)$$

Таким образом, для обеспечения требуемого качества очищенной воды, соответствующего российскому законодательству, объем аэробной зоны аэротенка должен быть значительно выше, чем для аналогичных сооружений, работающих в странах Евросоюза, где требования к качеству очищенных вод существенно мягче.

Формула (2.17) представляет собой линейную зависимость между требуемым аэробным возрастом активного ила и объемом аэробной зоны аэротенка. Как видно из формулы,

уменьшить аэробную зону аэротенка возможно при уменьшении прироста активного ила и/или повышении дозы активного ила в сооружении.

Кислотность среды оказывает определяющее влияние на скорость роста всех микроорганизмов, участвующих в процессах биологической очистки сточных вод.

Оптимальные значения pH для реализации обеих стадий процесса нитрификации составляют 7,0...8,5. Оптимум pH для нитрифицирующих микроорганизмов 1-й стадии процесса нитрификации (для *Nitrosomonas*) составляет 7,0...8,3, для нитрифицирующих бактерий 2-й стадии процесса (*Nitrobacter*) — 7,0...9,3.

При значениях pH менее 7 скорости нитрификации замедляются, а при pH ниже 6 процесс практически останавливается.

При значениях pH более 9,3 наблюдается резкое снижение скоростей нитрификации, а при pH, близких к 10, скорости процессов нитрификации снижаются практически до нуля (рис. 2.8).

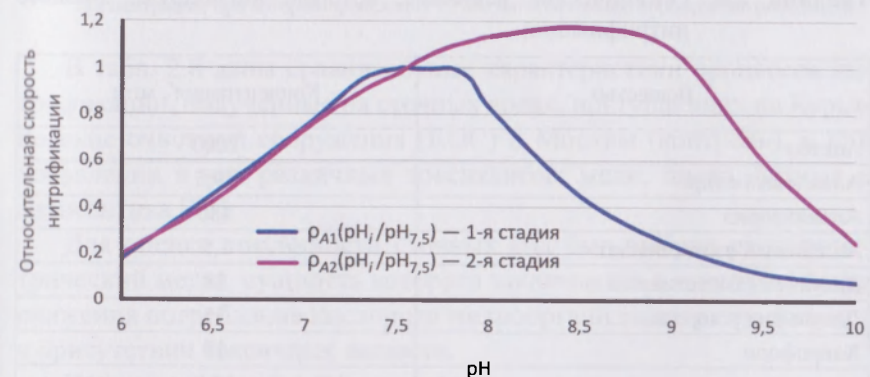


Рис. 2.8. Зависимость скоростей 1-й и 2-й стадий процесса нитрификации от текущего значения pH

**Ингибирующие вещества** оказывают более сильное действие на нитрифицирующие микроорганизмы, чем на гетеротрофные бактерии. В табл. 2.5 приведены данные по ингибирующему воздействию на процесс нитрификации некоторых металлов [34].

**Таблица 2.5.** Ингибирующее воздействие некоторых металлов на процессы нитрификации

| Металл | Концентрация, мг/л | Оказываемое воздействие                                       |
|--------|--------------------|---|
| Cu     | 4                  | Заметного ингибирующего влияния на активный ил не наблюдается |
| Cu     | 150                | 75%-е ингибирование активности ила                            |
| Ni     | Более 0,25         | Ингибирование роста <i>Nitrosomonas</i> (для чистой культуры) |
| Cr 3+  |                    |   |
| Cr 3+  | 118                | 75%-е ингибирование активности ила                            |
| Zn     | 0,08...0,5         | Ингибирование роста <i>Nitrosomonas</i> (для чистой культуры) |
| Co     |                    |   |

Помимо металлов, на скорость нитрификации негативное действие, вплоть до полной остановки процесса, оказывают и некоторые органические вещества, которые представлены в табл. 2.6 и 2.7 [35].

**Таблица 2.6.** Органические вещества, которые ингибируют процесс нитрификации

| Вещество               | Концентрация*, мг/л |
|------------------------|---------------------|
| Ацетон                 | 2000                |
| Аллиловый спирт        | 19,5                |
| Аллилхлорид            | 180                 |
| Аллиловый изотиоцианат | 1,9                 |
| Дисульфид бензотиазола | 38                  |
| Дисульфид углерода     | 35                  |
| Хлороформ              | 18                  |
| о-крезол               | 12,8                |
| Диаллиловый эфир       | 100                 |
| Дициандиамид           | 250                 |

**Окончание табл. 2.6**

| Вещество               | Концентрация*, мг/л |
|------------------------|---------------------|
| Дигуанид               | 50                  |
| 4-Динитрофенол         | 460                 |
| Дигиооксамид           | 1,1                 |
| Этанол                 | 2400                |
| Карбонат гуанидина     | 16,5                |
| Гидразин               | 58                  |
| 8-Гидроксихинолин      | 72,5                |
| Меркаптобензотиазол    | 3                   |
| Гидрохлорид метиламина | 1550                |
| Метилизоцианат         | 0,8                 |
| Фенол                  | 5,6                 |
| Тиоцианат калия        | 300                 |
| Скатол                 | 7                   |
| Тиоацетамид            | 0,53                |
| Тиосемикарбазид        | 0,18                |
| Тиомочевина            | 0,076               |
| Триметиламин           | 118                 |

\* Концентрация, при которой происходит 75%-е ингибирование процесса нитрификации.

В табл. 2.8 даны сравнительные характеристики процессов нитрификации, полученные на сточных водах, поступающих на Курьяновские очистные сооружения (КОС) г. Москвы (контроль), и при добавлении в них различных токсикантов: меди, цинка, фенола и антисептика [36].

Для оценки токсичности сточных вод был выбран респирометрический метод, сущность которого заключается в оценке эффекта снижения потребления кислорода микроорганизмами активного ила в присутствии токсичных веществ.

Как видно из табл. 2.8, при концентрациях меди и цинка в поступающих сточных водах до 10 мг/л ингибирующего воздействия на процесс нитрификации практически не происходит.

**Таблица 2.7.** Степень ингибирующего воздействия органических соединений на процесс нитрификации

| Вещество           | Степень ингибирования, %, при концентрациях, мг/л |    |    | Концентрация, мг/л, при которой наблюдается 50%-е ингибирование |
|--------------------|---|----|----|---|
|                    | 100   | 50 | 10 |   |
| Додециламин        | 96  | 95 | —  | <1  |
| Анилин             | 86  | —  | —  | <1  |
| p-Метиланилин      | 90  | 83 | 71 | <1  |
| 1-Нафтиламином     | 81  | 81 | 45 | 15  |
| Этилендиамин       | 73  | —  | 42 | 17  |
| 2,2-Бипиридин      | 91  | 81 | 23 | 23  |
| p-Нитроанилин      | 64  | 52 | 46 | 31  |
| p-Аминопропиофенон | 80  | 56 | 22 | 43  |
| Бензидин           | 84  | 56 | 12 | 54  |
| p-Фенилазоанилин   | 54  | 47 | 0  | 72  |
| p-Нитробензалдегид | 76  | 32 | 29 | 87  |
| Триметиламин       | 35  | —  | —  | 127   |
| Нингидрин          | 30  | 26 | 21 | >100  |
| Бензокаин          | 30  | 27 | 0  | >100  |
| Диметилглюксим     | 30  | 9  | —  | >100  |
| Бензиламин         | 26  | 10 | 0  | >100  |
| Дубильная кислота  | 20  | 7  | —  | >150  |
| Моноэтанолламин    | 16  | —  | —  | >200  |

**Таблица 2.8.** Скорость потребления кислорода активным илом аэротенков КОС в присутствии и в отсутствии токсикантов

| Вещество   | Концентрация, мг/л | Нитрификация — NH <sub>4</sub> |               |
|------------|--------------------|--------------------------------|---------------|
|            |                    | мг О <sub>2</sub> / (г·ч)      | % от контроля |
| Медь       | 3                  | 7,49                           | 98            |
|            | 10                 | 7,60                           | 91            |
| Цинк       | 3                  | 7,84                           | 94            |
|            | 10                 | 6,99                           | 94            |
| Антисептик | 10                 | 6,73                           | 89            |
|            | 100                | 5,70                           | 64            |
|            | 300                | 0,35                           | 4             |
| Фенол      | 20                 | 0                              | 0             |

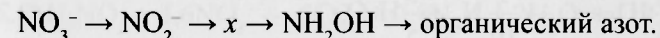
Для оценки влияния сбросов токсичных биоразлагаемых органических веществ на работу сооружений биологической очистки был применен антисептик в широком диапазоне концентраций — от 10 до 300 мг/л и фенол. Действующее вещество антисептика — сложное органическое соединение — при низких концентрациях (до 90 мг/л) не проявило своих токсичных свойств, и только при концентрациях свыше 90 мг/л происходило значительное подавление микробиологической активности нитрификаторов. При концентрациях антисептика 300 мг/л процесс нитрификации был блокирован. При концентрации фенола 20 мг/л происходило 100%-е подавление процесса нитрификации.

*При наличии в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, тяжелых металлов в концентрациях, ингибирующих более чем на 50 % процесс нитрификации, необходимо срочно увеличить расход избыточного активного ила до снижения дозы ила в аэротенках на 30 % при ингибировании процесса нитрификации на 50...70 % и снизить дозу активного ила на 50 % при ингибировании процесса нитрификации на 70...100 %.*

*При поступлении со сточными водами на сооружения биологической очистки токсичных органических примесей необходимо увеличить подачу воздуха в аэротенки и обеспечить концентрацию растворенного кислорода в аэробных зонах на уровне 2,5...3,5 мг/л, обеспечить максимально возможные расходы возвратного активного ила и внутренних рециклов аэротенков.*

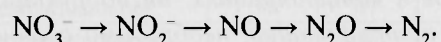
#### 2.2.4. Денитрификация. Теория процесса

В процессе жизнедеятельности микроорганизмов нитраты могут восстанавливаться до аммиака или молекулярного азота. Данный процесс называется нитрат-редукцией. Различают как ассимиляционную нитрат-редукцию, так и диссимиляционную нитрат-редукцию. Ассимиляционная нитрат-редукция осуществляется прокариотами и эукариотами при потреблении нитрата в качестве источника азота для синтеза клетки:



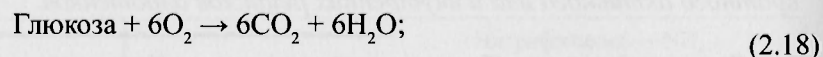
Данный процесс может протекать как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Диссимиляционная нитрат-редукция (денитрификация) осуществляется в анаэробных условиях денитрифицирующими бактериями. Денитрификация представляет собой микробиологический процесс восстановления окисленных соединений азота (нитратов, нитритов) до молекулярного азота (в некоторых случаях — до  $N_2O$ ) и окисления органического вещества при этом до углекислоты. Процесс денитрификации осуществляется большой группой гетеротрофных факультативно анаэробных бактерий, многие из которых могут использовать в качестве акцептора электронов и другие окисленные формы азота —  $NO_2^-$ ,  $NO$  и  $N_2O$ .

Процесс денитрификации (диссимиляционная нитрат-редукция) описывается следующей схемой:

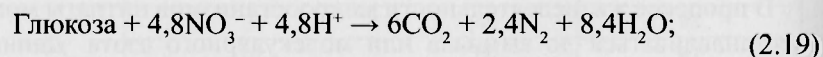


В зависимости от значения pH конечными продуктами процесса денитрификации могут быть либо  $NO$ , либо  $N_2O$ , либо  $N_2$ . При  $pH < 7,3$  вероятно образование  $N_2O$ , при  $pH = 7,5 \dots 9,0$  процесс, как правило, происходит до молекулярного азота.

При окислении органических веществ связанным кислородом нитратов изменение свободной энергии (высвобождение энергии) сравнимо с таковым при окислении органических веществ растворенным кислородом [37]. Например, при окислении глюкозы справедливы следующие уравнения:

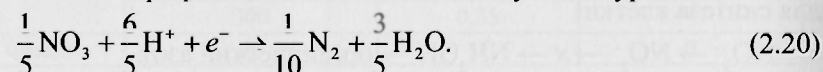


$$\Delta G^0 = -686 \text{ ккал } (-2870 \text{ кДж}).$$



$$\Delta G^0 = -638 \text{ ккал } (-2669 \text{ кДж}).$$

Стехиометрия реакции денитрификации зависит от состава органических соединений, участвующих в процессе. В общем случае реакция денитрификации описывается следующим уравнением:



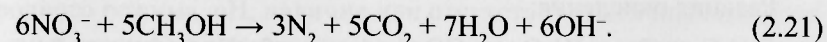
Факультативные гетеротрофные бактерии реализуют процесс денитрификации в ходе биологической очистки сточных вод. Хотя многие микроорганизмы отдают предпочтение аэробному дыханию, в условиях дефицита или отсутствия растворенного кислорода они не используют нитраты или нитриты при наличии достаточного количества органического субстрата. Ферментативный аппарат процесса денитрификации образуется только при отсутствии растворенного кислорода или его низкой концентрации. При реализации процесса денитрификации растворенный кислород является ингибитором данного процесса, и в аэробных условиях все способные к денитрификации бактерии предпочитают кислородное дыхание.

*Для реализации процесса денитрификации в сооружениях биологической очистки сточных вод необходимо создать строго анаэробные условия.*

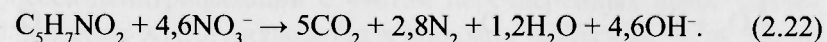
Необходимо отметить, что по отношению к кислородному режиму различают следующие условия реализации биологической очистки сточных вод:

- аэробные условия — наличие растворенного в водной среде кислорода;
- анаэробные условия — наличие связанного кислорода (для реализации процесса денитрификации необходимо наличие связанного кислорода нитратов и/или нитритов);
- анаэробные условия — полное отсутствие кислорода (как растворенного, так и связанного).

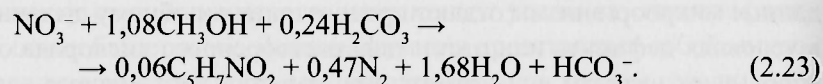
Для метанола (при использовании его в качестве источника углерода) реакция потребления субстрата в ходе процесса денитрификации описывается следующим уравнением:



В анаэробных условиях нитраты также используются бактериями на эндогенное дыхание:



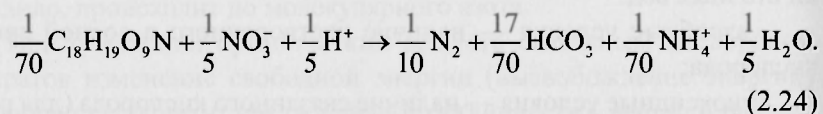
Суммарная реакция денитрификации, включающая синтез клеток биомассы, описывается следующим уравнением:



Из уравнения (2.23) можно рассчитать, что на восстановление 1 мг N-NO<sub>3</sub> в ходе процесса денитрификации потребляется 2,47 мг метанола. С учетом того, что плотность метанола составляет 0,7918 г/см<sup>3</sup>, а ХПК метанола составляет 1 188 000 мг/л, определяем, что 2,47 мг метанола соответствуют 3,7 мг ХПК при концентрации метанола 100 %. При этом образуется 0,48 мг сухого вещества биомассы (что соответствует 0,68 мг ХПК).

Коэффициент прироста биомассы в ходе процесса денитрификации  $Y_{\text{HNO}}$  с использованием в качестве внешнего источника углерода метанола, как следует из уравнения (2.23), составляет 0,18 мг ХПК беззольного вещества активного ила (БВАИ) на 1 мг ХПК метанола.

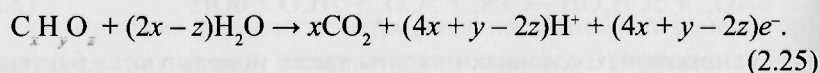
Для городских сточных вод процесс денитрификации можно описать следующим суммарным уравнением:



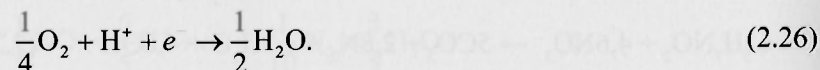
Однако следует иметь в виду, что состав городских сточных вод может меняться в широких пределах, и формула интегрального органического вещества, используемая в уравнении (2.24), также может иметь иной вид.

Теоретически значение ХПК любого органического вещества, описываемого структурной формулой  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ , определяется из уравнений окисления и восстановления:

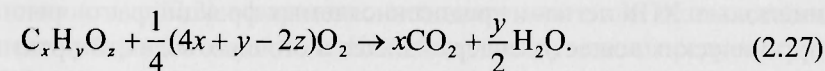
Реакция окисления:



Реакция восстановления:



Из реакций (2.25) и (2.26) определяем:



Уравнение (2.27) позволяет определить, что теоретическое значение ХПК (то есть теоретическая потребность в кислороде) одного моля органического вещества  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$  составляет  $1/4(4x + y - 2z)$  моля кислорода (O<sub>2</sub>). Зная, что молярная масса  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$  может быть определена как  $(12x + y + 16z)$  г/моль и молярная масса кислорода составляет 32 г, определяем, что ХПК  $(12x + y + 16z)$  г рассматриваемого вещества  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$  равна  $1/4(4x + y - 2z)32$  или  $(4x + y - 2z)8$  г кислорода:

$$\text{ХПК}_{\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z} = \frac{8(4x + y - 2z)}{12x + y + 16z} \cdot \frac{\text{г ХПК}}{\text{г C}_x\text{H}_y\text{O}_z} \quad (2.28)$$

Для интегрального органического субстрата типовых городских сточных вод, который описывается структурной формулой  $\text{C}_{18}\text{H}_{19}\text{O}_9\text{N}$ , из формулы (2.28) получаем 1,54 г ХПК/г  $\text{C}_{18}\text{H}_{19}\text{O}_9\text{N}$ .

Вернемся к описанию процесса денитрификации для городских сточных вод уравнением (2.23). Из уравнения следует, что на восстановление 1 мг N-NO<sub>3</sub> при реализации процесса денитрификации на городских сточных водах, обобщенный органический субстрат которых описывается структурной формулой  $\text{C}_{18}\text{H}_{19}\text{O}_9\text{N}$ , требуется 2,0 мг суммарного органического вещества сточных вод, что в пересчете на ХПК дает 3,08 мг.

В реальных условиях эксплуатации сооружений количество нитратов, которое может быть удалено из сточных вод без дополнительного дозирования углерода из внешнего источника, является функцией количества доступного углеродсодержащего органического вещества сточных вод, внешних факторов (температуры, кислородного режима, pH, наличия или отсутствия токсичных веществ и т. д.) и стехиометрического соотношения между донором электрона и акцептором, отношением значения ХПК (БПК) к N. Поэтому для городских сточных вод требуемое для успешной реализации процесса денитрификации с учетом перечисленных выше факторов значение ХПК/N находится в широком диапазоне — от 3,0 до



7,0 мг ХПК/мг N, где ХПК представляет собой суммарное значение только ХПК легко- и среднеокисляемых фракций растворенных органических веществ, содержащихся в сточных водах. В практике эксплуатации сооружений биологической очистки отношение БПК<sub>5</sub> к N должно быть более 3, для обеспечения стабильного процесса денитрификации предпочтительнее, чтобы данное соотношение было более 4.

В реальных условиях работы сооружений достаточно сложно организовать идеальные условия ведения процесса денитрификации.

*Основная проблема идеальной реализации процесса денитрификации в реальных сооружениях состоит в обеспечении строго аноксидных условий (то есть полного отсутствия растворенного кислорода) в зоне денитрификации.*

Растворенный кислород поступает в аноксидную зону как с рециклом возвратного активного ила, так и с «нитратным» рециклом. В этом случае часть органических соединений, поступающих в аноксидную зону со сточными водами, будет окисляться растворенным кислородом, поступавшим с рециклами. В первую очередь при этом будут окисляться легко окисляемые органические вещества. Данный нюанс необходимо учитывать при проектировании аэротенков с реализацией процессов нитри-денитрификации.

При определении достаточного количества субстрата для реализации процесса денитрификации следует не закладывать расчетное количество органического субстрата, полученного по рассмотренным выше формулам, а принимать коэффициент запаса.

*Практика эксплуатации сооружений, работающих по технологии нитри-денитрификации, показывает, что в этом случае коэффициент запаса должен составлять не менее 15 % к значениям ХПК (БПК<sub>5</sub>)/N, приведенным выше.*

Если значение отношения ХПК (БПК) к N в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, не превышает расчетных значений, полученных по формуле (2.28) с учетом коэффициента запаса

ст 1,15, мы рекомендуем предусматривать сооружения дезоксидации потоков (см. п. 2.3) возвратного активного ила и/или дезоксидации потока «нитратного» рецикла. Как альтернативу можно предусмотреть дозирование дополнительного углерода из внешнего источника.

В процессе денитрификации участвуют прокариотические микроорганизмы: архебактерии и истинные бактерии. Денитрифицирующие бактерии обнаруживаются во многих микробиоценозах, и среди них встречаются представители большинства метаболических (физиологических) групп микроорганизмов, включая экстремальных термофилов, галлофилов, автотрофных бактерий, патогенов и многих других (табл. 2.9).

**Таблица 2.9.** Представители денитрифицирующих бактерий в различных метаболических группах прокариотных организмов [38]

|  |  |
|--|--|
| <p><b>Архебактерии:</b><br/> <i>Halobacterium, Haloarcula, Haloferax</i></p> <p><b>Органотрофные</b><br/> <i>Pyrobaculum</i></p> <p><b>Бактерии грамположительные органотрофные:</b><br/>                     Спорообразующие — <i>Bacillus</i><br/>                     Неспорообразующие — <i>Jonesia</i></p> <p><b>Бактерии грамотрицательные:</b><br/> <b>Фототрофные:</b><br/> <i>Rhodobacter, Rhodospseudomonas, Rhodoplanes</i></p> <p><b>Литотрофные сероокисляющие:</b><br/> <i>Beggiatoa, Thiobacillus, Thioploca</i></p> <p><b>Литотрофные водородокисляющие:</b><br/> <i>Ralstonia, Paracoccus, Pseudomonas</i></p> <p><b>Литотрофные нитрифицирующие:</b><br/> <i>Nitrobacter, Nitrosomonas</i></p> <p><b>Органотрофные карбоксидобактерии:</b><br/> <i>Pseudomonas, Zavarzinia</i></p> <p><b>Органотрофные олиготрофные:</b><br/> <i>Aquaspirillum, Hyphomicrobium</i></p> <p><b>Сбраживающие:</b><br/> <i>Empedobacter, Azospirillum</i></p> <p><b>Факультативно-анаэробные:</b><br/> <i>Alteromonas, Pseudomonas</i></p> <p><b>Аэробные:</b><br/> <i>Paracoccus, Alcaligenes</i></p> | <p><b>Бактерии грамотрицательные:</b><br/> <b>Диазотрофные:</b><br/> <i>Aquaspirillum, Azospirillum, Azoarcus, Bradyrhizobium, Pseudomonas, Rhodobacter, Rhodospseudomonas, Sinorhizobium</i></p> <p><b>Бактерии термофильные:</b><br/> <i>Aquifex, Bacillus, Thermothrix</i></p> <p><b>Бактерии психрофильные:</b><br/> <i>Aquaspirillum, Halomonas</i></p> <p><b>Бактерии галофильные:</b><br/> <i>Halomonas, Bacillus</i></p> <p><b>Пигментобразующие бактерии:</b><br/> <i>Chromobacterium, Flavobacterium, Pseudomonas</i></p> <p><b>Почкующиеся бактерии:</b><br/> <i>Blastobacter, Hyphomicrobium</i></p> <p><b>Скользящие бактерии:</b><br/> <i>Cytophaga, Flexibacter</i></p> <p><b>Магнитобактерии:</b><br/> <i>Magnetospirillum</i></p> <p><b>Патогенные бактерии:</b><br/> <i>Achromobacter, Alcaligenes, Agrobacterium, Campylobacter, Eikenella, Flavobacterium, Kingella, Moraxella, Morococcus, Neisseria, Ochrobactrum, Oligella, Pseudomonas, Sphingobacterium, Tsukamurella</i></p> |
|--|--|

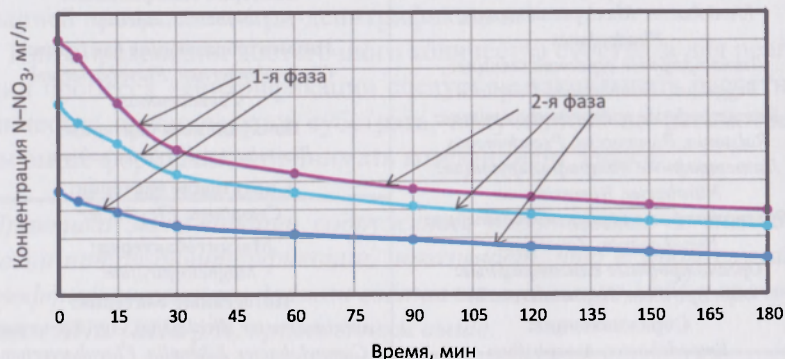
В табл. 2.9 перечислены роды бактерий, которые, в свою очередь, могут включать в себя многочисленные виды. Так, род *Pseudomonas* насчитывает 24 вида, способных к осуществлению процесса денитрификации (табл. 2.10).

**Таблица 2.10.** Виды рода бактерий *Pseudomonas*, способные к денитрификации

| Общепризнанные виды:                           | Виды, с высокой вероятностью принадлежащие роду <i>Pseudomonas</i> : |
|--|--|
| <i>P.aeruginosa</i> , <i>P.alcaligenes</i>     | <i>P.azotoformans</i> , <i>P.butanolovora</i>                        |
| <i>P.aureofaciens</i> , <i>P.balearica</i>     | <i>P.carboxydoflava</i> , <i>P.carboxydohydrogena</i>                |
| <i>P.chlororaphis</i> , <i>P.fluorescens</i>   | <i>P.gazotropha</i> , <i>P.indigofera</i>                            |
| <i>P.mendocina</i> , <i>P.mucidolens</i>       | <i>P.lemoignei</i> , <i>P.marginalis</i>                             |
| <i>P.pseudoalcaligenes</i> , <i>P.stutzeri</i> | <i>P.nautica</i> , <i>P.nitroreducens</i>                            |
| <i>P.caryophylli</i> , <i>P.mallei</i>         |  |
| <i>P.pickettii</i> , <i>P.plantarii</i>        |  |
| <i>P.pseudomallei</i>                          |  |

### 2.2.5. Денитрификация. Математическое описание процесса

На рис. 2.9 представлен характерный график снижения концентрации азота нитратов, полученный при проведении исследований кинетики процесса денитрификации. Работы проводились на активном иле аэротенков Люберецких очистных сооружений (ЛОС) [39] и сточной воде, поступающей на данные сооружения.



**Рис. 2.9.** Динамика концентраций азота нитратов, полученная в ходе исследований процесса денитрификации на активном иле аэротенков ЛОС

Как видно из графика, кривая снижения концентрации азота нитратов в ходе процесса денитрификации имеет две ярко выраженные фазы: 1-я фаза, которая длится около 30 мин, отмечается высокими скоростями падения концентрации азота нитратов, и 2-я фаза, которая характеризуется низкими скоростями.

В настоящее время существует ряд признанных и апробированных моделей описания процессов денитрификации, которые используются как при проектировании сооружений, так и при их эксплуатации. Наиболее распространенными из них являются зависимости типа уравнений Моно, а также расчеты, основанные на нагрузке по органическому веществу на активный ил, и уравнения кинетики нулевого порядка по концентрации нитратов.

Уравнение Рефлинга — Стенсела [40] описывает скорость процесса денитрификации в зависимости от нагрузки по органическому веществу:

$$r_{X,NO_3} = 0,03 \frac{S_s}{X} + 0,029, \quad (2.29)$$

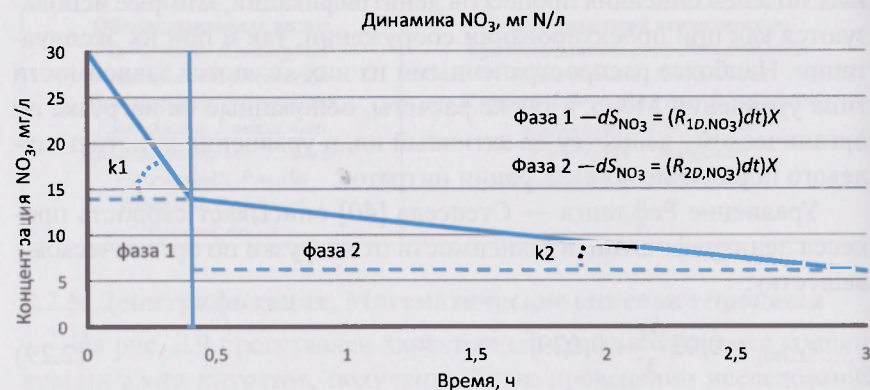
где  $X$  — общая масса микроорганизмов в системе;

$S_s$  — концентрация биоразлагаемого субстрата в поступающей сточной воде.

Данное уравнение было получено по результатам пилотных исследований удельных скоростей денитрификации как функции нагрузки на активный ил. Однако данное уравнение представляет собой статистическую модель, которая основана на определении эмпирической зависимости скорости процесса денитрификации от нагрузки по органическим веществам на активный ил, полученной на основании ряда проведенных экспериментов. Анализ достаточного массива данных при специфических условиях (время года, нагрузка на сооружение, технологические параметры ведения процесса) позволяет получить в статистических моделях минимальное отклонение расчетных и реальных данных. Тем не менее, данный класс моделей позволяет предсказывать результаты только для конкретных сооружений, работающих в существующих условиях. Таким образом, для использования уравнения (2.29) при расчете

процесса денитрификации необходимо провести ряд экспериментов по определению зависимости скорости денитрификации от нагрузки на активный ил по органическому веществу и получить константы для конкретных сточных вод.

Исследователи [139] описывают процесс денитрификации каждой фазы, используя кинетику нулевого порядка по азоту нитратов.



**Рис. 2.10.** Двухфазное описание динамики концентраций азота нитратов в ходе процесса денитрификации

Как видно из графика на рис. 2.10, при использовании моделей, основанных на кинетике нулевого порядка по  $\text{N-NO}_3$ , концентрация азота нитратов пропорциональна текущему времени процесса. Скорости же процессов денитрификации и в первой ( $R_{1D,\text{NO}_3}$ ), и во второй ( $R_{2D,\text{NO}_3}$ ) фазах постоянны и зависят только от дозы активного ила  $X$ :

$$R_{1D,\text{NO}_3} = \frac{dS_{\text{NO}_3}}{dt} = \rho_{1D,\text{NO}_3} X, \quad (2.30)$$

$$R_{2D,\text{NO}_3} = \frac{dS_{\text{NO}_3}}{dt} = \rho_{2D,\text{NO}_3} X, \quad (2.31)$$

где  $\rho_{1D,\text{NO}_3}$  и  $\rho_{2D,\text{NO}_3}$  — удельные скорости денитрификации соответственно 1-й и 2-й фаз процесса, мг/г·ч.

В общем случае удельная скорость денитрификации  $\rho_{D,\text{NO}_3}$  представляет собой количество азота нитратов ( $S_{\text{NO}_3}$ , мг/л), удаленного в единицу времени ( $t$ , ч) единицей массы беззольного вещества активного ила ( $X$ , г/л):

$$\rho_{D,\text{NO}_3} = \frac{dS_{\text{NO}_3}}{dt} \frac{1}{X}. \quad (2.32)$$

С учетом того, что и в первой, и во второй фазах денитрификации при рассматриваемом подходе к описанию процесса удельные скорости процессов являются значениями постоянными, то есть не зависят от текущей концентрации азота нитратов, реакцию денитрификации можно описать как реакцию нулевого порядка по концентрации азота нитратов:

$$\rho_{D,\text{NO}_3} = k_{D,\text{NO}_3} S_{\text{NO}_3}^0 = k_{D,\text{NO}_3}. \quad (2.33)$$

Для диапазона температур от 12 до 26 °С авторы приводят следующие значения  $k_{D,\text{NO}_3}$ :

$$k_{1D,\text{NO}_3} = 0,72 \cdot 1,2^{(T-20)};$$

$$k_{2D,\text{NO}_3} = 0,10 \cdot 1,08^{(T-20)}.$$

При проектировании сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации, важным параметром, который лежит в основе выбора технологических и технических решений, является определение денитрификационного потенциала сооружений.

*Денитрификационный потенциал сооружения  $DP$ , мг N/л, — максимальное количество нитратов, которое может быть удалено в ходе процесса денитрификации в аноксидной зоне (зонах) рассматриваемой системы, на единицу расхода сточной воды, поступающей в сооружение.*

Денитрификационный потенциал зависит от концентрации биоразлагаемых органических соединений в поступающих сточных водах, наличия или отсутствия токсичных веществ в сточных водах, температуры сточных вод, pH среды и щелочности.

При эксплуатации сооружений важным показателем эффективности реализации процесса денитрификации в реальных условиях является денитрификационная емкость сооружения.

*Денитрификационная емкость сооружения DC, мг N/л, представляет собой концентрацию нитратов, удаляемых в ходе процесса денитрификации, на единицу расхода сточной воды в реальных условиях.*

Денитрификационная емкость связана с денитрификационным потенциалом и конфигурацией системы и при оптимальных условиях реализации процесса в ходе проектирования и эксплуатации сооружения равна денитрификационному потенциалу.

Эффективность денитрификации представляет собой отношение количества удаленных в ходе процесса денитрификации нитратов к количеству нитратов, поступающих на денитрификацию в анаэробную зону.

В настоящее время наиболее широкое распространение получило аналитическое описание процесса денитрификации дробно-линейными функциями, что является наиболее детальным описанием данной реакции:

$$\mu_{H(\text{анокс})} = (\mu_{\max, H} \frac{S_S}{S_S + K_{S,S}} \frac{S_{\text{NO}_3}}{S_{\text{NO}_3} + K_{\text{NO}_3}} \frac{K_{\text{O}_2, \text{H}(\text{NO}_3)}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2, \text{H}(\text{NO}_3)}} - b_H) \eta_H X_H, \quad (2.34)$$

или

$$\rho_{D, \text{NO}_3} = \frac{1 - 1,42 Y_H}{2,86 Y_H} (\mu_{\max, H} \frac{S_S}{S_S + K_{S,S}} \frac{S_{\text{NO}_3}}{S_{\text{NO}_3} + K_{\text{NO}_3}} \frac{K_{\text{O}_2, \text{H}(\text{NO}_3)}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2, \text{H}(\text{NO}_3)}} - b_H) \times \eta_H X_H, \quad (2.35)$$

где  $\mu_{H(\text{анокс})}$  — текущая скорость роста гетеротрофных микроорганизмов в анаэробных условиях, 1/сут;

$\mu_{\max, H}$  — максимальная удельная скорость роста гетеротрофных микроорганизмов, 1/сут;

$S_S$  — текущая концентрация органических соединений, мг/л;

$K_{S,S}$  — константа полунасыщения по органическим соединениям, мг/л;

$S_{\text{NO}_3}$  — текущая концентрация нитратов, мг/л;

$K_{\text{NO}_3}$  — константа полунасыщения по нитратам, мг/л;

$S_{\text{O}_2}$  — текущая концентрация растворенного кислорода иловой смеси, мг/л;

$K_{\text{O}_2(\text{NO}_3)}$  — константа полунасыщения при ингибировании кислородом, мг/л;

$Y_H$  — прирост гетеротрофных бактерий, г БВАИ/г ХПК;

$b_H$  — константа распада бактерий, 1/сут;

$\eta_H$  — фактор снижения активности гетеротрофных микроорганизмов в анаэробных условиях;

$X_H$  — концентрация гетеротрофных бактерий, мг/л;

$\rho_{D, \text{NO}_3}$  — текущая удельная скорость денитрификации, мг/л·сут.

В табл. 2.11 даны значения входящих в уравнение (2.35) констант для температуры иловой смеси 20 °С, приводимые различными авторами.

Таблица 2.11. Значение кинетических констант процесса денитрификации

| Автор/<br>литературный<br>источник | $\mu_{\max, H}$<br>1/сут | $K_{S,S}$<br>мг/л | $K_{\text{NO}_3}$<br>мг/л | $K_{\text{O}_2, \text{H}(\text{NO}_3)}$<br>мг/л | $Y_H$<br>(г БВАИ/<br>г ХПК) | $b_H$<br>1/сут | $\eta_H$  |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|---|-----------------------------|----------------|-----------|
| M. Henze<br>[10, 21, 26]           | 3,0...6,0                | 10...20           | 0,2...0,5                 | 0,1...0,5                                       | 0,63...0,67                 | 0,62           | 0,6       |
| W. Gujer [28]                      | 4,6                      | 4                 | 0,5                       | 0,2   | 0,67                        | —              | 0,4...0,7 |
| Baillod C.R.<br>[41]               | 3,2                      | 10...12           | 0,06...0,5                | 0,1...0,28                                      | 0,69                        | 0,3...0,6      | 0,5...0,6 |

В реальных условиях эксплуатации сточные воды могут содержать вещества, оказывающие ингибирующее действие на процессы денитрификации. В этом случае различают конкурентное и неконкурентное ингибирование.

*Конкурентное ингибирование* представляет собой процесс, при котором ингибитор конкурирует за активный центр фермента с субстратом. В этом случае максимальная скорость реакции не изменяется, а увеличивается константа полунасыщения по субстрату:

$$K_{S, \text{fact}}^{S_{\text{inh}}} = K_{S, s} \left( 1 + \frac{S_{\text{inh}}}{K_{S, s_{\text{inh}}}} \right), \quad (2.36)$$

где  $K_{S, \text{fact}}^{S_{\text{inh}}}$  — константа полунасыщения по органическому субстрату с учетом конкурентного ингибирования, мг/л;  
 $S_{\text{inh}}$  — концентрация ингибитора, мг/л;  
 $K_{S, s_{\text{inh}}}$  — константа ингибирования, мг/л.

*Неконкурентное ингибирование* представляет собой процесс, в ходе которого не происходит конкуренции между субстратом и ингибитором за активный центр фермента, а происходят функциональные изменения, которые не позволяют ферменту превращать субстрат. В результате происходит снижение максимальной скорости процесса:

$$\mu_{H, \text{fact}}^{S_{\text{inh}}} = \mu_{\text{max}, H} \frac{K_{S, s_{\text{inh}}}}{K_{S, s_{\text{inh}}} + S_{\text{inh}}}. \quad (2.37)$$

*Влияние ингибиторов необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации очистных сооружений. Прежде всего это относится к реализации процессов денитрификации на производственных сточных водах.*

Для получения реальных кинетических параметров процессов денитрификации, реализованных на сточных водах, поступающих на Люберецкие (ЛОС) и Курьяновские (КОС) очистные сооружения, были проведены специальные исследования [39, 42]. Для исследований использовались активные илы аэротенков различных блоков ЛОС и КОС — старого блока Люберецких очистных сооружений (ЛОСст), двух блоков Ново-Люберецких очистных сооружений (НЛОС-I и НЛОС-II), старого блока Курьяновских очистных сооружений (КОСст) и двух блоков Ново-Курьяновских очистных сооружений (НКОС-I и НКОС-II).

В первой серии экспериментов определялась зависимость скорости процесса денитрификации от текущей концентрации  $\text{N-NO}_3$  (рис. 2.11). Для исключения влияния на процесс денитрификации дефицита субстрата в иловую смесь добавляли ацетат из расчета 450 мг/л по БПК<sub>5</sub>.



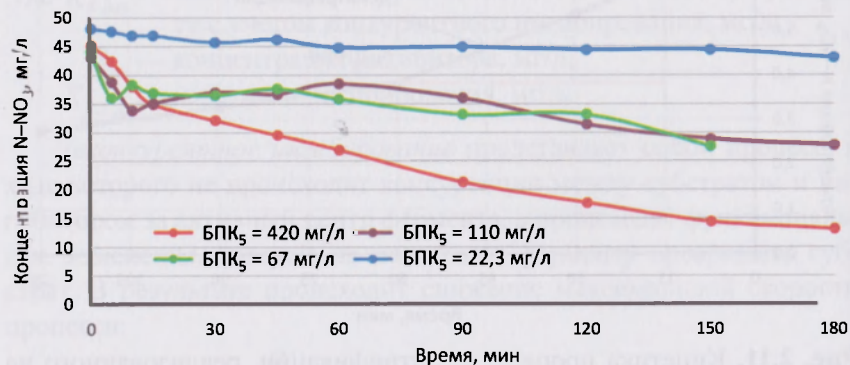
**Рис. 2.11.** Кинетика процесса денитрификации, реализованного на осветленной сточной воде и активном иле ЛОСст при отсутствии дефицита органических соединений

Аналогичные кривые были получены для процесса денитрификации, реализованного для всех блоков Люберецких и Курьяновских очистных сооружений. Результаты обработки экспериментальных данных позволили получить зависимость скорости процесса денитрификации от текущей концентрации азота нитратов при отсутствии растворенного кислорода и дефицита органического субстрата:

$$\rho_{D, \text{NO}_3} = \rho_{D, \text{NO}_3(\text{max})} \frac{S_{\text{NO}_3}}{S_{\text{NO}_3} + K_{\text{NO}_3}}. \quad (2.38)$$

Экспериментальные данные обрабатывались с помощью линеаризации по [43], в результате чего были получены значения максимальных удельных скоростей процесса денитрификации  $\rho_{D, \text{NO}_3}$  и констант полунасыщения процесса денитрификации по нитратному азоту  $K_{\text{NO}_3}$  исследуемых илов (табл. 2.12).

Во второй серии экспериментов определялась зависимость скорости процесса денитрификации от значения БПК<sub>5</sub> сточных вод (рис. 2.12). Для моделирования различной начальной концентрации органического субстрата, характерного для московских очистных сооружений, в реактор заливались поочередно осветленная вода, неосветленная вода и смеси в различных соотношениях осветленной и неосветленной, а также неосветленной и очищенной воды.



**Рис. 2.12.** Кинетика денитрификации при различных начальных значениях БПК<sub>5</sub> сточных вод (азротенки ЛОСст)

На основании результатов, полученных в первой серии экспериментов, исследования проводились при концентрациях N-NO<sub>3</sub> 37,7...42,3 мг/л, чтобы исключить влияние на скорость денитрификации дефицита нитратов.

Математический анализ результатов второй серии экспериментов позволил получить следующую зависимость скорости процесса денитрификации от значения БПК<sub>5</sub> исследуемых сточных вод при отсутствии растворенного кислорода и дефицита нитратного азота:

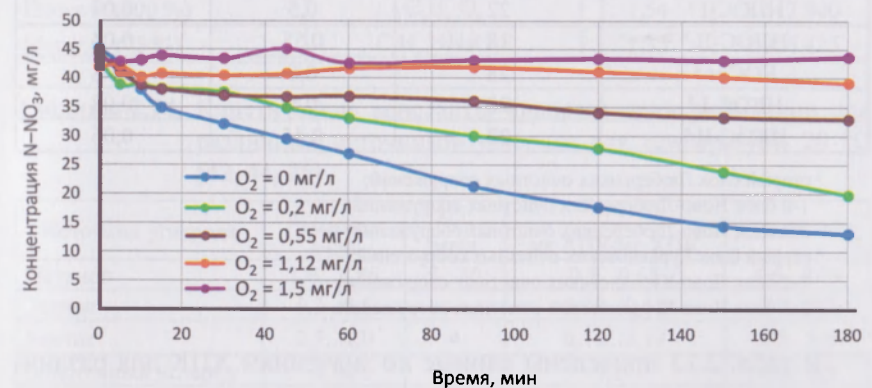
$$P_{D,NO_3} = P_{D,NO_3(max)} \frac{S_s}{S_s + K_{S,s}} \quad (2.39)$$

Обработка результатов эксперимента методом двойных обратных величин позволила определить значения максимальной удель-

ной константы скорости денитрификации и констант полунасыщения процесса денитрификации по субстрату  $K_{S,s}$  исследуемых илов (табл. 2.12).

Зависимость кинетики процесса денитрификации от концентрации растворенного кислорода в иловой смеси (третья серия экспериментов) определялась при отсутствии дефицита как субстрата, так и азота нитратов. В начальный момент времени значения БПК<sub>5</sub> поддерживались на уровне 437...478 мг/л, концентрации N-NO<sub>3</sub> — 39,6...45,5 мг/л, температура в термостате составляла 20 °С. Кислород подавался в реактор от регулируемого микрокомпрессора и контролировался при помощи кислородомера ОХ1 197S. Исследования процесса денитрификации проводились при концентрациях растворенного кислорода от 0 до 1,5 мг/л.

Графики кинетики денитрификации при различных концентрациях растворенного кислорода для осветленной сточной воды и активного ила азротенков ЛОСст представлены на рис. 2.13.



**Рис. 2.13.** Кинетика денитрификации при различных значениях растворенного кислорода

Значения констант полунасыщения процесса денитрификации исследуемых илов по растворенному кислороду  $K_{O_2(NH_4NO_3)}$  даны в табл. 2.12.

Глава 2. Биоочистка сточных вод от соединений азота (процессы нитри-денитрификации)

При недостаточности органического субстрата в поступающих на биологическую очистку сточных водах для обеспечения стабильности и требуемой эффективности процесса денитрификации требуется добавление внешнего источника углерода. Наиболее часто в качестве дополнительного углерода используют метанол, этанол, сахар, мелассу, глицерин, кукурузный крахмал, а также продукты сбраживания осадка очистных сооружений. Органический потенциал продуктов, используемых в качестве дополнительных источников углерода при реализации процесса денитрификации, зависит от степени биоразлагаемости (биодegradации) данных веществ. Биоразлагаемость оценивается по количеству биоразлагаемой фракции ХПК рассматриваемого вещества.

**Таблица 2.12.** Значения кинетических параметров процесса денитрификации илов Люберецких и Курьяновских очистных сооружений

| Сточные воды         | $K_{S,r}$ , мг/л | $K_{NO_3}$ , мг/л | $K_{O_2(NH_4)}$ , мг/л |
|----------------------|------------------|-------------------|------------------------|
| ЛОСст <sup>1</sup>   | 25               | 0,8               | 0,05                   |
| НЛОС-1 <sup>2</sup>  | 22               | 0,5               | 0,07                   |
| НЛОС-II <sup>3</sup> | 18               | 0,55              | 0,04                   |
| КОСст <sup>4</sup>   | 28               | 0,6               | 0,08                   |
| НКОС-1 <sup>5</sup>  | 20               | 0,5               | 0,08                   |
| НКОС-II <sup>6</sup> | 22               | 0,45              | 0,06                   |

<sup>1</sup> старый блок Люберецких очистных сооружений;

<sup>2</sup> 1-й блок Ново-Люберецких очистных сооружений;

<sup>3</sup> 2-й блок Ново-Люберецких очистных сооружений;

<sup>4</sup> старый блок Курьяновских очистных сооружений;

<sup>5</sup> 1-й блок Ново-Курьяновских очистных сооружений;

<sup>6</sup> 2-й блок Ново-Курьяновских очистных сооружений.

В табл. 2.13 приведены данные по значениям ХПК для различных источников углерода.

При реализации процесса денитрификации на чистых источниках углерода кинетика процесса существенно меняется по сравнению с использованием субстрата сточных вод. В табл. 2.14 приведены значения кинетических констант процесса денитрификации, реализованного на различных источниках углерода, а также значение ХПК-эквивалента, необходимого для восстановления 1 мг N-NO<sub>3</sub>.

2.2. Удаление соединений азота из сточных вод. Процессы биологической очистки

**Таблица 2.13.** Значения ХПК различных органических соединений

| Источник углерода                        | Химическая формула                                 | Удельный вес | Значение ХПК, мг/л |
|--|--|--------------|--------------------|
| Метанол (100 %)                          | CH <sub>3</sub> OH                                 | 0,79         | 1 188 000          |
| Этанол (100 %)                           | CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH                 | 1,026        | 1 649 000          |
| Уксусная кислота (100%-я концентрация)   | CH <sub>3</sub> COOH                               | 1,05         | 1 121 000          |
| Раствор уксусной кислоты (20%-й раствор) | CH <sub>3</sub> COOH                               | 1,026        | 219 000            |
| Сахар (сироп) (50%-я концентрация)       | C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>    | 1,22         | 685 000            |
| Глицерин (100 %)                         | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>       | 1,261        | 1 538 420          |
| Ферментированный первичный осадок        | ЛЖК (в основном уксусная и пропионовая кислоты)    | 1,0          | 400...800          |
| Ацетат натрия (30 %)                     | NaCH <sub>3</sub> COO                              | 1,16         | 235 558            |
| Сахароза (60 %)                          | C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>    | 1,2887       | 866 006            |
| Сахар (100 %)                            | C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>    | 1,587        | 1 777 440          |
| Глюкоза (100 %)                          | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>      | 1,54         | 1 647 800          |
| Меласса (75 %)                           | C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> NNaO <sub>3</sub> S | 1,35         | 1 006 425          |

**Таблица 2.14.** Кинетические константы процесса денитрификации для различных источников углерода для температуры 20 °С [42, 44, 25]

| Источник углерода                    | $\mu_{\max, N(\text{апох})}^*$<br>1/сут | $K_s$ ,<br>мг/л | $Y_{np}$<br>мг ХПК/мг ХПК | ХПК/N-NO <sub>3</sub> |
|--------------------------------------|---|-----------------|---------------------------|-----------------------|
| Метанол                              | 1,0...1,86                              | 5...10          | 0,5...0,65                | 4,6...4,79            |
| Этанол                               | 1,3...3,5                               | —               | 0,22...0,51               | 3,7...4,7             |
| Ацетат                               | 3,7...4,0                               | 4               | 0,18...0,19               | 3,5...3,6             |
| Эндогенный углерод                   | 0,61                                    | —               | 0,27                      | 4,5...6,9             |
| Меласса                              | —                                       | —               | —                         | 4,3...5,8             |
| Кукурузный сироп                     | 3,9                                     | —               | —                         | 4,5...7,9             |
| Сточные воды молочной промышленности | 1,91                                    | —               | —                         | 3,6...4,7             |
| Сточные воды винодельческих заводов  | 1,43                                    | —               | —                         | 3,4                   |
| Сахар                                | 4,0                                     | —               | 0,35                      | —                     |
| Глюкоза                              | —                                       | —               | 0,38                      | 4,5                   |

Как видно из табл. 2.14, диапазон кинетических констант процесса денитрификации варьирует в широком диапазоне даже для одного и того же субстрата. Это связано, в первую очередь, с денитрификационной активностью используемого в ходе эксперимента активного ила, условиями и методиками выполнения работы.

### 2.2.6. Денитрификация.

#### Факторы, влияющие на эффективность процесса

Скорость процесса денитрификации в ходе эксплуатации сооружений, как было показано выше, зависит от следующих факторов: состава сточных вод (или типа внешнего источника углерода), концентрации органического субстрата в сточных водах (или концентрации внешнего источника углерода, дозируемого в систему), концентрации растворенного кислорода в аноксидной зоне, величин pH, щелочности среды, начальной и конечной концентрации нитритов и нитратов, концентрации денитрифицирующих микроорганизмов в системе.

**Органический субстрат.** Эффективность и скорость процесса денитрификации определяются, в первую очередь, наличием или отсутствием достаточного количества органического субстрата, необходимого для восстановления требуемого количества нитратов и/или нитритов, и органическим потенциалом данного субстрата. На рис. 2.14 показаны зависимости скоростей роста гетеротрофных бактерий в аноксидных условиях от значения БПК<sub>5</sub> для различных типов субстратов — глюкозы и этанола [45], и сточных вод, поступающих на Люберецкие очистные сооружения (ЛОС) [22, 46] и очистные сооружения нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ).

Как видно из графика на рис. 2.14, наиболее энергоэффективным субстратом (из рассмотренных) для роста гетеротрофных бактерий является глюкоза, наименее эффективным — сточные воды нефтеперерабатывающих заводов.

**Растворенный кислород** ингибирует диссимильную нитрат-редукцию, а на ассимилятивную действия не оказывает. Кислород либо препятствует образованию нитрат редуктазы, либо сам выступает в роли акцептора электронов, тем самым предотвращая восстановление нитратов. Однако, несмотря на ингибирующее действие,

кислород может оказывать косвенным путем и положительное влияние на бактериальную микрофлору. После пребывания в кислородной среде (в аэробной зоне аэротенка) денитрифицирующие микроорганизмы усиливают свою активность в аноксидной зоне (необходимо только создание истинно аноксидных условий).

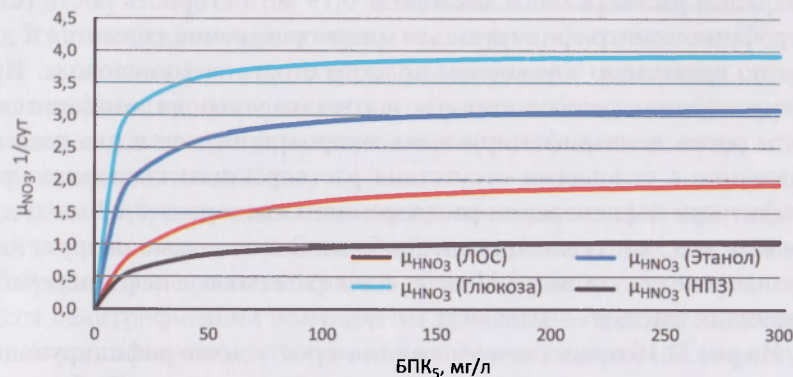


Рис. 2.14. Зависимости скоростей роста гетеротрофных бактерий в аноксидных условиях от значения БПК<sub>5</sub> для различных типов субстратов

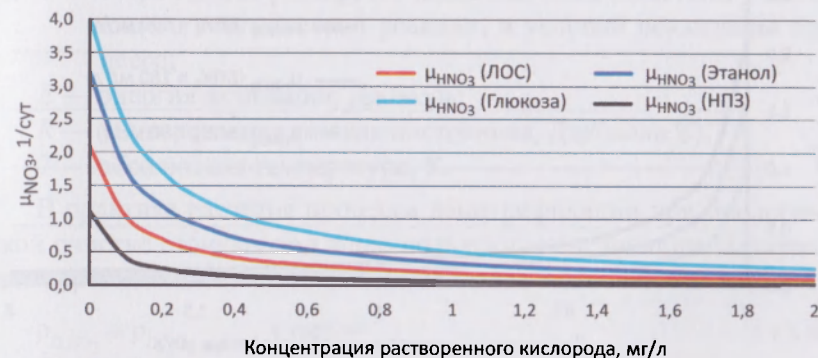


Рис. 2.15. Зависимости скоростей роста гетеротрофных бактерий в аноксидных условиях от концентрации растворенного кислорода для различных типов субстратов (при БПК<sub>5</sub> в начальный момент времени 400 мг/л)



На рис. 2.15 показано влияние растворенного кислорода на скорости роста денитрифицирующих микроорганизмов на различных субстратах в анаэробных условиях.

Как видно из рис. 2.15, при начальных значениях БПК<sub>5</sub> = 400 мг/л в ходе реализации процесса денитрификации на глюкозе при концентрации растворенного кислорода 0,19 мг/л скорость роста гетеротрофных денитрифицирующих микроорганизмов снижется в два раза по сравнению с условием полного отсутствия кислорода. При использовании этанола в качестве источника углерода снижение скорости роста денитрифицирующих микроорганизмов в два раза по сравнению с условиями отсутствия растворенного кислорода происходит при концентрации растворенного кислорода 0,17 мг/л; для сточных вод, поступающих на Люберецкие очистные сооружения, это значение составляет 0,11 мг/л, а для сточных вод нефтеперерабатывающих заводов — 0,08 мг/л.

На рис. 2.16 представлены скорости роста денитрифицирующих микроорганизмов на сточной воде, поступающей на Люберецкие очистные сооружения, при различных значениях БПК<sub>5</sub> в начальный момент времени [46, 32].

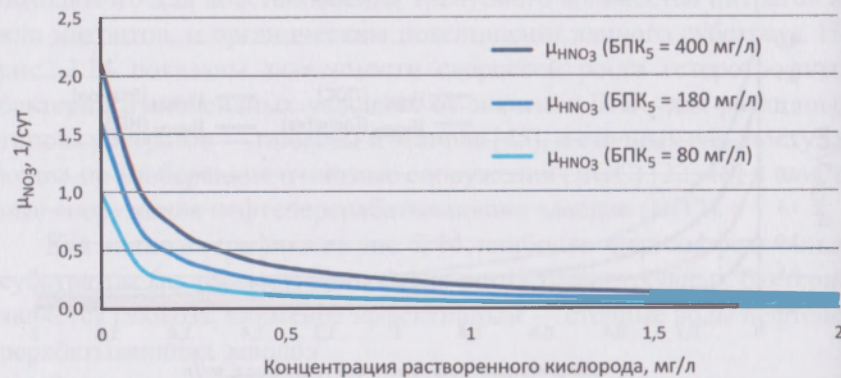


Рис. 2.16. Зависимости скоростей роста гетеротрофных бактерий в анаэробных условиях от концентрации растворенного кислорода для сточных вод, поступающих на Люберецкие очистные сооружения, при различных значениях БПК<sub>5</sub>

Для реализации процесса денитрификации на низко концентрированных по органическим соединениям сточных водах, какими являются, в большинстве своем, сточные воды городов России, концентрация растворенного кислорода в анаэробных зонах аэротенка не должна превышать 0,1...0,15 мг/л.

Это необходимо учитывать как при проектировании, так и при эксплуатации аэротенков, реализующих процессы нитриденитрификации, и закладывать, в случае необходимости, сооружения дезоксидации рециркуляционных потоков иловой смеси и/или возвратного активного ила.

Температура воды влияет на процесс денитрификации в большей степени, чем на аэробное окисление органических соединений. В общем случае участок кривой от минимума до максимума процесса денитрификации подчиняется уравнению Аррениуса, которое описывает зависимость константы скорости химической реакции  $K$  от текущей температуры  $T$ :

$$K_T = A \cdot e^{\frac{E}{RT}},$$

где  $A$  — стерический фактор, зависящий от типа вещества, участвующего в химической реакции, и условий реализации процесса;

$E$  — энергия активации, Дж/моль;

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

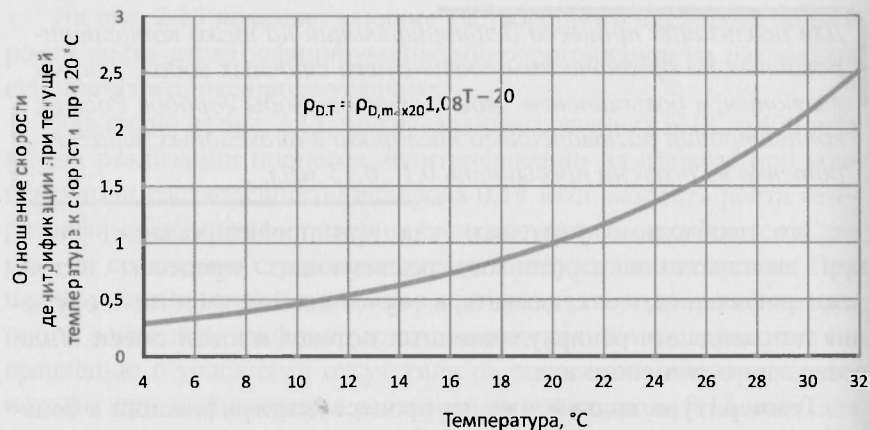
$T$  — абсолютная температура, К.

В практике расчетов процесса денитрификации при биологической очистке сточных вод чаще пользуются следующим эмпирическим уравнением:

$$P_{D,NO_3} = P_{D,NO_3,max20} \cdot 1,08^{T-20}, \quad (2.40)$$

где  $P_{D,NO_3,max20}$  — максимальная скорость процесса денитрификации при температуре 20 °С.

Результаты расчета зависимости скорости денитрификации от температуры в относительных величинах представлены на рис. 2.17.



**Рис. 2.17.** Зависимость отношения скорости денитрификации при текущей температуре к скорости денитрификации при температуре 20 °C от температуры

Уравнение (2.40) справедливо для диапазона температур 5...32 °C. Для процесса денитрификации при температурах 32...38 °C скорости постоянны, а при дальнейшем повышении температуры скорости процесса резко снижаются. При температуре более 45 °C скорость падает до нуля.

**Величина pH** не только влияет на скорость процесса денитрификации, но и определяет состав конечных продуктов восстановления нитратов. Рабочее значение pH для реализации процесса денитрификации находится в пределах 7,0...9,0. При pH ниже 6,5 и выше 9,5 происходит ингибирование процесса денитрификации, при pH = 6 и ниже, а также при pH выше 10 происходит полная остановка процесса.

*Денитрификация, в противоположность нитрификации, увеличивает щелочность среды и вызывает увеличение pH среды в зависимости от буферной емкости среды.*

**Щелочность.** Восстановление 1 мг/л N-NO<sub>3</sub> повышает щелочность иловой смеси на 3,57 мг/л (как CaCO<sub>3</sub>).

**Токсичные вещества** угнетают процессы денитрификации. Нитриты могут тормозить процесс денитрификации при концентрации N-NO<sub>2</sub> выше 30 мг/л. Минерализация воды при концентрации солей до 6,3 г/л на процесс не влияет. В табл. 2.15 даны предельные концентрации различных веществ, которые ингибируют процесс денитрификации.

**Таблица 2.15.** Концентрации веществ, ингибирующих процесс денитрификации [140]

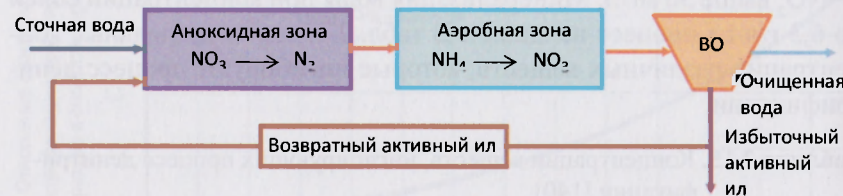
| Вещество            | Концентрация, мг/л |               |             |
|---------------------|--------------------|---------------|-------------|
|                     | Толерантная        | Ингибирование | Токсичность |
| DDDM                | <0,1               | 0,1...0,4     | ≥8          |
| DCDMH               | <25                | 25...100      | >200        |
| BCDMH               | <40                | 40...200      | >250        |
| TCICA               | <2                 | 2...8         | ≥8          |
| NaDCIC              | <2                 | 2...8         | ≥8          |
| Хлорамин Т          | <15                | 15...60       | ≥60         |
| MMPP                | <1000              | 1000...3000   | ≥3000       |
| Глутаровый альдегид | <2                 | 2...20        | ≥20         |
| Формальдегид        | <2                 | 2...50        | ≥50         |
| Mn <sup>2+</sup>    | <6                 | 6...1150      | ≥1150       |
| Ni <sup>2+</sup>    | <5                 | 5...40        | ≥40         |
| Zn <sup>2+</sup>    | <0,65              | 0,65...1,5    | ≥1,5        |
| Cd <sup>2+</sup>    | <0,5               | 0,5...2,5     | ≥2,5        |
| Hg <sup>2+</sup>    | <0,45              | 0,45          | 0,8         |
| Pb <sup>2+</sup>    | <8                 | 8...40        | 170         |

DDDM — дидецилодиметил хлорид аммония; DCDMH — дихлорометилгидантоин; BCDMH — бромхлородиметил гидантоин; TCICA — трихлоризоциануровая кислота; NaDCIC — натриевая соль дихлоризоциануровой кислоты; MMPP — магний монопероскифталат.

### 2.3. Схемы реализации процессов нитри-денитрификации

Рассмотрим наиболее широко распространенные схемы реализации процессов нитри-денитрификации на канализационных очистных сооружениях.

**Схема с предвключенной денитрификацией** (схема Ludzack — Ettinger) (рис. 2.18).



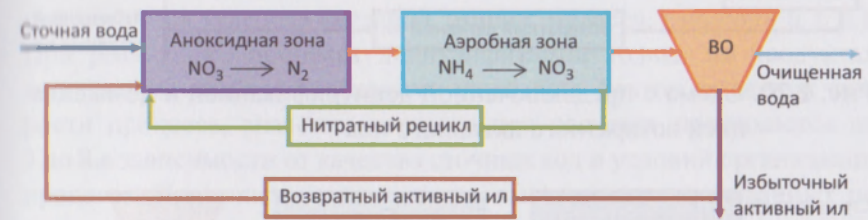
**Рис. 2.18.** Схема с предвключенной денитрификацией — схема Ludzack — Ettinger

Одним из первых концептов реализации процессов нитри-денитрификации в реальных сооружениях является схема, предложенная Ludzack и Ettinger в 1962 г. (рис. 2.18). В данной схеме сточная вода, содержащая органический субстрат и аммонийный азот, поступает в аноксидную зону, куда также поступает возвратный активный ил из вторичных отстойников (ВО). Нитраты, образующиеся в аэробной зоне аэротенка в ходе процесса нитрификации, поступают в аноксидную зону с потоком возвратного активного ила. В результате в аноксидной зоне создаются условия для реализации процесса денитрификации, то есть происходит восстановление нитратов  $\text{NO}_3$  и нитритов  $\text{NO}_2$  до газообразного азота  $\text{N}_2$ . Аммонийный азот, содержащийся в поступающей на биологическую очистку сточной воде, проходит аноксидную зону транзитом (за исключением части азота, потребляемого на прирост биомассы в аноксидных условиях) и поступает в аэробную зону сооружения, где происходят процессы нитрификации. В результате образуются нитриты и затем нитраты. Органические соединения, содержащиеся в сточных водах, окисляются в аноксидной зоне связанным кислородом нитратов, а оставшаяся часть доокисляется в аэробной зоне.

*В схеме с предвключенной денитрификацией Ludzack — Ettinger эффективность денитрификации ограничена количеством нитратов, поступающих в аноксидную зону с потоком возвратного активного ила.*

В дальнейшем эта проблема была решена в модифицированной схеме Ludzack и Ettinger (Modified Ludzack — Ettinger — MLE).

**Модифицированная схема с предвключенной денитрификацией — MLE** (рис. 2.19).



**Рис. 2.19.** Модифицированная схема с предвключенной денитрификацией MLE

В схеме MLE, представленной на рис. 2.19, основным отличием от схемы Ludzack — Ettinger является наличие нитратного рецикла иловой смеси из аэробной зоны аэротенка в аноксидную. Это позволяет обеспечить в аноксидной зоне необходимое количество нитратов, которые требуется удалить из системы для обеспечения качества очищенной воды по  $\text{NO}_3$ . В данной схеме отсутствует лимитирование эффективности удаления нитратов количеством нитратов, подаваемых с рециклом возвратного активного ила. Данная схема доказала свою эффективность и стабильность на протяжении более 40 лет реализации в различных странах мира, и сегодня схема MLE является одним из наиболее надежных и энергоэффективных технологических решений реализации процессов нитри-денитрификации.

Для снижения концентрации растворенного кислорода, поступающего в аноксидную зону с потоком возвратного активного ила, дополнительно можно устанавливать сооружение дезоксидации возвратного активного ила — дезоксидатор (рис. 2.20).

В некоторых случаях устанавливают дезоксидатор и/или на потоке нитратного рецикла (рис. 2.21).

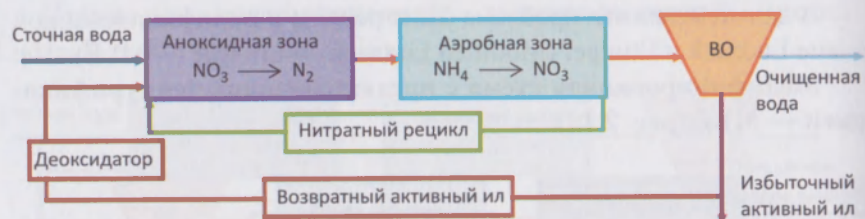


Рис. 2.20. Схема с предвключенной денитрификацией и дезоксидацией возвратного активного ила

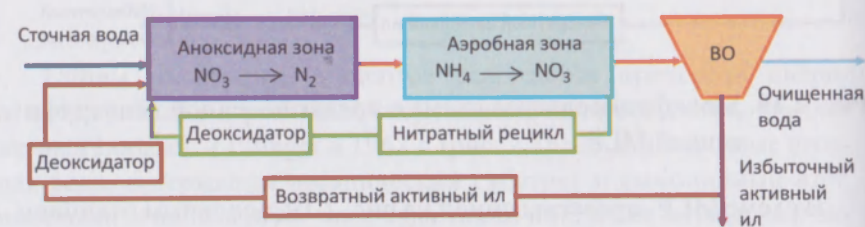


Рис. 2.21. Схема с предвключенной денитрификацией и дезоксидацией возвратного активного ила и/или нитратного цикла

**Схема с пост-денитрификацией (рис. 2.22).**



Рис. 2.22. Схема с пост-денитрификацией (Wuhrmann process)

Денитрификация осуществляется после удаления основного количества органического субстрата и процесса нитрификации в аэробной зоне. В данной схеме в зону денитрификации поступает

иловая смесь, обедненная органическими веществами, которые необходимы для процесса денитрификации. В этом случае источниками органического субстрата для реализации процесса денитрификации являются продукты эндогенного распада биомассы активного ила (лизис микроорганизмов в ходе эндогенного дыхания) и внешний источник углерода (метанол, этанол, меласса, глицерин и т. д.). При реализации процесса денитрификации только на продуктах эндогенного распада необходимо учитывать фактор снижения скорости процесса, значение которого при расчетах принимается от 3 до 8 в зависимости от качества сточных вод и условий организации процесса. При очистке сточных вод, высококонцентрированных по органическим соединениям и с относительно низкими концентрациями аммонийного азота, схема с пост-денитрификацией позволяет достичь эффективного снижения нитратного азота без добавления внешнего источника углерода. В аэробной зоне при высококонцентрированных сточных водах окисляется только часть органических соединений, а оставшейся части может вполне хватить на реализацию процесса денитрификации. В любом случае выбор той или иной схемы должен подтверждаться расчетами.

*Преимущество схемы с пост-денитрификацией над схемой с предвключенной денитрификацией — отсутствие нитратного рецикла.*

**Двухступенчатая схема с пост-денитрификацией (рис. 2.23).**

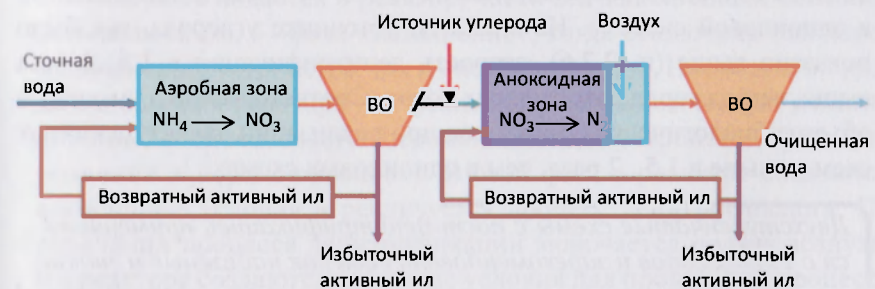


Рис. 2.23. Двухступенчатая схема с пост-денитрификацией

Схема, представленная на рис. 2.23, относится к двухступенным системам, когда для реализации процессов нитрификации и окисления основной части органических соединений используется аэробный активный ил, а для процесса денитрификации культивируется свое сообщество микроорганизмов. В рассматриваемой схеме сточная вода поступает в аэротенк (реактор) 1-й ступени, представляющий собой полностью аэробную зону, где происходят процессы аэробного окисления органических соединений и нитрификация. После аэробного реактора иловая смесь поступает на илоразделение во вторичный отстойник 1-й ступени. Далее вода, прошедшая 1-ю ступень очистки и содержащая нитраты, поступает в аэротенк 2-й ступени, который представляет собой аноксидный реактор, куда также поступает возвратный активный ил из вторичного отстойника 2-й ступени. Для обеспечения аэробных условий активному илу 2-й ступени и для повышения эффективности высвобождения газообразного азота из хлопка ила в конец аноксидного реактора подается воздух.

Преимущество данной технологии заключается в снижении требуемых суммарных объемов аэротенков из-за культивирования илов, наиболее адаптированных к конкретным условиям. В таких системах скорости нитрификации в 1,3...2 раза выше (в мг N-NH<sub>4</sub>/г БВАИ), чем в одноиловых сооружениях, реализующих процессы нитри-денитрификации. Наличие в сооружении только аэробного ила с большой долей нитрифицирующих микроорганизмов позволяет работать с аэробным возрастом ила на 30...60 % ниже, чем необходимо в одноиловой системе. На внешнем источнике углерода, как было показано выше (п. 2.2.6), скорость денитрификации в 1,5...2 раза выше, чем на городских сточных водах. Соответственно, суммарные объемы биологических реакторов при реализации двухступенчатых схем меньше в 1,5...2 раза, чем в одноиловых схемах.

*Двухступенчатые схемы с пост-денитрификацией применяются с 1970-х годов и зарекомендовали себя как надежные и гибкие технологии с широкими возможностями маневрирования технологическим режимом эксплуатации.*

### Реактор периодического действия с пред-денитрификацией (рис. 2.24).

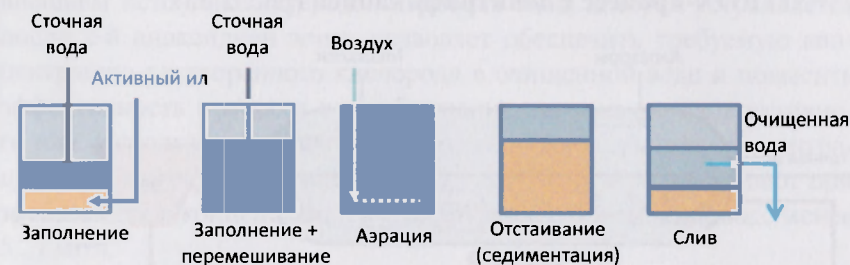


Рис. 2.24. Реактор периодического действия (SBR, СБР) с пред-денитрификацией

Реактор периодического действия (Sequencing Batch Reactor — SBR, СБР) возможно использовать для реализации технологии нитри-денитрификации. Метод обработки воды в реакторах циклического действия был разработан в начале XX века, а его исследования велись на протяжении всего прошлого столетия как в нашей стране, так и за рубежом [47, 48]. В отличие от традиционной схемы «аэротенк + вторичный отстойник», где различные биологические процессы (нитрификация, денитрификация) организуются в различных зонах сооружения, в реакторах периодического действия различные стадии процессов разделены во времени. Последовательность этапов в SBR выглядит следующим образом. Сточная вода подается в реактор, частично заполненный осевшим активным илом, — фаза «заполнение», когда отключены как перемешивающие устройства, так и система аэрации. После или во время заполнения реактора поступающей на биологическую очистку сточной водой включается перемешивающее устройство (фаза «заполнение + перемешивание»). В этой фазе в реакторе создаются аноксидные условия и реализуется процесс денитрификации. По окончании процесса денитрификации включается подача воздуха, и в реакторе создаются аэробные условия для проведения процесса нитрификации. После завершения процесса нитрификации подача воздуха прекращается и в реакторе происходит отделение ила от

чистой воды. За фазой седиментации ила следует фаза слива чистой воды (декантирование).

**NITROX-процесс с денитрификацией** (рис. 2.25).

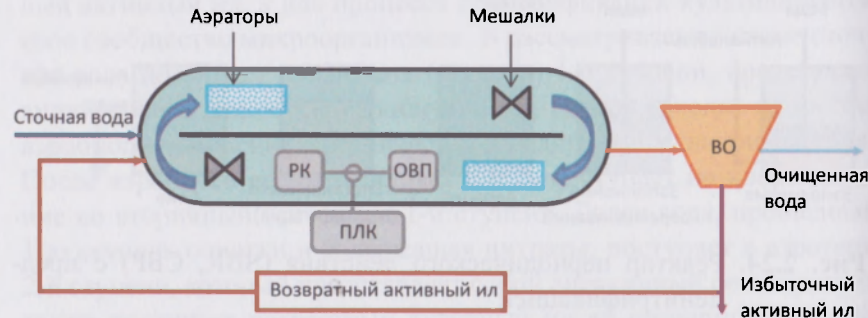


Рис. 2.25. Схема NITROX-процесса с денитрификацией

Схема NITROX реализует технологию нитри-денитрификации в окислительном канале, где последовательно расположены аэраторы и механические перемешивающие устройства. С помощью программируемого логического контроллера (ПЛК) аэробные условия работы сооружения (включение подачи воздуха) сменяются анаэробными (выключение подачи воздуха и включение мешалок) с учетом показаний анализатора концентрации растворенного кислорода (РК) и анализатора Eh (окислительно-восстановительного потенциала (ОВП)). Максимальная скорость движения иловой смеси в окислительном канале составляет 3 м/с. Периодическая нитри-денитрификация, заложенная в схему NITROX, позволяет менять соотношение времени нитрификации и денитрификации в зависимости от текущего качества и количества сточных вод, поступающих на биологическую очистку. В результате достигается стабильное качество очищенной воды в реальных условиях изменения поступающей нагрузки.

**Четырехстадийный Барденфо-процесс (Bardenpho — 4-stage)** (рис. 2.26). В схеме четырехстадийного Барденфо-процесса 1-я анаэробная зона реализует процесс денитрификации на органическом субстрате, который содержится в поступающей сточной воде, а нитраты поступают с потоками возвратного активного ила и нитратно-

го рецикла. В 1-й аэробной зоне проходит процесс нитрификации, во 2-й анаэробной зоне проходит процесс глубокой денитрификации на внешнем источнике углерода. Аэробная зона, которая устраивается после 2-й анаэробной зоны, позволяет обеспечить требуемую концентрацию растворенного кислорода в очищенной воде и повысить эффективность процесса высвобождения азота из хлопков активного ила. Использование данной схемы позволяет достичь концентрации азота нитратов в очищенной воде до 1 мг/л, и ее применяют при требованиях к концентрации азота нитратов в очищенной воде менее 5...7 мг/л.

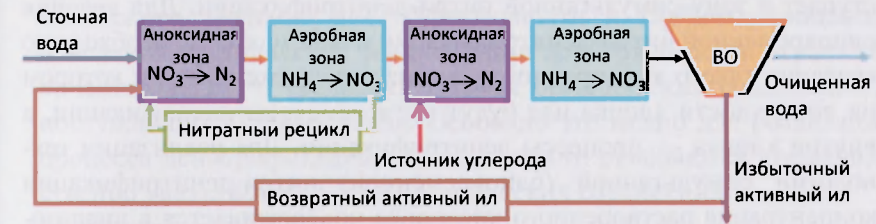


Рис. 2.26. Четырехстадийный Барденфо-процесс

**Схема с предвключенной денитрификацией и постсимультанной нитри-денитрификацией** (рис. 2.27).

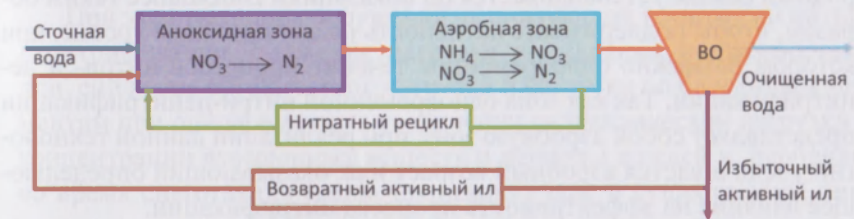


Рис. 2.27. Схема с предвключенной денитрификацией и постсимультанной нитри-денитрификацией

Как было показано в п. 2.2.3, при создании определенного кислородного режима в аэробной зоне аэротенка возможно достичь условий, когда внутри хлопка активного ила образуются анаэробные условия, а по периферии — аэробные условия. Этот эффект используют для

организации в одном объеме сооружения двух параллельно идущих процессов — нитрификации и денитрификации. Данный процесс называется симультанной (одновременной) нитри-денитрификацией.

На рис. 2.27 представлена схема с предвключенной денитрификацией и постсимультанной нитри-денитрификацией.

В сооружениях, реализующих данную схему, сточная вода поступает в аноксидную зону, где смешивается с возвратным активным илом из вторичного отстойника и нитратным рециклом (рециклом иловой смеси из аэробной зоны в аноксидную). В аноксидной зоне происходит частичная денитрификация, и далее иловая смесь поступает в зону симультанной нитри-денитрификации. Для ведения одновременной нитри-денитрификации в одном объеме необходимо создание такого кислородного режима в сооружении, при котором на поверхности хлопка ила будут идти процессы нитрификации, а внутри хлопка — процессы денитрификации. Для реализации технологии симультанной (одновременной) нитри-денитрификации концентрация растворенного кислорода поддерживается в диапазоне 0,3...0,8 мг/л. Регулирование подачи кислорода осуществляется с учетом показаний специального прибора Био-Баланс (BioBalance), принцип работы которого основан на определении суммарного уровня биохимической активности микроорганизмов активного ила. Кислородный режим устанавливается по показаниям BioBalance таким образом, чтобы поддерживать активность на оптимальном уровне, при котором возможно одновременное течение процессов нитри- и денитрификации. Так как зона одновременной нитри-денитрификации представляет собой аэробную зону, при реализации данной технологии увеличивается аэробный возраст ила, оказывающий определяющее влияние на эффективность процесса нитрификации.

#### 2.4. Эксплуатация очистных сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации. Проблемы и решения

Важным моментом надежной эксплуатации сооружений, работающих по технологии удаления биогенных элементов, является эффективный контроль количественных и качественных параметров

поступающих сточных вод. В табл. 2.16 приведены наиболее важные показатели сточных вод, поступающих на биологическую очистку, которые требуют постоянного контроля и мониторинга.

При анализе эксплуатационных параметров сточных вод, поступающих на биологическую очистку, необходимо отметить:

*Низкие нагрузки как по органическим соединениям, так и по соединениям азота и фосфора оказывают больше негативного воздействия на протекание биохимических процессов, чем повышенные нагрузки.*

Важное значение для эффективности и глубины процессов окисления органических соединений и денитрификации играет количество легко- и среднеокисляемых органических соединений в поступающих сточных водах. Особенно это важно для реализации процесса денитрификации, в ходе которого окисляются преимущественно указанные фракции органических соединений.

*Важность количественного определения легко- и среднеокисляемых органических соединений в поступающих сточных водах ведет к безусловной необходимости в ходе эксплуатации очистных сооружений рассчитывать отношение  $BPK_{полн}$  к  $BPK_5$ .*

При эксплуатации сооружений, реализующих технологии нитри-денитрификации, снижение нагрузки в выходные и праздничные дни, снижение органической нагрузки и нагрузки по биогенным элементам при одновременном увеличении гидравлической нагрузки и концентрации взвешенных веществ в периоды дождей и, особенно, во время снеготаяния (когда происходит еще и существенное снижение температуры) ведут к снижению эффективности процессов нитрификации и денитрификации.

Увеличение гидравлической нагрузки приводит к снижению времени пребывания сточных вод в сооружениях и, как следствие, к недостижению проектной эффективности биохимических процессов и повышению концентрации взвешенных веществ на выходе из вторичных отстойников.

Таблица 2.16. Показатели контроля и мониторинга сточных вод, поступающих на биологическую очистку (для технологии нитри-денитрификации)

| Наименование показателя  | Регламентное значение эксплуатационных параметров   | Технические эксплуатационные параметры  | Примечание   |
|--|---|---|--|
| Текущий суточный расход сточных вод                              | Не более проектного значения расхода и не менее, чем процентное значение минимального суточного расхода             | Определяется ежедневно по данным за предыдущие сутки                              |  |
| Среднесуточный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут**         | Не более проектного значения среднесуточного расхода и не менее 30 % от проектного значения среднесуточного расхода | Определяется 1 раз в 3 месяца по данным суточных расходов на последние 12 месяцев | На единицу работющего сооружения   |
| Максимальный суточный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут*** | Не более проектного значения максимально суточного расхода  | Определяется ежедневно по данным за предыдущие сутки                              |  |
| Месячный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут***              | Не более проектного значения максимально месячного расхода  | Определяется 1 раз в месяц по данным суточных расходов на предыдущий месяц        |  |
| Значение БПК <sub>5</sub>  | ±10 % от проектного значения  | Определяется согласно графику аналитического контроля                             | При превышении значениям БПК <sub>5</sub> проектных более чем на 10 % происходит снижение эффективности удаления органических соединений и процессов нитрификации; следовательно процессов нитрификации; БПК <sub>5</sub> ниже проектных более чем на 10 % происходит снижение эффективности процесса денитрификации |

|   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| Значение БПК <sub>полн</sub>                              | ±10 % от проектного значения   | Определяется 1 раз в месяц или согласно графику аналитического контроля | При превышении значениям БПК <sub>полн</sub> проектных более чем на 10 % происходит снижение эффективности удаления органических соединений и процессов нитрификации; при значениях БПК <sub>полн</sub> ниже проектных более чем на 10 % происходит снижение эффективности процесса денитрификации                         |
| БПК <sub>полн</sub> /БПК <sub>5</sub>                     | —  | Рассчитывается по данным лабораторного контроля                         | При расчете значения БПК <sub>полн</sub> принимается последнее значение БПК <sub>5</sub> лабораторного контроля  |
| Значение ХПК  | ±15 % от проектного значения   | Определяется согласно графику аналитического контроля                   | При превышении значениям ХПК проектных более чем на 15 % происходит снижение эффективности удаления органических соединений и процессов нитрификации; при значениях ХПК ниже проектных более чем на 15 % происходит снижение эффективности процесса денитрификации   |
| Концентрация взвешенных веществ, мг/л                     | Не более проектного значения   | Определяется согласно графику аналитического контроля                   | При превышении концентрации взвешенных веществ проектных значений происходит увеличение количества избыточного активного ила, при увеличении расхода избыточного активного ила, и увеличение аэробного роста активного ила. Как следствие — снижение эффективности процесса нитрификации (вылго до полного срыва процесса) |
| Концентрация аммонийного азота (N-NH <sub>4</sub> ), мг/л | Не более проектного значения, отношение общего азота по Кьельдалю (TKN) к значению БПК <sub>полн</sub> должно быть не менее 0,05 | Определяется согласно графику аналитического контроля                   | —  |



Окончание табл. 2.16

| Наименование показателя                                | Регламентное значение* эксплуатационных параметров   | Текущие эксплуатационные параметры  | Примечание  |
|--|--|---|---|
| Концентрация азота нитратов (N-NO <sub>3</sub> ), мг/л | Не более проектного значения, отношение общего азота по Кьельдалю (TKN) к азоту по БПК <sub>полн</sub> должно быть не менее 0,05 | Определяется согласно графику аналитического контроля                     | —   |
| Концентрация азота нитритов (N-NO <sub>2</sub> ), мг/л |  |   |   |
| Общий азот по Кьельдалю (TKN), мг/л                    |  | Определяется согласно графику аналитического контроля 1 или 1 раз в месяц | Данный показатель требуется обязательно контролировать при нестабильности или срыве биохимических процессов (окисления органических соединений, нитрификации, денитрификации) для определения причин проблемы |
| TKN/БПК <sub>полн</sub>                                | Не менее 0,05  | Рассчитывается по данным лабораторного контроля                           | —   |
| Фосфор фосфат (P-PO <sub>4</sub> ), мг/л               | Не более проектного значения, Р <sub>общ</sub> /БПК <sub>полн</sub> должно быть не менее 0,01                                    | Определяется согласно графику аналитического контроля                     | —   |
| Общий фосфор Р <sub>общ</sub> , мг/л                   |  |   |   |
| Р <sub>общ</sub> /БПК <sub>полн</sub>                  | Не менее 0,01  | Рассчитывается по данным лабораторного контроля                           | —   |
|  |  | Определяется согласно графику аналитического контроля 1 раз в месяц       | Данный показатель требуется обязательно контролировать при нестабильности или срыве биохимических процессов (окисления органических соединений, нитрификации, денитрификации) для определения причин проблемы |

|                                       |   |   |   |
|---------------------------------------|---|---|---|
| Температура, °С                       | Не более максимального и не менее минимального проектного значения                  | Определяется в соответствии с графиком аналитического контроля или онлайн-измерение | —   |
| Щелочность, мг-экв/л                  | Не менее проектного значения  | Определяется согласно графику аналитического контроля                               | —   |
| pH                                    | 6,5...8,5   | Определяется согласно графику аналитического контроля или онлайн-измерение          | —   |
| Специфические органические соединения | Не более проектного значения, концентрация не должна превышать порога ингибирования | Определяется согласно графику аналитического контроля или в экстренных ситуациях    | Перечень специфических органических соединений, требующих периодического определения, предоставляется в Проектном отчете о выполнении и дополнителном списке, составленном на основе опыта эксплуатации очистных сооружений |
| Металлы                               |   |   |   |

\* Предлагаемые регламентные параметры эксплуатации сооружений могут быть откорректированы с учетом конкретного проекта очистных сооружений.

\*\* Суточный расход сточных вод представляет собой отношение суммарного количества сточных вод, поступающих на очистные сооружения за рассматриваемый промежуток времени (как правило, за год), к количеству суток рассматриваемого периода, м<sup>3</sup>/сут.

\*\*\* Максимальный суточный расход сточных вод определяется по количеству сточных вод, поступающих на очистные сооружения в сутки и максимально прироста в сутки в период пикового промежутка времени (как правило, за год, м<sup>3</sup>/сут).

\*\*\*\* Максимальный месячный расход сточных вод определяется по количеству сточных вод, поступающих на очистные сооружения за месяц, с максимальным приростом в течение рассматриваемого промежутка времени (как правило, за год), к количеству суток в месяце максимального притока, м<sup>3</sup>/сут.

Как было показано выше (п. 2.2.3), для реализации процесса нитрификации при эксплуатации сооружений необходимо обеспечение следующих условий:

- достаточного количества нитрифицирующих автотрофных микроорганизмов, которые способны синтезировать все необходимые для своего роста вещества из простых неорганических солей (этот результат достигается обеспечением проектного значения аэробного возраста активного ила);
  - требуемого количества кислорода;
  - необходимых значений щелочности и рН среды для реализации процесса нитрификации с заданной эффективностью;
  - достаточного времени нахождения сточной воды в зоне нитрификации с учетом текущей температуры для проведения процесса;
  - отсутствия токсичных для процесса нитрификации веществ.
- Для реализации процесса денитрификации (п. 2.2.6) требуется:
- наличие денитрифицирующих (факультативных гетеротрофных) микроорганизмов;
  - наличие органического субстрата (в необходимом для заданной эффективности процесса количестве);
  - создание аноксидных условий — наличие нитратов и отсутствие (минимизация) растворенного кислорода;
  - оптимальное значение рН среды для ведения процесса денитрификации;
  - достаточное время нахождения сточной воды в зоне денитрификации с учетом текущей температуры;
  - отсутствие токсичных для процесса денитрификации веществ.

Несоответствие текущих качественных и количественных показателей сточной воды, поступающей на биологическую очистку, проектным ведет к снижению эффективности биохимических процессов, что не позволяет достичь качества очищенной воды, заложенного в проект.

Анализ качественных и количественных показателей сточной воды, поступающей на биологическую очистку, является первым шагом анализа работы сооружений при выполнении эксплуатационного (оперативного) контроля. В табл. 2.17 описаны возможные

последствия несоответствия проектных и текущих качественных и количественных параметров сточной воды, поступающей на биологическую очистку, и приведены меры по обеспечению максимальной эффективности процессов в реальной ситуации. Фактические значения контролируемых показателей сточных вод, поступающих на биологическую очистку, определяются на основании анализа представительных (среднесуточных) проб сточных вод и сведений по учету и контролю параметров, получаемых с помощью приборов.

Анализ таблицы 2.17 показывает:

*Качественные и количественные характеристики сточных вод, поступающих на биологическую очистку, напрямую влияют на эффективность ведения биохимических процессов и возможность обеспечения проектных показателей очищенной воды. При наличии на очистных сооружениях первичных отстойников возможна некоторая коррекция качества воды, поступающей в аэротенки (см. табл. 2.17). Однако при стойком несоответствии входных характеристик поступающих сточных вод проектным значениям необходимо ставить вопрос о технической модернизации очистных сооружений.*

Контроль работы технологических параметров сооружений биологической очистки осуществляется на всех этапах и стадиях для регулирования процессов очистки и оперативного принятия решений.

В табл. 2.18 приведены рекомендуемые нами показатели контроля сооружений биологической очистки сточных вод, реализующих процессы нитри-денитрификации.

В реальных условиях эксплуатации расходы возвратного активного ила и нитратного рецикла могут быть откорректированы с учетом текущего качества сточных вод, поступающих на биологическую очистку. В аноксидную зону сооружения с рециклом возвратного ила и нитратным рециклом должно поступать такое количество нитратов, которое требуется проденитрифицировать для обеспечения проектного качества очищенной воды по нитратам.

**Таблица 2.17.** Последствия несоответствия текущих параметров сточных вод проектным

| Возможные последствия  | Действия персонала  |
|--|---|
| <b>Превышение расходом сточных вод проектных значений на один из азротенков или несколько азротенков при соответствии текущего расхода, поступающего на очистные сооружения в целом, проектному значению</b>   |   |
| Уменьшение времени пребывания сточной воды в данном сооружении и, как следствие, превышение качественных показателей очищенной воды над проектными (в первую очередь по соединениям азота) в данном сооружении и в смешанном потоке очищенной воды очистных сооружений в целом   | Перераспределить подачу сточной воды равномерно по всем азротенкам  |
| Снижение удельного расхода воздуха в данном сооружении и, как следствие, повышение аммонийного азота и азота нитритов в очищенной воде в данном сооружении и в смешанном потоке очищенной воды очистных сооружений в целом   |   |
| <b>Постоянное превышение расходом сточных вод, поступающих на очистные сооружения в целом, проектного значения не более чем на 10 %</b>  |   |
| Увеличение прироста активного ила и уменьшение значения аэробного возраста активного ила и, как следствие, превышение аммонийного азота, азота нитритов и взвешенных веществ в очищенной воде  | Снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках, провести технические и технологические мероприятия по повышению эффективности работы сооружений механической очистки. Для решения проблемы увеличения концентрации взвешенных веществ в очищенной воде снизить до минимально возможного уровень ила во вторичных отстойниках |
| <b>Постоянное превышение расходом сточных вод, поступающих на очистные сооружения в целом, проектного значения более чем на 10 %</b>   |   |
| Уменьшение времени пребывания сточной воды в сооружениях, снижение эффективности работы сооружений механической очистки, увеличение прироста активного ила и уменьшение значения аэробного возраста активного ила, что приводит к снижению эффективности (вплоть до срыва) процессов нитрификации, снижение удельного расхода воздуха в сооружении и, как следствие, превышение всеми качественными показателями очищенной воды проектных данных | Проведение технической модернизации (реконструкции) сооружений для повышения окислительной мощности существующих сооружений или расширение (новое строительство) очистных сооружений  |

**Продолжение табл. 2.17**

| Возможные последствия  | Действия персонала  |
|--|---|
| <b>Превышение значениями БПК<sub>5</sub> (БПК<sub>полн</sub>) проектных данных на 10...20 %, ХПК — на 15...25 %</b>  |   |
| Увеличение прироста активного ила и уменьшение значения аэробного возраста активного ила, недостаточное количество подаваемого воздуха и, как следствие, превышение аммонийным азотом, азотом нитритов и значением БПК <sub>полн</sub> в очищенной воде проектных значений   | Снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках; провести технические и технологические мероприятия по повышению эффективности работы сооружений механической очистки; увеличить удельную норму кислорода воздуха исходя из текущего значения БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> ) сточной воды, поступающей на биологическую очистку              |
| <b>Превышение значениями БПК<sub>5</sub> (БПК<sub>полн</sub>) проектных данных более чем на 20 %, ХПК — более чем на 25 %</b>  |   |
| Увеличение прироста активного ила и уменьшение значения аэробного возраста активного ила, недостаточное количество подаваемого воздуха, недостаточное время пребывания сточных вод в азротенках для обеспечения проектной эффективности процесса окисления органических соединений и, как следствие, превышение аммонийным азотом, азотом нитритов и значением БПК <sub>полн</sub> в очищенной воде проектных значений | Проведение технической модернизации (реконструкции) сооружений для повышения окислительной мощности существующих сооружений или расширение (новое строительство) очистных сооружений  |
| <b>Значение БПК<sub>5</sub> (БПК<sub>полн</sub>) меньше проектных более чем на 10 %</b>  |   |
| Недостаточное количество органических соединений для обеспечения требуемой эффективности процесса денитрификации и, как следствие, превышение азотом нитратов в очищенной воде проектных значений  | Увеличить уровень заложения осадка в первичных отстойниках. (Вывод из работы первичных отстойников в этой ситуации крайне нежелателен, это приведет к увеличению концентрации взвешенных веществ в осветленной воде и, как следствие, к увеличению прироста ила и снижению его аэробного возраста. Результат: увеличение аммонийного азота и азота нитритов в очищенной воде) |
| <b>Превышение концентрацией взвешенных веществ проектных значений</b>  |   |
| Увеличение прироста активного ила и уменьшение значения аэробного возраста активного ила и, как следствие, превышение аммонийным азотом и азотом нитритов в очищенной воде проектных значений  | Снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках, провести технические и технологические мероприятия по повышению эффективности работы сооружений механической очистки   |

Продолжение табл. 2.17

| Возможные последствия  | Действия персонала  |
|--|---|
| <b>Превышение концентрации аммонийного азота (N-NH<sub>4</sub>), общего азота по Кьельдалю (TKN) и общего азота (TN) над проектными значениями</b>   |   |
| Увеличение концентрации азота аммонийного, азота нитритов и азота нитратов в очищенной воде  | Провести технологические и технические мероприятия по повышению окислительной мощности сооружений, в том числе максимально увеличить дозу активного ила в аэротенках с учетом возможностей вторичных отстойников, увеличить расход воздуха для обеспечения требуемого количества кислорода с учетом текущей концентрации азота в поступающих на биологическую очистку сточных водах |
| <b>Отношение общего азота по Кьельдалю (TKN) к значению БПК<sub>полн</sub> менее 0,05</b>  |   |
| Снижение скорости роста гетеротрофных микроорганизмов и, как следствие, увеличение значения БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> , ХПК) и азота нитратов в очищенной воде   | Обеспечить дозирование дополнительного источника азота в сточную воду, поступающую на биологическую очистку (или в поток возвратного активного ила, или прямо в аэротенки)  |
| <b>Отношение концентрации общего фосфора P<sub>общ</sub> к значению БПК<sub>полн</sub> менее 0,01</b>  |   |
| Снижение скорости роста автотрофных (нитрифицирующих) и гетеротрофных микроорганизмов и, как следствие, увеличение концентрации аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов и значений БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> , ХПК) в очищенной воде   | Обеспечить дозирование дополнительного источника фосфора в сточную воду, поступающую на биологическую очистку (или в поток возвратного активного ила, или прямо в аэротенки)  |
| <b>Температура поступающей сточной воды выше максимального проектного значения (но не более 38 °С)</b>   |   |
| Снижение растворимости кислорода в иловой смеси и, как следствие, необеспеченность необходимого количества кислорода для реализации биологических процессов проектной эффективности, увеличение концентраций аммонийного азота, азота нитритов, значений БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> , ХПК) в очищенной воде | Увеличить подачу воздуха в аэротенки до расчетного значения с учетом текущей температуры сточной воды   |
| <b>Температура поступающей сточной воды выше 38 °С</b>   |   |
| Снижение эффективности биохимических процессов (при температуре более 40 °С — полный срыв процессов)   | Установить сооружения или оборудование для охлаждения сточных вод   |
| <b>Температура поступающей сточной воды ниже минимального проектного значения</b>  |   |
| Снижение скоростей биохимических процессов и, как следствие, увеличение концентрации аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов, значений БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> , ХПК) в очищенной воде   | Обеспечить, при возможности, нагрев сточной воды, поступающей на биологическую очистку, или иловой смеси непосредственно в аэротенках   |

Окончание табл. 2.17

| Возможные последствия  | Действия персонала  |
|--|---|
| <b>Щелочность менее проектного значения</b>  |   |
| Ограничение нитрификационной возможности процесса и, как следствие, превышение аммонийного азота и азота нитритов в очищенной воде   | Обеспечить дозирование щелочи (как правило, NaOH) в сточную воду, поступающую на биологическую очистку (или в поток возвратного активного ила, или непосредственно в аэротенки)                                       |
| <b>pH поступающей сточной воды не соответствует требуемому диапазону реализации биохимических процессов</b>  |   |
| Срыв процессов нитрификации, денитрификации, аэробного окисления органических соединений и, как следствие, увеличение концентрации аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов, значений БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> , ХПК) в очищенной воде   | Установить систему регулирования pH с мониторингом значений pH поступающей сточной воды и дозированием щелочи и кислоты   |
| <b>Превышение предела ингибирования (по концентрациям) специфическими органическими соединениями, содержащимися в поступающих на биологическую очистку сточных водах</b>   |   |
| Срыв процессов нитрификации, денитрификации, аэробного окисления органических соединений и, как следствие, увеличение концентрации аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов, значений БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> , ХПК) в очищенной воде   | Выявить источники сброса специфических ингибирующих органических соединений и обеспечить прекращение сброса, на период сброса увеличить на 30...50 % расход подаваемого воздуха                                       |
| <b>Превышение предела ингибирования (по концентрациям) металлами, содержащимися в поступающих на биологическую очистку сточных водах</b>   |   |
| Срыв процессов нитрификации, денитрификации, аэробного окисления органических соединений и, как следствие, увеличение концентраций аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов, значений БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> , ХПК) в очищенной воде   | Выявить источники сброса специфических ингибирующих органических соединений и обеспечить прекращение сброса   |
| <b>Залповый сброс нефтепродуктов, СПАВ или других органических загрязнений (залповое увеличение значения ХПК в поступающей сточной воде)</b>   |   |
| Резкое уменьшение концентрации растворенного кислорода в аэробных зонах сооружения, срыв процессов нитрификации, снижение эффективности процессов денитрификации, аэробного окисления органических соединений, развитие процессов пенообразования и вспухания активного ила и, как следствие, увеличение концентраций аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов, значений БПК <sub>5</sub> (БПК <sub>полн</sub> , ХПК) и взвешенных веществ в очищенной воде | Увеличить на 30...50 % расход подаваемого воздуха. Увеличить на 25 % расход избыточного активного ила. Нормализация кислородного режима происходит в течение 3...5 сут после прекращения сброса нефтепродуктов и СПАВ |

**Таблица 2.18.** Контролируемые параметры эксплуатации аэротенков, работающих по технологии нитри-денитрификации

| Наименование показателя   | Регламентное значение* эксплуатационных параметров   | Текущие эксплуатационные параметры   |
|---|--|--|
| Расход сточной воды, м <sup>3</sup> /сут  | Не более проектного значения и не менее 80 % от проектного значения                                      | Текущее значение за предыдущие сутки   |
| Расход сточной воды, м <sup>3</sup> /ч  | Не более проектного значения и не менее 80 % от проектного значения                                      | Текущее значение за предыдущие сутки (определяется как отношение суточного расхода поступающих сточных вод за предыдущие сутки к количеству часов в сутках (24 ч)) |
| Расход возвратного активного ила, м <sup>3</sup> /ч   | ±10 % от проектного значения   | Определяется по текущим показателям работы насосов   |
| Расход рецикла нитратов, м <sup>3</sup> /ч  | ±10 % от проектного значения или расчетное значение исходя из текущего качества поступающей сточной воды | Определяется по текущим показателям работы насосов   |
| Отношение расхода возвратного активного ила к расходу сточной воды  | ±10 % от проектного значения   | Рассчитывается по текущим реальным данным  |
| Отношение расхода нитратного рецикла к расходу сточной воды   |  |  |
| Доза активного ила на выходе из аэробной зоны аэротенка, г/л  | ±20 % от проектного значения   | Определяется по данным аналитического контроля   |
| Доза возвратного активного ила, г/л   |  |  |
| Доза избыточного активного ила, г/л   |  |  |
| Зольность активного ила, %  | Реальное значение  |  |
| Иловый индекс, см <sup>3</sup> /г   | 130...160  |  |
| Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне:<br><i>Аэротенк-вытеснитель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне (на расстоянии 0,33 <i>l</i> от начала аэробной зоны, где <i>l</i> — длина зоны), мг/л; | 1,8...2,0  | Определяется по данным стационарных или переносных приборов-кислородомеров   |

**Окончание табл. 2.18**

| Наименование показателя  | Регламентное значение* эксплуатационных параметров                           | Текущие эксплуатационные параметры   |
|--|--|--|
| Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне (на расстоянии 0,66 <i>l</i> от начала аэробной зоны, где <i>l</i> — длина зоны), мг/л<br><i>Аэротенк-смеситель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне, мг/л              | 2,0...2,3  | Определяется по данным стационарных или переносных приборов-кислородомеров   |
| Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне:<br><i>Аэротенк-вытеснитель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне (на расстоянии менее 5 м от точек подачи нитратного рецикла и возвратного активного ила), мг/л;    | <0,2   |  |
| Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне (на расстоянии более 5 м от точек подачи нитратного рецикла и возвратного активного ила), мг/л;<br><i>Аэротенк-смеситель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне, мг/л | 0...0,1  | Определяется по данным стационарных или переносных приборов-кислородомеров   |
| Количество избыточного активного ила, м <sup>3</sup> /сут  | Расчетное значение, обеспечивающее проектное значение возраста активного ила |  |
| Общий возраст ила, сут   | ±10 % от проектного значения   | Рассчитывается по данным аналитического контроля (доза активного ила) и реальным данным количества избыточного активного ила |
| Аэробный возраст ила, сутки  |  |  |

\* Предлагаемые регламентные параметры эксплуатации сооружений могут быть откорректированы с учетом конкретного проекта очистных сооружений.

Расчет требуемых расходов рециклов возвратного активного ила и нитратного рецикла основывается на следующем уравнении материального баланса:

$$Q_d \cdot \Delta NO_x = N_e \cdot R_N \cdot Q_d + N_e \cdot R_{sl} \cdot Q_d + N_e \cdot Q_d \quad (2.41)$$

где  $\Delta NO_x$  — концентрация нитратов, которую необходимо удалить в ходе процесса денитрификации, мг/л или г/м<sup>3</sup>;

$N_e$  — концентрация нитратов в очищенной воде, мг/л или г/м<sup>3</sup>;

$Q_d$  — расход очищенной воды, равный расходу поступающей на биологическую очистку сточной воды, м<sup>3</sup>/сут;

$R_{sl}$  — рецикл возвратного активного ила, который представляет собой отношение расхода возвратного активного ила к расходу поступающей на биологическую очистку сточной воды;

$R_N$  — нитратный рецикл, который представляет собой отношение расхода нитратного рецикла к расходу поступающей на биологическую очистку сточной воды.

При эксплуатации сооружений биологической очистки расход возвратного активного ила определяется с учетом обеспечения требуемого (проектного) количества активного ила, подаваемого в аэротенк с минимальными эксплуатационными затратами. Исходя из этого при эксплуатации сооружений биологической очистки:

*Задача рецикла возвратного ила — обеспечить необходимое количество активного ила в аэротенках и минимизировать уровень осевшего ила во вторичных отстойниках.*

Значение рецикла возвратного ила не зависит от качества поступающей в аэротенк сточной воды.

*Задача нитратного рецикла — обеспечить такое количество нитратов в аноксидной зоне, удаление которого обеспечит требуемое качество нитратов в очищенной воде.*

Значение нитратного рецикла напрямую зависит от качества сточных вод, поступающих на биологическую очистку, и рассчитывается из уравнения (2.41) по следующей формуле:

$$R_N = \frac{\Delta NO_x}{N_e} - 1 - R_{sl} \quad (2.42)$$

При реализации технологии нитри-денитрификации значение илового индекса редко бывает ниже, чем 130 см<sup>3</sup>/г, в отличие от традиционных технологий аэробного окисления органических соединений или технологий аэробного окисления органических соединений и полной нитрификации. В штатных условиях работы сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации, значение илового индекса составляет 130...160 см<sup>3</sup>/г и в отдельных случаях может достигать 180 см<sup>3</sup>/г.

Для достижения проектного качества очищенной воды необходимо соблюдать кислородный режим как в зоне нитрификации, так и в зоне денитрификации. Подробно влияние кислородного режима как на процессы нитрификации, так и на процессы денитрификации были нами рассмотрены в п. 2.2.

При эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод количество избыточного активного ила может существенно отличаться от проектного. Задача служб эксплуатации — обеспечить проектное значение возраста (как общего, так и аэробного) активного ила. О необходимости поддержания расчетного возраста активного ила было подробно написано в п. 2.2.3.

Количество избыточного активного ила, м<sup>3</sup>/сут, которое необходимо отводить из системы, определяется по формуле (2.43), полученной на основании формулы расчета аэробного возраста ила (2.12):

$$Q_{was} = \frac{N_{aer} V_{aer} X_{aer}}{\theta_{tot, design} X_{was}} \quad (2.43)$$

$N_{aer}$  — количество работающих аэротенков;

$V_{aer}$  — объем одного аэротенка, м<sup>3</sup>;

$X_{aer}$  — доза активного ила в аэротенке, г/л или кг/м<sup>3</sup>;

$\theta_{tot\ design}$  — проектное значение общего возраста активного ила, сут;  
 $X_{was}$  — доза избыточного активного ила, г/л или кг/м<sup>3</sup>.

В табл. 2.19 приведены возможные нарушения технологических параметров сооружений биологической очистки, реализующих технологии нитри-денитрификации, и даны рекомендации по восстановлению нормального режима их работы.

**Таблица 2.19.** Нарушения технологических параметров работы сооружений биологической очистки сточных вод (при реализации технологий нитри-денитрификации)

| Нарушение технологического режима   | Действия персонала по устранению нарушений   |
|---|--|
| <p>Пониженная концентрация растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенка:</p> <p><i>Аэротенк-вытеснитель:</i><br/>                     концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне (на расстоянии 0,33<i>l</i> от начала аэробной зоны, где <i>l</i> — длина зоны) менее, чем 1,8...2,0 мг/л;</p> <p>концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне (на расстоянии 0,66<i>l</i> от начала аэробной зоны, где <i>l</i> — длина зоны) менее, чем 2,0...2,3 мг/л</p> <p><i>Аэротенк-смеситель:</i><br/>                     концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне менее, чем 1,8...2,3 мг/л</p> | <p>При кратковременном уменьшении концентрации растворенного кислорода (до 3-х суток):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличить расход воздуха, подаваемого в аэротенки, на 20...30 % по сравнению с регламентным значением;</li> <li>- выровнять концентрацию растворенного кислорода по длине аэробной зоны с помощью задвижек стояков аэрационной системы;</li> <li>- провести внеочередной анализ качественного состава поступающих сточных вод, определить возможные причины снижения концентрации растворенного кислорода;</li> <li>- снизить уровень осадка в первичных отстойниках до минимально возможного.</li> </ul> <p>При ежесуточных снижениях концентрации растворенного кислорода в часы максимальных нагрузок по органическим соединениям и аммонийному азоту необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- провести оптимизацию кислородного профиля по длине сооружения;</li> <li>- установить систему автоматического регулирования подачи воздуха по показаниям кислородомера в аэробных зонах.</li> </ul> <p>При устойчивом тренде снижения концентрации растворенного кислорода с момента замены аэрационной системы при проектных параметрах сточной воды, поступающей на биологическую очистку, необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- оценить состояние аэрационной системы;</li> <li>- провести мероприятия по чистке, ремонту или замене аэраторов</li> </ul> |

**Продолжение табл. 2.19**

| Нарушение технологического режима  | Действия персонала по устранению нарушений  |
|--|---|
| <p>Повышенная концентрация растворенного кислорода в аноксидных зонах аэротенка:</p> <p><i>Аэротенк-вытеснитель:</i><br/>                     концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне (на расстоянии менее 5 м от точек подачи нитратного рецикла и возвратного активного ила) более 0,2 мг/л;</p> <p>концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне (на расстоянии более 5 м от точек подачи нитратного рецикла и возвратного активного ила) более 0,1 мг/л</p> <p><i>Аэротенк-смеситель:</i><br/>                     концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне более 0,1 мг/л</p> | <p>При ежесуточном увеличении концентрации растворенного кислорода в аноксидных зонах в часы минимальных нагрузок по органическим соединениям и аммонийному азоту в поступающих на биологическую очистку сточных водах необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отрегулировать кислородный профиль в аэробной зоне аэротенка, обеспечив в точке забора нитратного рецикла расход воздуха только на перемешивание иловой смеси;</li> <li>- установить систему автоматического регулирования подачи воздуха по показаниям кислородомера в аэробных зонах, установив предел максимального значения концентрации растворенного кислорода.</li> </ul> <p>При постоянном превышении концентрации растворенного кислорода в аноксидных зонах вне зависимости от поступающей в аэротенки нагрузки необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отрегулировать кислородный профиль в аэробной зоне аэротенка, обеспечив в точке забора нитратного рецикла расход воздуха только на перемешивание иловой смеси;</li> <li>- оптимизировать расход нитратного рецикла, обеспечив минимальный расход, дающий необходимое для достижения проектного качества очищенной воды по нитратам количество подаваемых в аноксидную зону нитратов</li> </ul> |
| <p>Увеличение дозы активного ила в аэротенке более чем на 10 % от проектного из-за повышенного прироста активного ила</p>  | <p>При увеличении концентрации взвешенных веществ в очищенной воде из-за превышения дозой активного ила в аэротенке проектного значения необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличить расход избыточного активного ила, контролируя расчетное значение аэробного возраста активного ила, не допуская его снижения ниже проектного значения;</li> <li>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках</li> </ul>  |
| <p>Уменьшение дозы активного ила в аэротенке по сравнению с проектным значением из-за пониженного прироста активного ила</p>   | <p>При снижении дозы активного ила в аэротенке необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличить уровень осадка в первичных отстойниках;</li> <li>- контролируя дозу активного ила в аэротенке, снизить расход избыточного активного ила, не допуская увеличения значения общего возраста активного ила более 45 сут</li> </ul>  |

Окончание табл. 2.19

| Нарушение технологического режима  | Действия персонала по устранению нарушений  |
|--|---|
| Снижение значения возраста активного ила ниже проектного значения  | <p>При проектном значении прироста активного ила:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- снизить расход избыточного активного ила.</li> </ul> <p>При повышенном приросте активного ила:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках;</li> <li>- включить в работу все первичные отстойники;</li> <li>- по возможности снизить гидравлическую нагрузку на аэротенки с повышенным приростом ила;</li> <li>- параллельно со снижением прироста ила (в ходе указанных выше мероприятий) проводить снижение расхода избыточного активного ила до значения, необходимого для обеспечения проектного значения возраста ила</li> </ul>   |
| Увеличение значения возраста активного ила выше проектного значения  | Увеличить расход избыточного активного ила, при этом доза активного ила не должна быть ниже проектного значения   |
| Увеличение значения илового индекса более 160 см <sup>3</sup> /г вследствие сброса нефтепродуктов, СПАВ или других органических соединений | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Увеличить расход воздуха на 30...50 %;</li> <li>- увеличить расход избыточного активного ила на 25 %, контролируя расчетное значение аэробного возраста активного ила, не допуская его снижения ниже проектного значения более чем на 20 %;</li> <li>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках</li> </ul>  |
| Развитие процессов пенообразования   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Увеличить расход воздуха на 30...50 %, обеспечив концентрацию растворенного кислорода в контролируемых точках (на расстоянии 0,33l и 0,66l от начала аэробной зоны, где l — длина зоны) 2,0...2,5 и 3,0...3,5 мг/л соответственно;</li> <li>- увеличить расход избыточного активного ила на 25 %, контролируя расчетное значение аэробного возраста активного ила, не допуская его снижения ниже проектного значения более чем на 20 %;</li> <li>- при существенных колебаниях поступающей нагрузки увеличить расход возвратного активного ила;</li> <li>- при значениях pH иловой смеси менее 6,5 предусмотреть возможность регулирования pH;</li> <li>- при низких нагрузках на активный ил снизить дозу активного ила в аэротенках или увеличить уровень осадка в первичных отстойниках;</li> <li>- при <math>\text{БПК}_{\text{полн}} / \text{N}</math> более 20 (или <math>\text{N} / \text{БПК}_{\text{полн}}</math> менее 0,05) и/или <math>\text{БПК}_{\text{полн}} / \text{P}</math> более 100 (или <math>\text{P} / \text{БПК}_{\text{полн}}</math> менее 0,01) предусмотреть систему дозирования N и/или P;</li> <li>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках</li> </ul> |

Качественные параметры текущих значений очищенной воды должны соответствовать проектным значениям. Следует отметить, что проблемы технического исполнения вторичных отстойников, так же как и неоптимальный режим их эксплуатации, могут привести к ухудшению качества очищенной воды после вторичных отстойников по сравнению с качеством на выходе из аэротенка.

В табл. 2.20 приведены основные показатели очищенных вод, характеризующие эффективность работы сооружений биологической очистки по технологии нитри-денитрификации.

Таблица 2.20. Качественные показатели очищенной воды, характеризующие эффективность работы сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации

| Наименование показателя                                  | Регламентное значение эксплуатационных параметров | Примечание  |
|--|---|---|
| $\text{БПК}_5$   | Проектное значение                                | Определяется согласно графику аналитического контроля                   |
| $\text{БПК}_{\text{полн}}$                               |   | Определяется 1 раз в месяц или согласно графику аналитического контроля |
| $\text{БПК}_{\text{полн}} / \text{БПК}_5$                | —   | Рассчитывается по данным лабораторного контроля                         |
| ХПК  | Проектное значение                                | Определяются согласно графику аналитического контроля                   |
| Концентрация взвешенных веществ, мг/л                    |   |   |
| Концентрация аммонийного азота ( $\text{N-NH}_4$ ), мг/л |   |   |
| Концентрация азота нитратов ( $\text{N-NO}_3$ ), мг/л    |   |   |
| Концентрация азота нитритов ( $\text{N-NO}_2$ ), мг/л    |   |   |
| Специфические органические соединения                    |   |   |
| Металлы  |   |   |

В табл. 2.21 даны возможные причины несоответствия качественных параметров очищенной воды проектным значениям.



**Таблица 2.21. Причины несоответствия качественных параметров очищенной воды проектным значениям**

| Возможные причины   | Действия персонала   |
|---|--|
| <b>Превышение значения ХПК проектного значения при соответствии значения БПК<sub>полн</sub> в очищенной воде проектному значению</b>    |  |
| Поступление со сточными водами биохимически неокисляемых веществ, концентрация которых превышает проектное значение                     | Снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках  |
| <b>Превышение значением БПК<sub>полн</sub> и ХПК проектных значений</b>   |  |
| Залповый сброс нефтепродуктов, СПАВ или других органических загрязнений (залповое увеличение значения ХПК в поступающей сточной воде)   | - Увеличить на 30...50 % расход подаваемого воздуха;<br>- увеличить на 25 % расход избыточного активного ила;<br>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках   |
| <b>Превышение концентрации аммонийного азота в иловой смеси аэротенков над проектным значением (в фильтрованной пробе иловой смеси)</b> |  |
| Низкая концентрация кислорода в аэротенке (см. табл. 2.19)  | Выявить причины снижения концентрации растворенного кислорода (см. табл. 2.19) и провести мероприятия по достижению концентрации растворенного кислорода регламентного значения  |
| Значение аэробного возраста активного ила ниже проектного   | Обеспечить проектное значение аэробного возраста активного ила (см. табл. 2.19)  |
| Превышение концентрацией аммонийного азота и/или общего органического азота проектного значения   | При кратковременном превышении продолжать эксплуатировать в штатном режиме. При постоянном превышении входных концентраций над проектными провести модернизацию сооружений с учетом изменения качества поступающей сточной воды  |
| Температура поступающих сточных вод ниже проектного значения  | При кратковременном снижении температуры продолжать эксплуатировать в штатном режиме; при ежегодном периоде более 20 сут, в течение которого температура иловой смеси в аэротенках ниже проектного значения, необходимо решать вопрос искусственным повышением температуры иловой смеси или повышением окислительной мощности сооружения |
| pH сточных вод не соответствует диапазону 6,5...8,5   | При однократном несоответствии продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом несоответствии установить систему pH-контроля и регулирования pH   |

**Продолжение табл. 2.21**

| Возможные причины  | Действия персонала   |
|--|--|
| Щелочность поступающих сточных вод ниже проектного значения  | При разовом снижении продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом или постоянном установить систему дозирования реагента NaOH  |
| Недостаток фосфора в поступающей сточной воде (отношение фосфора к БПК <sub>полн</sub> в поступающей на биологическую очистку сточной воде менее 0,01)   | При разовом уменьшении продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом или постоянном установить систему дозирования реагента — источника фосфора (например, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )   |
| Превышение концентрациями веществ, оказывающих ингибирующее воздействие на процессы нитрификации, в поступающих сточных водах порога ингибирования (см. п. 2.2)  | При разовом сбросе увеличить на 30...50 % расход воздуха и на 25...30 % расход избыточного активного ила, при периодических сбросах решать вопрос о недопущении поступления неочищенных (неэффективно очищенных) производственных сточных вод на биологические очистные сооружения   |
| <b>Превышение концентрации аммонийного азота в очищенной воде после вторичных отстойников при соответствии концентрации аммонийного азота проектным данным в фильтрованной пробе иловой смеси аэротенков</b> |  |
| Развитие процесса аммонификации во вторичных отстойниках   | Снизить до минимально возможного уровень осевшего ила во вторичных отстойниках; устранить технические проблемы механизмов сбора ила во вторичных отстойниках. Не допускать образования «мертвых зон» неудаляемого осадка   |
| <b>Превышение концентрацией азота нитритов в иловой смеси аэротенков проектного значения (в фильтрованной пробе иловой смеси)</b>  |  |
| Низкая концентрация кислорода в аэротенке (см. табл. 2.19)   | Выявить причины снижения концентрации растворенного кислорода и провести мероприятия по достижению регламентного значения (см. табл. 2.19)   |
| Значение аэробного возраста активного ила ниже проектного  | Обеспечить проектное значение аэробного возраста активного ила (см. табл. 2.19)  |
| Температура поступающих сточных вод ниже проектного значения   | При кратковременном снижении температуры продолжать эксплуатировать в штатном режиме; при ежегодном периоде более 20 сут, в течение которого температура иловой смеси в аэротенках ниже проектного значения, необходимо решать вопрос искусственным повышением температуры иловой смеси или повышением окислительной мощности сооружения |

Продолжение табл. 2.21

| Возможные причины  | Действия персонала   |
|--|--|
| pH сточных вод не соответствует диапазону 6,5...8,5  | При однократном несоответствии продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом несоответствии установить систему pH-контроля и регулирования pH   |
| Щелочность поступающих сточных вод ниже проектного значения  | При однократном снижении продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом или постоянном установить систему дозирования реагента NaOH  |
| Недостаток фосфора в поступающей сточной воде (отношение фосфора к БПК <sub>полн</sub> в поступающей на биологическую очистку сточной воде менее 0,01)                                   | При разовом уменьшении продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом или постоянном установить систему дозирования реагента — источника фосфора (например, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )   |
| Превышение концентрацией веществ, оказывающих ингибирующее воздействие на процессы нитрификации, в поступающих сточных водах порога ингибирования (см. п. 2.2)                           | При разовом сбросе увеличить на 30...50 % расход воздуха и на 25...30 % расход избыточного активного ила, при периодических сбросах решать вопрос о недопущении поступления неочищенных (неэффективно очищенных) производственных сточных вод на биологические очистные сооружения   |
| <b>Повышенная концентрация азота нитратов в очищенной воде</b>   |  |
| Значение БПК <sub>полн</sub> (БПК <sub>5</sub> , ХПК) в поступающей на биологическую очистку сточной воде ниже проектного значения при проектном значении концентрации аммонийного азота | Увеличить уровень осадка в первичных отстойниках и/или установить систему дозирования внешнего источника углерода  |
| Концентрация кислорода в аноксидной зоне превышает регламентное значение в аэротенке   | Выполнить мероприятия по снижению концентрации растворенного кислорода в аноксидной зоне (см. табл. 2.19)  |
| Значение общего возраста активного ила более 45 сут  | Увеличить расход избыточного активного ила, при этом доза ила в аэротенке не должна снижаться ниже проектного значения (см. табл. 2.19)  |
| Температура поступающих сточных вод ниже проектного значения   | При кратковременном снижении температуры продолжать эксплуатировать в штатном режиме; при ежегодном периоде более 20 сут, в течение которого температура иловой смеси в аэротенках ниже проектного значения, необходимо решать вопрос искусственным повышением температуры иловой смеси или повышением окислительной мощности сооружения |
| pH сточных вод не соответствует диапазону 6,5...8,5  | При однократном несоответствии продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом несоответствии установить систему pH-контроля и регулирования pH   |

Окончание табл. 2.21

| Возможные причины  | Действия персонала   |
|--|--|
| Недостаток азота и фосфора в поступающей сточной воде (отношение фосфора к БПК <sub>полн</sub> и поступающей на биологическую очистку сточной воде менее 0,01, отношение азота к БПК <sub>полн</sub> менее 0,05) | Установить систему дозирования реагентов — источников азота и/или фосфора (например, мочевины H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )   |
| Превышение концентрациями веществ, оказывающих ингибирующее воздействие на процессы денитрификации, в поступающих сточных водах порога ингибирования (п. 2.2)  | При разовом сбросе увеличить на 30...50 % расход воздуха и на 25...30 % расход избыточного активного ила, при периодических сбросах решать вопрос о недопущении поступления неочищенных (неэффективно очищенных) производственных сточных вод на биологические очистные сооружения |

В табл. 2.22 дан пример параметров контроля и управления технологическим процессом аэротенка, работающего по технологии нитри-денитрификации по схеме с предвключенной денитрификацией, описанной в п. 2.3. Пример реализации схемы с предвключенной денитрификацией в четырехкоридорном аэротенке представлен на рис. 2.28.



Рис. 2.28. Пример схемы аналитического и приборного контроля аэротенка, работающего по технологии нитри-денитрификации

Таблица 2.22. Параметры и точки контроля и управления технологическим процессом аэротенка, работающего по схеме с предвключенной аэрацией

| № точки | Наименование точки контроля   | Контролируемые параметры  | Частота и способ контроля                                   | Метод контроля  |
|---------|---|---|---|---|
| 1       | Подводящий канал сточной воды, поступающей на биологическую очистку | XПК, БПК <sub>полн</sub> , взвешенные вещества, N-NH <sub>3</sub> , N-NO <sub>3</sub> , N-NO <sub>2</sub> , P-PO <sub>4</sub> , нефть и продукты, другие следы токсичные органические вещества, металлы | Согласно графику химико-аналитического контроля             | Химико-аналитический анализ (проводится химиком-биохимиком логической лабораторией — ХБЛ) |
| 3       | Канал очищенной воды  | N-NH <sub>3</sub> , N-NO <sub>3</sub> , N-NO <sub>2</sub> , P-PO <sub>4</sub> , БПК <sub>5</sub>  | При определении качества очистки воды проектными значениями |   |
| 3       | Иловая смесь на выходе из аэротенка (фильтровальная проба)          | Доза ила в аэротенке, иловый индекс   | Согласно графику химико-аналитического контроля             | Технологическая служба  |
| 4       | Распределительная камера в заратного активного ила                  | Доза ила  | Ежедневно   |   |
| 5       | Общий и аэробный возврат активного ила                              | Расчет  | Постоянно, расчет   | Служба КИПиА  |
| 6       | Сточная вода, поступающая на биологическую очистку                  | Расход сточной воды, поступающей на биологическую очистку   | Ежедневно   |   |
| 6       | Распределитель возвратного ила                                      | Расход возвратного активного ила  | Постоянно, прибор   |   |
| 7       | Поток избыточного активного ила                                     | Доза избыточного активного ила  | Согласно графику химико-аналитического контроля             | Химико-аналитический анализ (ХБЛ)   |

|    |   |                                      |   |  |
|----|---|--------------------------------------|---|--|
| 8  | Водослив избыточного активного ила  | Расход избыточного активного ила     | Постоянно, прибор   | Служба КИПиА   |
| 9  | Трубопровод подачи воздуха  | Расход воздуха                       |   |  |
| 10 | Аноксидная зона аэротенка, точка на расстоянии не более 5 м от точек поступления возвратного активного ила и нитратного рецикла                     | Концентрация растворенного кислорода | Постоянно при наличии стационарного анализатора концентрации растворенного кислорода, при наличии только переносного — согласно графику аналитического контроля, не реже 3 раз в неделю | Постоянно при наличии стационарного анализатора концентрации растворенного кислорода — служба КИПиА, при использовании переносного — ХБЛ |
| 11 | Аэробная зона аэротенка, точка на расстоянии 1/3 длины от начала аэробной зоны (для аэротенка-вытеснителя), для аэротенка-смесителя — в любой точке | Концентрация растворенного кислорода |   |  |
| 12 | Аэробная зона аэротенка, точка на расстоянии 2/3 длины от начала аэробной зоны (для аэротенка-вытеснителя), для аэротенка-смесителя — в любой точке | Концентрация растворенного кислорода | Постоянно, данные расхода насоса  | Служба КИПиА   |
| 13 | Насос нитратного рецикла  | Расход нитратного рецикла            |   |  |

## Глава 3. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА

### 3.1. Фракции фосфора в городских сточных водах

Фосфор присутствует в сточных водах в различных соединениях — растворенных и нерастворенных, органических и неорганических (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Классификатор соединений фосфора, содержащихся в сточных водах

Фосфаты подразделяют по химическим свойствам на органические и неорганические. Неорганические фосфаты представляют

собой соли кислородных кислот фосфора и подразделяются на ортофосфаты (соли ортофосфорной кислоты  $H_3PO_4$ ) и конденсированные фосфаты (соли полифосфорных кислот).

Органические фосфаты по физическим характеристикам подразделяются на растворенные и нерастворенные фракции, разделение которых производят фильтрацией через мембранные фильтры (0,15 мкм). Не все органические фосфаты способны к биоразложению микроорганизмами. Фосфаты, способные к биоразложению, относятся к биоразлагаемым фосфатам, не способные к биоразложению — к бионеразлагаемым.

Понятие «общий фосфор» (TP) представляет собой сумму концентраций фосфора, содержащегося во всех фосфатах, присутствующих в сточных водах. В настоящее время в РФ используется ряд методик определения общего фосфора [49—51].

Основными источниками фосфора в сточных водах являются фекалии и мусор, отходы производственного и коммерческого использования фосфатов, синтетические моющие и бытовые чистящие средства, сточные воды заводов, производящих фосфор, которые сбрасываются в городскую канализационную сеть города.

Для городских сточных вод фосфаты отходов жизнедеятельности человека составляют порядка 0,6 кг фосфора фосфатов ( $P-PO_4$ ) на человека в год, фосфаты, содержащиеся в моющих и чистящих средствах, — около 0,5 кг  $P-PO_4$  на человека в год. Количество фосфатов, поступающих в городскую канализационную сеть от промышленных и коммерческих предприятий города, может изменяться в широких пределах и зависит от количественных и качественных характеристик производственных стоков. Содержание фосфора в городских сточных водах зависит от уровня жизни населения, степени урбанизации и уровня индустриального развития. На состав городских стоков в значительной степени влияют изменения в потреблении воды абонентами, инфильтрация и эксфильтрация. Концентрированные стоки наблюдаются при низком водопотреблении и/или небольшом объеме инфильтрации. Разбавленные стоки, напротив, являются результатом высокого водопотребления и значительного объема инфильтрации.

В табл. 3.1 представлены обобщенные данные по содержанию фосфора в городских сточных водах.

**Таблица 3.1.** Содержание фосфора в городских сточных водах

| Формы фосфора  | Тип сточных вод         |                    |                               |
|--|-------------------------|--------------------|-------------------------------|
|  | Концентрированные, мг/л | Разбавленные, мг/л | Низко концентрированные, мг/л |
| Ортофосфаты  | 10...14                 | 6...8              | 3...4                         |
| Конденсированные фосфаты (пирофосфаты, триполифосфаты, триметафосфаты и т. д.) | 7...10                  | 4...6              | 2...3                         |
| Органические фосфаты (сахара фосфаты, фосфолипиды, нуклеотиды)                 | 4...6                   | 2...3              | 1                             |

Высокая концентрация фосфора в водоемах ведет не только к повышенной продуктивности водорослей, но и оказывает непосредственно негативное воздействие на живые организмы водных объектов. Способность фосфорорганических соединений химически связывать и инактивировать биологические катализаторы различных реакций живых организмов представляет опасность для окружающей среды и человека.

В водные объекты фосфор поступает, прежде всего, с дождевыми сточными водами, неочищенными (или недостаточно очищенными) городскими сточными водами, а также с неочищенными производственными стоками, сбрасываемыми промышленными предприятиями непосредственно в водоемы. Значительная часть фосфора поступает в реки с сельскохозяйственных полей, а также от животноводческих комплексов (к примеру, в одной тонне навоза содержится 2,5 кг фосфатов (по  $P_2O_5$ )).

В [52] показано, что среднее содержание общего фосфора в предположительно незагрязненных реках мира составляет 0,01...0,025 мг/л, в реках, испытывающих современную антропогенную нагрузку, —  $0,235 \pm 0,217$  мг/л для арктического и субарктического пояса,  $0,253 \pm 0,054$  мг/л для умеренного пояса и  $0,228 \pm 0,061$  мг/л

для горошков. Приведенные данные позволяют говорить о 20-кратном увеличении фосфора в природных водоемах за счет поступления в них неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод.

**Таблица 3.2.** Характеристика очищенных вод сооружений очистки (по  $P-PO_4$  до 2005 г.)

| Очистные сооружения   | Технология очистки сточных вод | Концентрация $P-PO_4$ в очищенных водах, мг/л |              |         |
|---|--------------------------------|---|--------------|---------|
|   |                                | Минимальная                                   | Максимальная | Средняя |
| Люблинские поля фильтрации 1899—1970                                    | Поля фильтрации                | 0,1   | 9,5          | 3,2     |
| Люберецкие поля фильтрации 1914—1975                                    | Поля фильтрации                | 0,3   | 8,4          | 2,8     |
| Кожуховская станция аэрофильтрации 1929—1970                            | Аэрофильтрация                 | 0,5   | 1,6          | 0,9     |
| Филевская станция аэрации 1936—1972                                     | Полная биологическая очистка   | 0   | 2,4          | 1,1     |
| Щукинская станция аэрации 1951—1975                                     | Полная биологическая очистка   | 1,1   | 2,1          | 1,6     |
| Тушинская станция аэрации 1961—1980                                     | Полная биологическая очистка   | 0   | 1,9          | 0,9     |
| Люблинская станция аэрация  | Полная биологическая очистка   | 0,1   | 2,9          | 1,3     |
| Люберецкая станция аэрации/Люберецкие очистные сооружения 1963—2005     | Полная биологическая очистка   | 0,1   | 2,9          | 1,3     |
| Курьяновская станция аэрации/Курьяновские очистные сооружения 1950—2005 | Полная биологическая очистка   | 0,0   | 2,2          | 1,0     |

Жесткие современные требования к очистке сточных вод, в том числе и по фосфору, как видно из приведенного выше примера, являются необходимостью, условием сохранения природного баланса веществ в водных объектах. В табл. 3.2 приведены данные, рассматриваемые Н. Щегольковой в [52] и показывающие влияние технологии очистки сточных вод на концентрацию фосфора фосфатов ( $P-PO_4$ ) в очищенной воде Московских очистных сооружений, сбрасываемой в водоемы.

Промышленная поэтапная реализация технологий глубокого удаления азота и фосфора на аэротенках Московских очистных сооружений началась с 90-гг. прошлого столетия. При этом используются технологии биологического удаления как азота, так и фосфора. В табл. 3.3 приведены данные качества очищенной воды по фосфору фосфатов в аэротенках Люберецких очистных сооружений (ЛОС), реконструированных под технологию биологического удаления азота и фосфора.

**Таблица 3.3.** Характеристика очищенных вод аэротенков ЛОС, реконструированных под технологию биологического удаления азота и фосфора [53]

| Аэротенки Люберецких очистных сооружений | Производительность, м <sup>3</sup> /сут | Концентрация фосфора фосфатов ( $P-PO_4$ ) в очищенной воде, мг/л |
|--|---|---|
| Аэротенк № 13 старого блока ЛОС (ЛОСст)  | 80 000                                  | 0,3   |
| Аэротенк № 14 старого блока ЛОС (ЛОСст)  | 80 000                                  | 0,15  |
| Аэротенк № 15 старого блока ЛОС (ЛОСст)  | 80 000                                  | 0,3   |
| Блок удаления биогенных элементов (БУБЭ) | 500 000                                 | 0,2   |

### 3.2. Удаление соединений фосфора из сточных вод

Удаление фосфатов из сточных вод на очистных сооружениях включает в себя процессы извлечения фосфатов, находящихся в нерастворенной форме в сооружениях механической очистки

(в первичных отстойниках, флотаторах), а затем удаление фосфатов, которые находятся в растворенном виде. Растворенные фосфаты удаляются в сооружениях биологическим (микроорганизмами), химическим (связывание растворенных фосфатов металлами и дальнейшее осаждение) или биолого-химическим методами.

Основная часть фосфора находится в городских сточных водах в растворенной форме — около 50 % в виде полифосфатов. Только порядка 10...20 % общего фосфора находится в нерастворенном виде и осаждается в первичных отстойниках без добавления реагентов. На городских очистных сооружениях с первичными отстойниками и классической биологической очисткой, предусматривающей только окисление органических соединений, удаление фосфора происходит частично в первичных отстойниках (осаждение нерастворенных соединений фосфора), а частично — в аэротенках за счет включения некоторого количества растворенного фосфора в состав приросшей биомассы и выводимого из системы в составе избыточного активного ила. При работе городских очистных сооружений, запроектированных только на окисление органических соединений и удаление взвешенных веществ, количество удаляемого фосфора составляет порядка 20 %. В периоды повышенного прироста активного ила это значение может увеличиться до 30...40 %, но и в этом случае обеспечить глубокое удаление фосфора не представляется возможным.

Для обеспечения требуемых концентраций фосфора в очищенной воде необходима реализация на очистных сооружениях специальных технологических и конструктивных решений удаления фосфора. В настоящее время наиболее широкое распространение получили следующие методы очистки сточных вод от соединений фосфора: химический, биологический, комбинированный (биолого-химический).

#### 3.2.1. Химическое удаление фосфора. Теория процесса

Метод химического удаления фосфора из сточных вод заключается в добавлении химических реагентов в сточную воду, химическом взаимодействии веществ, образовании нерастворенных фосфатно-

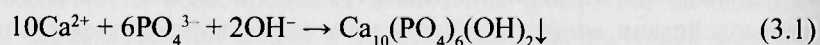
реагентных комплексов, их осаждении и выводе из системы. Этот метод еще называется фосфатное осаждение или фосфатная преципитация. Преципитация (precipitation) в общем понимании процесса — это образование твердой фазы (осадка) в растворе в результате химической реакции. Образованный осадок представляет собой нерастворимое или малорастворимое соединение и называется преципитатом. Вещество, используемое в качестве реагента для проведения реакции преципитации фосфатов, называется преципитантом. Промышленная реализация технологии химического удаления фосфора из сточных вод включает следующие стадии: преципитацию, коагуляцию, флокуляцию и разделение.

В качестве реагентов для реализации реакции преципитации фосфатов для их удаления из сточных вод могут применяться оксид и гидроксид кальция, хлорид железа, сульфат железа, сульфат алюминия и др. В табл. 3.4 представлены соединения, которые образуются в результате взаимодействия фосфатов с различными видами реагентов.

**Таблица 3.4.** Преципитаты, образуемые в результате реакции осаждения фосфатов

| Фосфатный преципитант | Образуемые преципитаты   |
|-----------------------|--|
| Ca (II)               | Фосфаты кальция:<br>β-трикальций фосфат $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ;<br>гидроксиапатит $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ ;<br>гидрофосфат кальция $\text{CaHPO}_4$ |
| Fe (II)               | ортофосфат железа (II) $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ ;<br>гидроокись железа (II) $\text{Fe}(\text{OH})_2$   |
| Fe (III)              | фосфат железа $\text{Fe}_2(\text{OH})(\text{PO}_4)_2$ ;<br>гидроксид железа (III) $\text{Fe}(\text{OH})_3$   |
| Al (III)              | фосфат алюминия $\text{Al}_2(\text{OH})(\text{PO}_4)_2$ ;<br>гидроксид алюминия, $\text{Al}(\text{OH})_3$  |

При использовании в качестве преципитанта Ca (II) реакция взаимодействия гидроксида кальция с фосфором имеет следующий вид:



Применение соединений кальция для удаления фосфора позволяет, помимо достижения требуемого качества очистки сточных вод по фосфатам, во многом избежать проблем с обезвоживанием осадков. Однако необходимо иметь в виду, что для использования гидроксида кальция в качестве реагента для химического удаления фосфора из сточных вод значение pH среды должно находиться в диапазоне 7,5...8,5. При pH = 9,0 и более растворимость фосфатных комплексов увеличивается, что делает неэффективным применение данного реагента.

В настоящее время широкое распространение получил метод химического удаления фосфора с помощью солей железа и алюминия. Рассмотрим механизм удаления фосфора из сточных вод при использовании солей железа. В этом случае образуется осадок гидратированного оксида железа с большой площадью поверхности и высокой адсорбционной способностью. Растворенный фосфор связывается на реакционно-активных поверхностях гидратированного оксида железа, формируя поверхностный комплекс металл-гидроксид-фосфата (рис. 3.2). Скорость данной реакции составляет от нескольких минут до одного часа. На скорость реакции влияют такие факторы, как текущая концентрация фосфора, доза реагента, интенсивность перемешивания и возраст осадка гидратированного оксида железа. Чем выше возраст, тем ниже его реакционная способность. Эти факторы во многом влияют на требуемое количество реагентов для удаления 1 мг фосфора в реальных условиях эксплуатации сооружений.

Образующиеся осадки формируют коллоидные частицы размером менее 1 мкм, которые при коагуляции агломерируют с образованием более крупных частиц размером 10...50 мкм (так называемые первичные частицы). Для эффективного смешения реагента и сточной воды (иловой смеси, возвратного активного ила, очищенной воды — в зависимости от точки ввода реагента) коагуляцию целесообразно проводить в условиях перемешивания.

Для обеспечения эффективного удаления первичных частиц при дальнейшем отстаивании (или флотации) требуется добавление флокулянта. В процессе флокуляции первичные частицы

объединяются в более крупные образования — флоккулы. Разделение проводят методами флотации, седиментации или фильтрования. На рис. 3.3 представлены диаграммы равновесной растворимости для железа и алюминия.

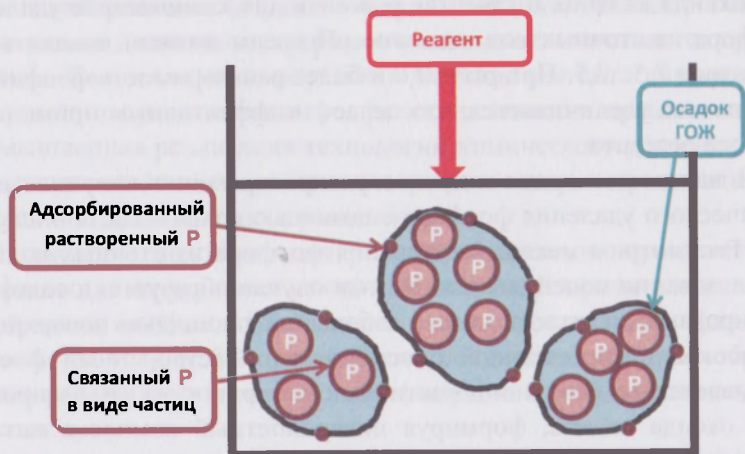


Рис. 3.2. Механизм осаждения фосфора в структуре гидратированного оксида железа (ГОЖ)

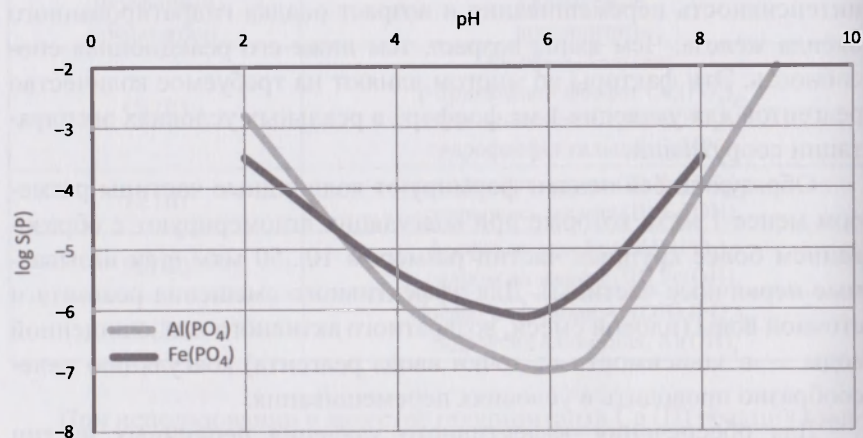
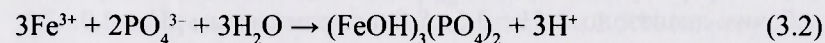


Рис. 3.3. Диаграммы равновесной растворимости для солей железа и алюминия

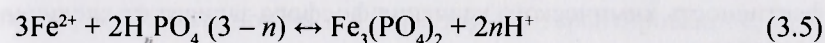
Диаграммы растворимости на рис. 3.3 показывают растворимость фосфатов железа и алюминия при различных значениях pH. Как видно из графика, характер обеих кривых схож, и минимумы растворимости как для солей железа, так и для солей алюминия находятся в рабочем диапазоне реализации биохимических процессов (см. гл. 1 и 2).

Реакции взаимодействия фосфатов с солями железа (III) представлены ниже:



Из уравнений (3.2)—(3.4) получаем, что при преципитации ортофосфатов требуется от 1 до 1,5 моль  $\text{Fe}^{3+}$  на моль P, т. е. для удаления 1 г растворенного фосфора требуется (теоретически, на основании формул (3.2)—(3.4)) 2,7 г железа. Для обеспечения требуемой эффективности удаления фосфора в реальных условиях работы сооружений коэффициент запаса принимают 1,5...2,0.

Соли железа (II) обычно представляют собой сульфаты и образуются как побочные продукты производственных процессов. Реакция взаимодействия фосфора с двухвалентными солями железа имеет вид:

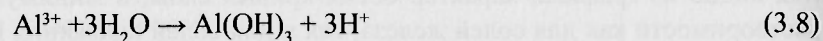
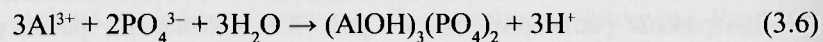


Молярное соотношение Fe/P в этом случае равно 1,5/1, тогда весовое соотношение  $\text{Fe}^{2+}/\text{P} = 2,7/1$ . На практике это соотношение принимают (3...5)/1.

При использовании солей двухвалентного железа для преципитации фосфатов образования флокков не происходит, следовательно, данные реагенты могут применяться только при использовании сооружений фильтрования.

Ион алюминия ( $\text{Al}^{3+}$ ) является наиболее эффективным для преципитации в сточной воде фосфатов. В водной среде ионы алюминия вступают в следующие реакции:





Наиболее важной для реализации технологии реагентного удаления фосфора из сточных вод является реакция (3.7) — преципитация фосфора. Как видно из рис. 3.3, преципитация растворенного фосфора соединениями алюминия является рН-зависимым процессом с рабочим диапазоном рН = 3,5...8,0 и оптимальным рН = 4,0...7,3.

Согласно уравнению (3.7) для преципитации 1 моля (31 г) фосфата требуется 1 моль (27 г) алюминия, т. е. для удаления 1 г растворенного фосфора требуется 0,87 г алюминия. При расчете требуемой дозы реагента на основе алюминия следует иметь в виду, что ионы алюминия реагируют в воде не только с соединениями фосфора, но и с другими компонентами, включая саму воду. На практике, согласно ЕРА [54], молярное соотношение алюминия к фосфору рекомендуется принимать в диапазоне 1,38/1 для 75%-го удаления фосфора, 1,72/1 для 85%-го удаления фосфора, и 2,3/1 для 95%-го удаления фосфора из сточных вод.

### 3.2.2. Химическое удаление фосфора.

#### Математическое описание процесса

На основании сказанного выше можно сделать вывод, что эффективность химического удаления фосфора зависит от следующих факторов:

- стехиометрической дозы реагента;
- $\beta$ -фактора — коэффициента, учитывающего превышение фактического количества реагента, требуемого для осаждения 1 моля фосфора, моль/моль, над расчетным стехиометрическим количеством, рассчитанным по формуле (3.9);
- значения рН среды;
- реализации процессов разделения фосфорного осадка и водной среды.

Стехиометрическая доза реагента  $X_{Me}$ , мг/л, рассчитывается по следующей формуле:

$$X_{Me} = \frac{X_{P, \text{prec}} AM_{Me}}{AM_P}, \quad (3.9)$$

где  $X_{P, \text{prec}}$  — количество фосфора, которое требуется удалить, мг/л, определяемое из уравнения, учитывающего концентрацию фосфора  $C_{P, \text{in}}$  в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, требуемую концентрацию фосфора в очищенной  $C_{P, \text{out}}$  и концентрацию фосфора в приросшей биомассе  $X_{P, \text{BM}}$  (содержание фосфора в биомассе активного ила составляет 1,0...2,5 % по весу):

$$X_{P, \text{prec}} = C_{P, \text{in}} - C_{P, \text{out}} - X_{P, \text{BM}} \quad (3.10)$$

$AM_{Me}$  — атомная масса металла, входящего в состав реагента, мг/ммоль;

$AM_P$  — атомная масса фосфора, мг/ммоль.

Атомная масса фосфора (P) составляет 31 мг/ммоль, железа (Fe) — 56 мг/ммоль, алюминия (Al) — 27 мг/ммоль.

$\beta$ -фактор — коэффициент, учитывающий превышение фактического количества реагента, требуемого для осаждения 1 моля фосфора, моль Me/моль P, над расчетным стехиометрическим количеством, — зависит от реализованной схемы очистки сточных вод, точки ввода реагента и требований к качеству очищенной воды по фосфору. На рис. 3.4 приведены схемы реализации процессов очистки сточных вод, точки ввода реагентов для химического удаления фосфора, соответствующие им  $\beta$ -факторы и гарантированное, при правильном расчете дозы реагента, качество очищенной воды по фосфору фосфатов P-PO<sub>4</sub>.

**Процесс пре-преципитации** (рис. 3.4, А), является наиболее экономически неэффективным как с точки зрения эксплуатационных затрат, так и с точки зрения качества очищенной воды по фосфору фосфатов. При реализации данного процесса реагент дозируется в контактный фильтр перед первичным отстойником, а затем фосфорный осадок выпадает в первичных отстойниках совместно с первичным осадком и удаляется из системы. Высокое значение  $\beta$ -фактора при реализации процесса пре-преципитации объясняется незначительным временем смешения реагента и сточной воды

(10...20 мин) в контактном фильтре и необходимо обеспечить остаточное количество фосфора в осветленной сточной воде, поступающей на биологическую очистку, чтобы оставшегося после преципитации фосфора было достаточно для эффективного ведения биологических процессов. Точно рассчитать количество фосфора, которое должно поступать со сточными водами для эффективного ведения биологических процессов и при этом после биологической очистки обеспечивать требуемые концентрации фосфора фосфатов на уровне 0,2 мг/л, достаточно сложно. В условиях эксплуатации в этом случае принимают в расчет завышенное (в целях перестраховки) количество фосфора, которое поступает на биологическую очистку со сточными водами, что приводит к повышенному содержанию фосфора в очищенной воде (до 1,0 мг/л по  $P-PO_4$ ).

Наименее затратным с точки зрения количества требуемого реагента является процесс **симультанной (одновременной) преципитации** (рис. 3.4, Б). При реализации данного процесса реагент подается или в сточную воду перед аэротенками, или непосредственно в аэротенки, или в поток возвратного активного ила. Эффективная гидродинамика смешивания реагента и фосфора сточных вод, а также время контакта, равное периоду нахождения сточной воды в аэротенке, позволяет наиболее эффективно обеспечивать использование реагента и получать достаточно высокое качество очищенной воды по фосфору фосфатов (до 0,2 мг/л).  $\beta$ -фактор для данного процесса составляет 1,2...1,5 и является самым низким в рассматриваемых нами схемах.

**Процесс пост-преципитации** (рис. 3.4, В) позволяет достичь концентрации фосфора фосфатов очищенной воды менее 0,1 мг/л. Реагент при реализации данного процесса дозируется в очищенную воду после вторичных отстойников. Для отделения фосфорного осадка в данном случае необходимо применение сооружений доочистки от взвешенных веществ. Основным недостатком данного процесса является высокое потребление реагента из-за небольшого времени контакта реагента и фосфора, содержащегося в очищенной воде (менее 1 ч). В данном процессе  $\beta$ -фактор составляет 2...2,5.

**Процесс комбинированной преципитации** (рис. 3.4, Г) сочетает в себе преимущества симультанной преципитации и пост-преципитации. Основное количество фосфора связывается при по-

лучше реагента или в сточную воду перед аэротенками, или непосредственно в аэротенки, или в поток возвратного активного ила. Для достижения концентраций фосфора фосфатов в очищенной воде ниже 0,1 мг/л устраивается вторая точка ввода реагента — перед сооружениями доочистки. В этом случае основная масса фосфора связывается при взаимодействии с реагентом, который дозируется в 1-ю точку, и  $\beta$ -фактор составляет 1,2...1,5. При дозировании реагента во 2-ю точку происходит глубокая доочистка очищенной воды от фосфора. При реализации данного процесса требуется, как правило, снижение фосфора при дозировании с 0,2...0,5 мг/л  $P-PO_4$  до требуемой концентрации со значением  $\beta$ -фактора 2,0...2,5. То есть в итоге  $\beta$ -фактор на весь процесс составляет 1,4...1,7.

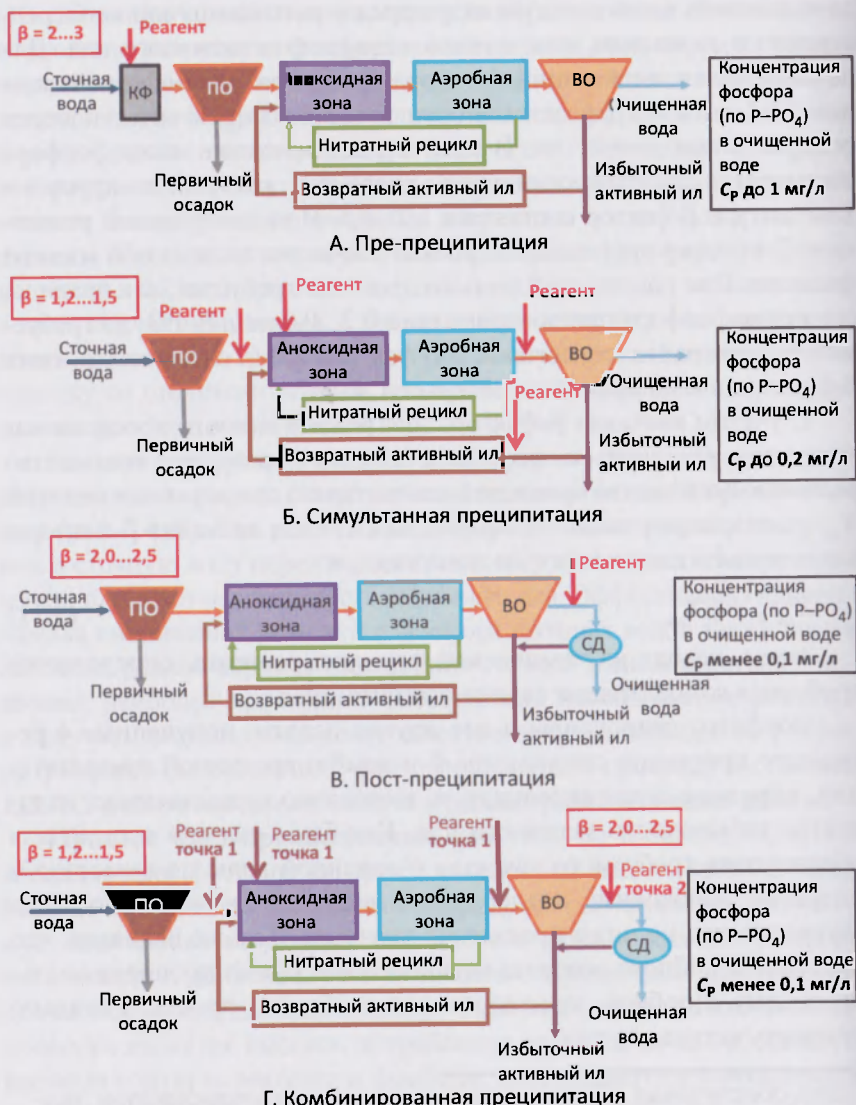
С учетом значения  $\beta$ -фактора для реализованного процесса химического удаления фосфора рассчитывают требуемое количество реагента. Количество преципитанта (металла) для реальных условий  $X_{Me, \beta}$ , мг/л, определяется из формулы (3.9) для значения  $\beta$ -фактора, характерного для используемого процесса:

$$X_{Me, \beta} = \beta X_{Me} \quad (3.11)$$

Затем, исходя из химической формулы реагента, определяется требуемая концентрация самого реагента, мг/л.

Фосфаты, гидроксиды и все другие осадки, полученные в результате процессов симультанной и комбинированной преципитации, образуют дополнительное, и достаточно существенное, количество избыточного активного ила. Как было сказано в гл. 2, для обеспечения требуемого качества очищенной воды по аммоний и нитритам необходимо поддерживать значение аэробного возраста активного ила не ниже проектного значения. Там же показано, что значение аэробного возраста активного ила прямо пропорционально объему аэробной зоны аэротенка и обратно пропорционально приросту активного ила.

Для обеспечения требуемого для процесса нитрификации значения аэробного возраста активного ила при увеличении его прироста из-за дозирования реагента необходимо увеличивать объемы аэробных зон аэротенка.



**Рис. 3.4.** Схемы ввода реагента для химического удаления фосфора: КФ — контактный фильтр; ПО — первичный отстойник; ВО — вторичный отстойник; СД — сооружения доочистки

В табл. 3.5 представлены результаты расчета аэробной зоны аэротенка  $V_{aerob}$  и количества образуемого избыточного активного ила  $Q_{was}$  в зависимости от типа реагента и концентрации фосфора в поступающей воде. Реагент, в расчетном случае, подается в поток рециркуляционного активного ила (симультанная преципитация). Количественные и качественные характеристики сточной воды для всех расчетных случаев идентичны.

**Таблица 3.5.** Расчетные объемы аэробных зон аэротенков и количество избыточного активного ила при различной концентрации фосфора в сточной воде\*

| Тип реагента | Без добавления реагента         | Концентрация $P-PO_4$ в поступающей сточной воде, мг/л |                                 |                                    |                                 |                                    |                                 |                                    |                                 |                                    |
|--------------|---------------------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
|              |                                 | 4,0  |                                 | 6,0                                |                                 | 8,0                                |                                 | 12,0                               |                                 |                                    |
|              | $V_{aerob}^*$<br>м <sup>3</sup> | $Q_{was}^*$<br>м <sup>3</sup> /сут                     | $V_{aerob}^*$<br>м <sup>3</sup> | $Q_{was}^*$<br>м <sup>3</sup> /сут | $V_{aerob}^*$<br>м <sup>3</sup> | $Q_{was}^*$<br>м <sup>3</sup> /сут | $V_{aerob}^*$<br>м <sup>3</sup> | $Q_{was}^*$<br>м <sup>3</sup> /сут | $V_{aerob}^*$<br>м <sup>3</sup> | $Q_{was}^*$<br>м <sup>3</sup> /сут |
| $FeCl_3$     | 4782                            | 304  | 5534                            | 350                                | 6143                            | 387                                | 6751                            | 423                                | 7966                            | 496                                |
| $FeCl_2$     | 4782                            | 304  | 5765                            | 364                                | 6560                            | 411                                | 7355                            | 459                                | 8946                            | 555                                |
| $Al_2SO_4$   | 4782                            | 304  | 5367                            | 340                                | 5841                            | 368                                | 6314                            | 397                                | 7261                            | 454                                |

\* Расчет проводился с учетом концентрации фосфора фосфатов в очищенной воде 0,2 мг/л.

Как видно из табл. 3.5, подача реагента для химического удаления фосфора (при реализации процессов симультанной и комбинированной преципитации) в сточных водах существенно увеличивает количество избыточного активного ила и, как следствие, объем требуемой аэробной зоны аэротенка. Как показано в табл. 3.5, при концентрации фосфора фосфатов в поступающей сточной воде до 3,5...4,0 мг/л влияние типа реагента не существенно. При концентрации  $P-PO_4$  в поступающей воде в диапазоне 8,0...12,0 мг/л выбор реагента существенно влияет на объемы аэротенков, как следствие — на величину капитальных затрат. При концентрациях  $P-PO_4$  в поступающей воде в диапазоне 4,0...12,0 мг/л расчетный объем аэробной зоны аэротенка в 1,1...1,9 раз больше, чем при расчете аэробной зоны без учета дозирования реагента. Это нельзя не учитывать при расчетах аэротенков во избежание серьезных ошибок.

Дозирование реагента на стадии механической очистки или после биологической очистки позволит избежать необходимости увеличения аэробной зоны аэротенка, однако в этом случае необходимо предусматривать конструктивные решения эффективного перемешивания реагента с потоками поступающей или (в зависимости от выбранного процесса) очищенной воды и решения удаления образовавшегося осадка. В любом случае перед принятием окончательного решения необходимо провести сравнение вариантов. Относительные объемы сооружений и количество образуемых осадков при реализации различных схем дозирования реагента и типов реагента представлены в табл. 3.6.

**Таблица 3.6.** Относительные объемы аэробной зоны аэротенков и количество образуемого избыточного активного ила при реализации технологии химического удаления фосфора (концентрация P-PO<sub>4</sub> в поступающей сточной воде 8 мг/л и в очищенной воде 0,2 мг/л)

| Процесс                      | Тип реагента  | Значение β-фактора | Объем аэробной зоны V <sub>aerob</sub> | Количество избыточного активного ила* Q <sub>was</sub> | Количество первичного осадка** Q <sub>mud</sub> |
|------------------------------|---|--------------------|--|--|---|
| Без добавления реагента      | —   | —                  | 1V <sub>aerob</sub>                    | 1Q <sub>was</sub>                                      | 1Q <sub>mud</sub>                               |
| Пре-преципитация             | FeCl <sub>3</sub>                                   | 2...3              | 1V <sub>aerob</sub>                    | 1Q <sub>was</sub>                                      | 1,7...1,8Q <sub>mud</sub>                       |
|                              | FeCl <sub>2</sub>                                   | 2...3              | 1V <sub>aerob</sub>                    | 1Q <sub>was</sub>                                      | 2,1...2,2Q <sub>mud</sub>                       |
|                              | Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·14H <sub>2</sub> O | 2...3,5            | 1V <sub>aerob</sub>                    | 1Q <sub>was</sub>                                      | 1,3...1,5Q <sub>mud</sub>                       |
| Симультанная преципитация    | FeCl <sub>3</sub>                                   | 1,2...1,5          | 1,2...1,4V <sub>aerob</sub>            | 1,2...1,4Q <sub>was</sub>                              | 1Q <sub>mud</sub>                               |
|                              | FeCl <sub>2</sub>                                   | 1,2...1,5          | 1,3...1,5V <sub>aerob</sub>            | 1,3...1,5Q <sub>was</sub>                              | 1Q <sub>mud</sub>                               |
|                              | Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·14H <sub>2</sub> O | 1,2...1,5          | 1,2...1,3V <sub>aerob</sub>            | 1,2...1,3Q <sub>was</sub>                              | 1Q <sub>mud</sub>                               |
| Пост-преципитация            | FeCl <sub>3</sub>                                   | 2,0...2,5          | 1V <sub>aerob</sub>                    | 2,4...2,6Q <sub>was</sub> **                           | 1Q <sub>mud</sub>                               |
|                              | FeCl <sub>2</sub>                                   | 2,0...2,5          | 1V <sub>aerob</sub>                    | 2,8...3,0Q <sub>was</sub> **                           | 1Q <sub>mud</sub>                               |
|                              | Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·14H <sub>2</sub> O | 2,0...2,5          | 1V <sub>aerob</sub>                    | 2,3...2,5Q <sub>was</sub> **                           | 1Q <sub>mud</sub>                               |
| Комбинированная преципитация | FeCl <sub>3</sub>                                   | 1,4...1,7          | 1,1...1,3V <sub>aerob</sub>            | 1,3...1,5Q <sub>was</sub> **                           | 1Q <sub>mud</sub>                               |
|                              | FeCl <sub>2</sub>                                   | 1,4...1,7          | 1,2...1,4V <sub>aerob</sub>            | 1,4...1,6Q <sub>was</sub> **                           | 1Q <sub>mud</sub>                               |
|                              | Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·14H <sub>2</sub> O | 1,4...1,7          | 1,1...1,2V <sub>aerob</sub>            | 1,3...1,4Q <sub>was</sub> **                           | 1Q <sub>mud</sub>                               |

\* Рассчитывалось как сумма приросшего активного ила и количества фосфорного осадка.

\*\* При расчете количества первичного осадка принималась концентрация взвешенных веществ в поступающей сточной воде 240 мг/л, в осветленной — 120 мг/л.

В табл. 3.7 даны характеристики основных преципитантов (осаждающих реагентов) для реализации процессов химического удаления фосфора из сточных вод. Характеристики преципитантов, представленные в табл. 3.7, позволяют рассчитывать количество требуемого реагента как в ходе проектирования сооружений, так и при их эксплуатации.

**Таблица 3.7.** Основные преципитанты (осаждающие реагенты) для процессов химического удаления фосфора из сточных вод [55]

| Наименование продукта       | Химическая формула                                    | Плотность или насыпная плотность товарного продукта, кг/м <sup>3</sup> | Действующий катион для осаждения фосфора | Количество активного вещества в товарном продукте |
|-----------------------------|---|--|--|---|
| Хлорид алюминия             | AlCl <sub>3</sub>                                     | 1300 (раствор)   | Al <sup>3+</sup>                         | 58...60 г/кг<br>2,2 моль/кг                       |
| Хлорид железа (III)         | FeCl <sub>3</sub>                                     | 1410...1430 (раствор)  | Fe <sup>3+</sup>                         | 135...138 г/кг<br>2,4...2,5 моль/кг               |
| Хлорид-сульфат железа (III) | FeClSO <sub>4</sub>                                   | 1430...1520 (раствор)  | Fe <sup>3+</sup>                         | 123 г/кг<br>2,2 моль/кг                           |
| Сульфат железа (II)         | FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                  | С остаточной влажности (зеленая) соль — 1000                           | Fe <sup>2+</sup> → Fe <sup>3+</sup>      | 178...195 г/кг<br>3,2...3,5 моль/кг               |
| Алюминат натрия             | NaAl(OH) <sub>4</sub>                                 | 1300...1500 (раствор)  | Al <sup>3+</sup>                         | 62...105 г/кг<br>2,3...3,9 моль/кг                |
| Гидроксид кальция           | Ca(OH) <sub>2</sub>                                   | Порошок — 450;<br>Суспензия — 1150                                     | Ca <sup>2+</sup>                         | 376 г/кг<br>9,4 моль/кг<br>75 г/кг<br>1,9 моль/кг |
| Полиалюминий-хлорид (РАС)   | [Al(OH) <sub>3-x</sub> Cl <sub>x</sub> ] <sub>n</sub> | 1200...1370 (раствор)  | Al <sup>3+</sup>                         | 70...90 г/кг<br>2,6...3,3 моль/кг                 |

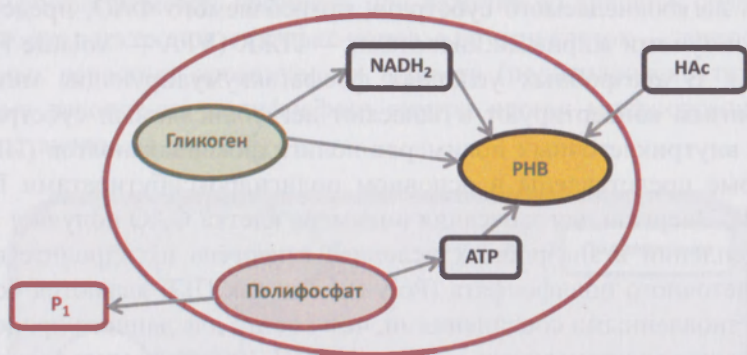
### 3.2.3. Биологическое удаление фосфора. Теория процесса

Исследования, посвященные биологическому удалению фосфора из сточных вод, были начаты в 1940-х гг. [56, 57]. Наиболее известная в то время работа, доказывающая наличие процесса биологического удаления фосфора при очистке сточных вод, принадлежит Е. G. Srinath [58]. Повышенный по сравнению с классическими биохимическими процессами очистки сточных вод уровень



полифосфатов до ортофосфатов и высвобождения последних в окружающую среду концентрация фосфора в иловой смеси на выходе из анаэробной зоны (или в конце анаэробной фазы реактора периодического действия) возрастает. Количество ортофосфатов, которое высвобождается в окружающую среду в анаэробных условиях, определяется количеством (или доступностью) не только легкоокисляемых органических соединений, но и полигидроксibuтирата и полифосфатов в клетках фосфатаккумулирующих бактерий.

За анаэробной зоной для реализации процессов биологического удаления фосфора из сточных вод обязательно должна следовать зона, содержащая растворенный кислород (аэробная зона) или связанный кислород нитратов (аноксидная зона).



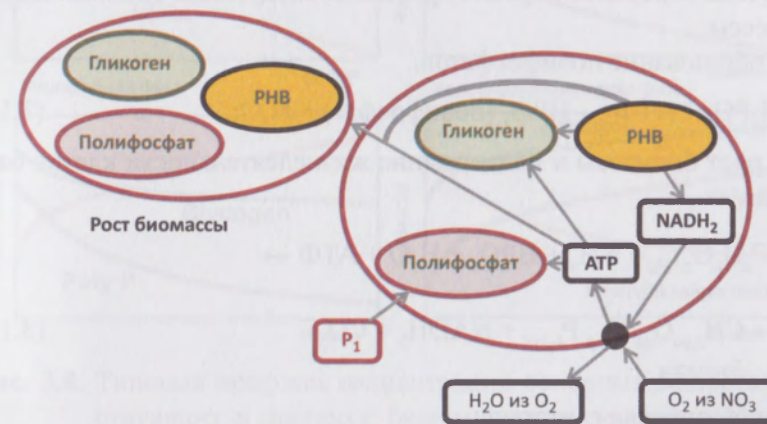
**Рис. 3.6.** Принципиальная схема биохимических процессов, протекающих в клетках фосфатаккумулирующих бактерий в анаэробных условиях; РНВ — полигидроксibuтират; АТФ — аденозинтрифосфат;  $\text{NADH}_2$  — никотинамид-адениндинуклеотид;  $\text{HAc}$  — ацетат;  $\text{P}_i$  — ортофосфат

В аэробных или анноксидных условиях запасенный ПГБ окисляется до  $\text{CO}_2$ , при этом выделяется  $\text{NADH}_2$ .  $\text{NADH}_2$  конвертируется в АТФ. В аэробных или анноксидных условиях в клетках ФАО происходит восстановление полифосфатных связей, разрушенных в анаэробных условиях. Для создания полифосфатных связей из окружаю-

щей среды клетками фосфатаккумулирующих микроорганизмов потребляются ортофосфаты. В результате концентрация ортофосфатов в жидкой фазе снижается.

В аэробных условиях (рис. 3.7) происходит рост фосфатаккумулирующих микроорганизмов, то есть количество клеток ФАО увеличивается. Это приводит к потреблению ортофосфатов из окружающей среды не только на восстановление разрушенных полифосфатных связей «старых» ФАО, но и на создание полифосфатных связей приросших клеток. Из системы фосфаты выводятся с ФАО в составе избыточного активного ила.

В фосфатаккумулирующих микроорганизмах количество полифосфатов составляет до 10 % от веса сухого вещества клетки против 1...3 % в клетках обычных аэробных микроорганизмов, участвующих в биохимических процессах очистки сточных вод.

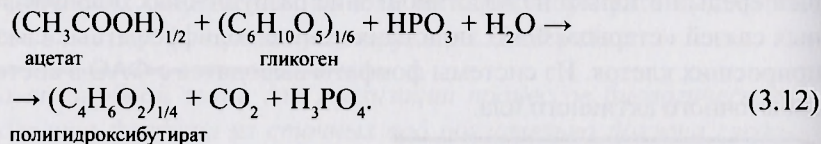


**Рис. 3.7.** Принципиальная схема биохимических процессов, протекающих в клетках фосфатаккумулирующих организмов в анноксидных/аэробных условиях

Таким образом, в анаэробных условиях в очистных сооружениях при реализации процессов биологического удаления фосфора протекают следующие основные биохимические процессы [23]:

- поглощение из сточной воды легкоокисляемого органического вещества и накопление его в виде полигидроксибутирата;
- распад внутриклеточных полифосфатов с синтезом АТФ;
- образование АТФ и  $\text{NADH}_2$  при превращении гликогена в полигидроксибутират.

Данные процессы могут быть описаны следующим образом [60]:

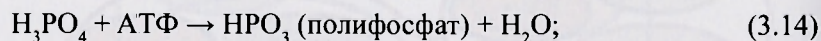


Для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов в этот период образуется АТФ за счет распада полифосфатов:

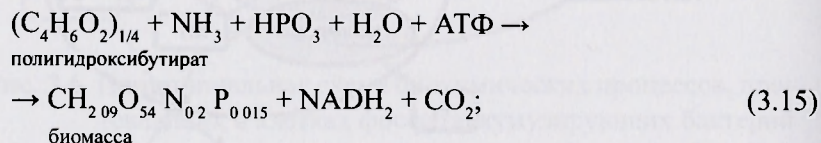


В ходе аэробного периода протекают следующие биохимические процессы:

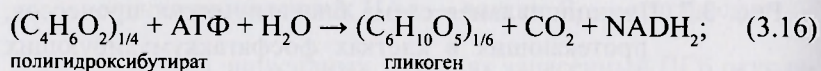
- образование полифосфатов:



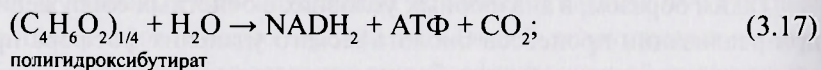
- рост биомассы и поддержание жизнедеятельности клеток бактерий:



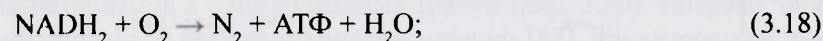
- образование гликогена:



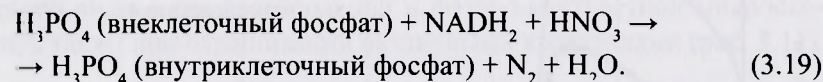
- распад полигидроксибутирата:



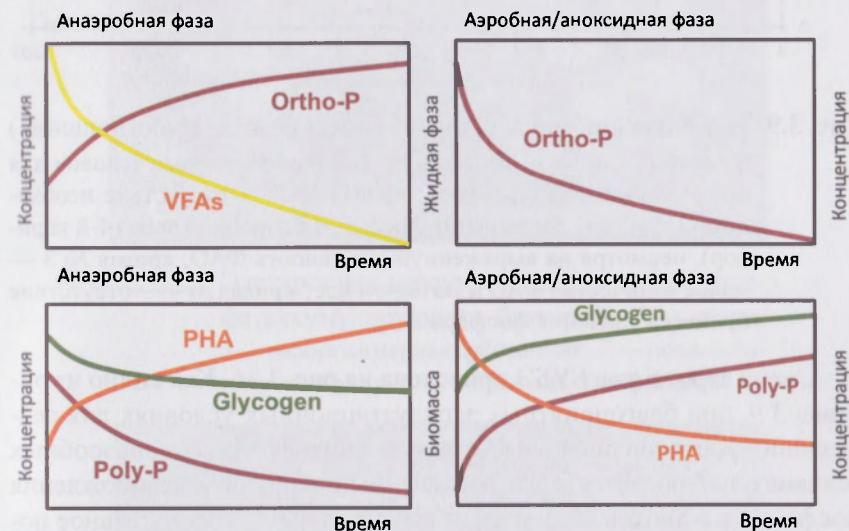
- образование АТФ за счет окисления  $\text{NADH}_2$ :



- потребление фосфатов:

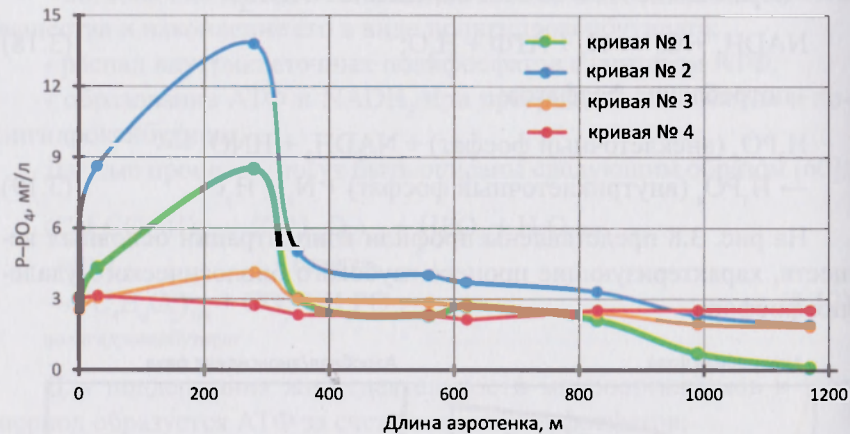


На рис. 3.8 представлены профили концентрации основных веществ, характеризующие процесс глубокого биологического удаления фосфора.



**Рис. 3.8.** Типовые профили концентрации основных веществ, участвующих в процессе биологического удаления фосфора (Poly-P — полифосфат; Ortho-P — ортофосфат; Glycogen — гликоген; VFAs — ЛЖК; PHA — полигидроксиалканоеат)

На рис. 3.9 дана динамика высвобождения фосфора в анаэробной зоне и поглощения фосфора в аэробной зоне аэротенка блока удаления биогенных элементов (БУБЭ) Люберецких очистных сооружений [61].

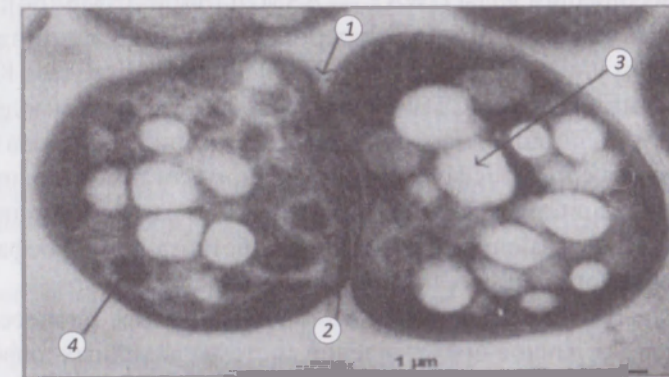


**Рис. 3.9.** Типичная динамика фосфора (высвобождение-поглощение) в аэротенках БУБЭ: кривая № 1 — благоприятные условия для процесса удаления фосфора; кривая № 2 — отсутствие необходимой глубины поглощения фосфатов в аэробной зоне (4-й коридор), несмотря на выраженную активность ФАО; кривая № 3 — малое количество ФАО в активном иле; кривая № 4 — отсутствие процесса удаления фосфора

Схема аэротенков БУБЭ приведена на рис. 3.36. Как видно из рисунка 3.9, при благоприятных эксплуатационных условиях для реализации процессов биологического удаления фосфора в анаэробных условиях наблюдается ярко выраженный процесс высвобождения фосфатов, а в аноксидных и аэробных условиях — эффективное поглощение фосфора.

Метаболизм фосфатаккумулирующих бактерий может быть охарактеризован как циклическое накопление и расходование гликогена и фосфатов. Для поддержания метаболизма данным микроорганизмам необходимо больше энергии, чем остальным гетеротрофам. Поэтому при создании в сооружении только аэробных условий эти бактерии не выживают, для них необходимо чередование как аэробных, так и анаэробных условий, где они поглощают субстрат при отсутствии конкуренции с микроорганизмами других групп.

Полифосфаты накапливаются в клетках фосфатаккумулирующих организмов в виде отдельных гранул (рис. 3.10). Впервые они были описаны у бактерии *Spirillum volutans* [62], и в литературе эти гранулы известны как «волютиновые гранулы». Гранулы волютина хорошо видны при светопольной и фазово-контрастной микроскопии, а также при окрашивании различными красителями (рис. 3.11).



**Рис. 3.10.** Электронная микрофотография клеток фосфатаккумулирующих бактерий: 1 — септа; 2 — экзополимерная субстанция; 3 — поли-бета-гидроксibuтират; 4 — гранулы полифосфата



**Рис. 3.11.** Микроколония фосфатаккумулирующих бактерий в активном иле (окраска метиленовой синькой)



### 3.2.4. Биологическое удаление фосфора.

#### Математическое описание процесса

В настоящее время наиболее широкое применение для математического описания кинетики биологического удаления фосфора получили несколько моделей: модели ASM (Activated Sludge Model), разработанные группой математического моделирования Международной ассоциации воды (IWA), — ASM2d [63] и ASM3 [64]; TUDP (Technical University of Delft Phosphorus) — модель, разработанная в техническом университете г. Дельф (Голландия) [65]; модель Кейптаунского университета УСТРНО-модель [66, 67]. Данные модели отличаются детализацией математического описания процессов биологического удаления фосфора и фракционного состава органических соединений, при этом все они основываются на дробно-линейных функциях, описывающих потребление субстрата, рост фосфатаккумулирующих организмов, потребление фосфора.

В моделях ASM для описания биохимических процессов используется матричное представление системы линейных дифференциальных уравнений. Все компоненты в модели и все происходящие в системе процессы (реакции) обозначаются индексами  $i$  и  $j$  соответственно. Из стехиометрических коэффициентов для компонентов  $i$  в процессах  $j$  составляется матрица  $\mathbf{v} = (v_{ij})$ . Скорости протекания реакций составляют вектор  $\mathbf{r}$ . При этом вектор скоростей приращения концентраций компонентов  $\mathbf{r}$  представляется в виде  $\mathbf{r} = \mathbf{v}\mathbf{p}$  или, иначе,  $r_i = \sum_j v_{ij} p_j$  (по всем реакциям  $j$ ).

В модели ASM2d кинетика потребления ацетата НАс в анаэробных условиях (рис. 3.6 и уравнения (3.12), (3.13)) описывается следующей функцией:

$$p_{\text{НАс}} = -q_{\text{РНА}} \frac{S_{\text{НАс}}}{S_{\text{НАс}} + K_{\text{НАс}}} \frac{S_{\text{АЛК}}}{S_{\text{АЛК}} + K_{\text{АЛК}}} \frac{X_{\text{РР}}/X_{\text{РАО}}}{K_{\text{РР}} + X_{\text{РР}}/X_{\text{РАО}}} X_{\text{РАО}}, \quad (3.20)$$

где  $p_{\text{НАс}}$  — скорость потребления ацетата, г/г·сут;

$q_{\text{РНА}}$  — константа скорости накопления полигидроксиалканоатов (ПГА, РНА), г  $X_{\text{РНА}}/г X_{\text{РАО}} \cdot \text{сут}$ ,  $X_{\text{РНА}}$  — концентрация полигидроксиалканоатов;

- $S_{\text{НАс}}$  — концентрация ацетата, мг/л = г/м<sup>3</sup>;
- $K_{\text{НАс}}$  — константа полунасыщения по ацетату, мг/л = г/м<sup>3</sup>;
- $S_{\text{АЛК}}$  — щелочность, мг/л = г/м<sup>3</sup>;
- $K_{\text{АЛК}}$  — константа полунасыщения по щелочности ( $\text{HCO}_3^-$ ), ммоль  $\text{HCO}_3^-/л = \text{моль } \text{HCO}_3^-/м^3$ ;
- $X_{\text{РР}}$  — концентрация запасенных полифосфатов в ФАО, мг Р/л = Р/м<sup>3</sup>;
- $X_{\text{РАО}}$  — концентрация фосфатаккумулирующих микроорганизмов ФАО, мг ХПК/л = г ХПК/м<sup>3</sup>;
- $K_{\text{РР}}$  — константа полунасыщения для полифосфатов, г  $X_{\text{РР}}/г X_{\text{РАО}}$ .

Скорость роста фосфатаккумулирующих микроорганизмов в аэробных условиях  $\mu_{\text{РАО}}$  в модели ASM2d описывается уравнением:

$$\mu_{\text{РАО}} = \mu_{\text{max РАО}} \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2}} \frac{S_{\text{NH}_4}}{S_{\text{NH}_4} + K_{\text{NH}_4}} \frac{S_{\text{PO}_4}}{S_{\text{PO}_4} + K_{\text{PO}_4}} \frac{S_{\text{АЛК}}}{S_{\text{АЛК}} + K_{\text{АЛК}}} \times \frac{X_{\text{РНА}}/X_{\text{РАО}}}{K_{\text{РНА}} + X_{\text{РНА}}/X_{\text{РАО}}} X_{\text{РАО}}, \quad (3.21)$$

где  $\mu_{\text{max РАО}}$  — максимальная скорость роста фосфатаккумулирующих микроорганизмов в аэробных условиях, 1/сут;

$S_{\text{O}_2}$  — концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне, мг/л = г/м<sup>3</sup>;

$K_{\text{O}_2}$  — константа полунасыщения по кислороду, мг/л = г/м<sup>3</sup>;

$S_{\text{NH}_4}$  — текущая концентрация аммонийного азота, мг/л = г/м<sup>3</sup>;

$K_{\text{NH}_4}$  — константа полунасыщения по аммонийному азоту, мг/л = г/м<sup>3</sup>.

Скорость потребления фосфатов  $p_{\text{PO}_4}$ , г/сут, в аэробных условиях в ASM2d описывается следующей зависимостью:

$$p_{\text{PO}_4} = q_{\text{РР}} \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2}} \frac{S_{\text{PO}_4}}{S_{\text{PO}_4} + K_{\text{PS}}} \frac{S_{\text{АЛК}}}{S_{\text{АЛК}} + K_{\text{АЛК}}} \frac{X_{\text{РНА}}/X_{\text{РАО}}}{K_{\text{РНА}} + X_{\text{РНА}}/X_{\text{РАО}}} \times \frac{K_{\text{max}} - X_{\text{РР}}/X_{\text{РАО}}}{K_{\text{РР}} + X_{\text{РР}}/X_{\text{РАО}}} X_{\text{РАО}}, \quad (3.22)$$

где  $q_{PP}$  — константа скорости накопления полифосфатов  $X_{PP}$ ,  
 $г X_{PP}/г X_{PAO} \cdot сут$ ;

$K_{max}$  — максимально возможное количество полифосфатов в  
 ФАО —  $(X_{PP}/X_{PAO})_{max}$ ,  $г X_{PP}/г X_{PAO}$ ;

$K_{PS}$  — константа полунасыщения для процесса внутриклеточно-  
 го накопления фосфатов,  $мг P/л = г P/м^3$ .

В табл. 3.8 приведены значения кинетических параметров процесса биологического удаления фосфора, приведенные авторами модели ASM2d.

**Таблица 3.8.** Значения кинетических параметров процесса биологического удаления фосфора в модели ASM2d

| Обозначение     | Наименование  | Значение при $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ | Значение при $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ | Размерность                     |
|-----------------|---|--|--|---------------------------------|
| $q_{PHA}$       | Константа скорости накопления $X_{PHA}$                             | 3,00   | 2,00   | $г X_{PHA}/г X_{PAO} \cdot сут$ |
| $q_{PP}$        | Константа скорости накопления $X_{PP}$                              | 1,50   | 1,00   | $г X_{PP}/г X_{PAO} \cdot сут$  |
| $\mu_{max PAO}$ | Максимальная скорость роста ФАО                                     | 1,00   | 0,67   | $1/сут$                         |
| $K_{O_2}$       | Константа полунасыщения по кислороду                                | 0,20   | 0,20   | $г O_2/м^3$                     |
| $K_A$           | Константа полунасыщения по $S_{ALK}$                                | 0,1  | 0,1  | $моль HCO_3^-/м^3$              |
| $K_{NH_4}$      | Константа полунасыщения по аммонийному азоту                        | 0,05   | 0,05   | $г N/м^3$                       |
| $K_{PO_4}$      | Константа полунасыщения по фосфору                                  | 0,01   | 0,01   | $г P/м^3$                       |
| $K_{PS}$        | Константа полунасыщения по фосфору для процесса накопления фосфатов | 0,20   | 0,20   | $г P/м^3$                       |
| $K_{PP}$        | Константа полунасыщения для полифосфатов                            | 0,01   | 0,01   | $г X_{PP}/г X_{PAO}$            |
| $K_{max}$       | Максимальное соотношение $X_{PP}/X_{PAO}$                           | 0,34   | 0,34   | $г X_{PP}/г X_{PAO}$            |
| $K_{PHA}$       | Константа насыщения по РНА  | 0,01   | 0,01   | $г X_{PHA}/г X_{PAO}$           |

Необходимо отметить, что значения кинетических параметров авторами модели определялись на конкретных городских сточных водах. Авторы ASM2d говорят о том, что значения данных параметров могут существенно отличаться в зависимости от качественного состава конкретных сточных вод даже для городских сточных вод.

*Настоятельно требуется определение значений кинетических параметров конкретных сточных вод (при новом строительстве необходимо принимать значения кинетических параметров процессов биологического удаления фосфора, определенные ранее на аналогичных по составу сточных водах) при проектировании сооружений. В ходе эксплуатации сооружений необходимо периодически определять кинетические параметры процесса для конкретных сточных вод.*

Уравнения (3.20)—(3.22) позволяют оценить и основные факторы, влияющие на эффективность реализации процесса биологического удаления фосфора в реальных сооружениях.

### 3.2.5. Биологическое удаление фосфора.

#### Факторы, влияющие на эффективность процессов

**Органический субстрат.** Теоретические исследования процессов биологического удаления фосфора из сточных вод, а также многолетний опыт промышленной реализации данной технологии на очистных сооружениях показывает, что для осуществления эффективной очистки сточных вод от фосфора отношение ХПК к количеству требуемого к удалению фосфора должно составлять не менее 35:1, а БПК<sub>5</sub> к фосфору — 20:1. По данным [68] в том случае, если в качестве завершающей стадии очистки используется седиментация, для обеспечения концентрации общего фосфора в очищенной воде, равной 1 мг/л и менее, необходимо отношение БПК<sub>5</sub> к общему фосфору 20:1 и более, а отношение ХПК к общему фосфору — 45:1 и более. По данным [69] 1 г фосфора может быть удален при реализации технологии биологического удаления фосфора из сточных вод в том случае, когда имеется 10 г легко-разлагаемого источника углерода. Для проектирования городских

очистных сооружений Северной Америки [70] рекомендует соотношение 50 мг ХПК/мг к Р. Для достижения необходимого уровня очистки сточных вод в Южной Африке, по данным [71], необходимо соотношение 50...59 мг ХПК/мг к Р, при более высоких соотношениях возможна более глубокая очистка до концентраций 0,5 мг Р/л. Однако наиболее значимым фактором для реализации процесса биологического удаления фосфора является вид органического субстрата, биологически доступного в анаэробных условиях.

Органические субстраты в литературе, посвященной очистке сточных вод, принято подразделять на короткоцепочечные, или летучие жирные кислоты (ЛЖК), и длинноцепочечные жирные кислоты (не-ЛЖК). В ранних исследованиях, посвященных процессу глубокого биологического удаления фосфора, высокая эффективность очистки связывалась с органическим субстратом, относящимся к группе низкомолекулярных монокарбоновых кислот ( $C_1-C_6$ ), или ЛЖК. Многими авторами отмечалось более активное высвобождение фосфора в том случае, когда в качестве органического субстрата использовался ацетат или пропионат [72—74]. В указанных источниках отмечается, что концентрация легкоразлагаемых органических соединений, относящихся к ЛЖК, в анаэробной зоне должна составлять не менее 25 мг ХПК/л. Повышение концентрации ЛЖК вызывает увеличение количества высвобождаемого в анаэробных условиях фосфора и, соответственно, позволяет повышать количество запасаемого внутриклеточного органического вещества. В то же время концентрации ацетата выше 400 мг ХПК/л вызывают снижение эффективности процесса глубокого биологического удаления фосфора.

В табл. 3.9 представлены данные различных авторов о количестве фосфора, высвобождаемого при потреблении 1 мг ацетата в анаэробной зоне.

В табл. 3.10 приведены данные о количестве фосфора, выделяющегося при использовании различных короткоцепочечных жирных кислот [75] в качестве субстрата. Проанализировав данные табл. 3.10, можно сделать вывод, что количество выделившегося фосфора на единицу субстрата в ХПК возрастает с увеличением молекулярного веса кислот, за исключением уксусной кислоты.

**Таблица 3.9.** Отношение фосфора, высвобождаемого в анаэробных условиях при потреблении 1 мг ацетата

| Источник          | P-PO <sub>4</sub> /ацетат, мг |
|-------------------|-------------------------------|
| Wentzel M.C. [76] | 0,23                          |
| Arin V. [77]      | 0,20...0,38                   |
| Mimo T. [78]      | 0,38                          |
| Wentzel M.C. [79] | 0,50...0,55                   |
| Comcau Y. [80]    | 0,68...0,73                   |
| Kunst S. [81]     | 0,30                          |
| Abu-Ghararah [75] | 0,37                          |

**Таблица 3.10.** Количество фосфора, выделяющегося при использовании различных короткоцепочечных жирных кислот

| Источник углерода      | Весовое соотношение —<br>выделившийся фосфор/<br>потребленный субстрат,<br>мг Р/мг ХПК | Молярное соотношение —<br>выделившийся фосфор/<br>потребленный субстрат,<br>моль Р/моль ХПК |
|------------------------|--|---|
| Уксусная кислота       | 0,37   | 0,77  |
| Пропионовая кислота    | 0,12   | 0,44  |
| Масляная кислота       | 0,15   | 0,78  |
| Июмасляная кислота     | 0,16   | 0,80  |
| Валериановая кислота   | 0,19   | 1,72  |
| Иювалериановая кислота | 0,25   | 2,31  |

**Таблица 3.11.** Количество ХПК, требуемое для удаления 1 мг фосфора

| Источник углерода      | Потребленный ХПК/удаленный фосфор, мг |
|------------------------|---------------------------------------|
| Уксусная кислота       | 18,8                                  |
| Иювалериановая кислота | 23,5                                  |
| Пропионовая кислота    | 31,5                                  |
| Июмасляная кислота     | 36,1                                  |
| Масляная кислота       | 39                                    |
| Валериановая кислота   | 94                                    |

Кроме фосфатаккумулирующих бактерий, другие микроорганизмы активного ила способны запасать как ЛЖК, так и другие субстраты в анаэробных условиях без выделения фосфора, создавая

конкуренцию поли-Р-бактериям. Если в сточной воде присутствуют ацетат и глюкоза, то начинают доминировать G-бактерии — гликогенаккумулирующие организмы, ГАО (Glycogen Accumulating Organisms — GAOs), которые запасают ацетат быстрее, чем фосфатаккумулирующие, утилизируя глюкозу как источник энергии. ГАО представляют собой гетеротрофные микроорганизмы, которые не могут накапливать полифосфаты, однако могут потреблять легко-окисляемый субстрат в анаэробных условиях наряду с ФАО. В результате происходит конкуренция между ГАО и ФАО за субстрат. При отсутствии глюкозы фосфатаккумулирующие бактерии получают преимущество перед G-бактериями в использовании ацетата, т. к. скорость потребления ацетата у поли-Р-бактерий выше, чем у G-бактерий. В том случае, когда в анаэробных условиях ацетат присутствует в концентрациях, превышающих потребности фосфатаккумулирующих бактерий, в биоценозе могут присутствовать как поли-Р, так и G-бактерии [82].

**рН среды.** Оптимальный диапазон значений рН в анаэробных условиях для реализации процесса биологического удаления фосфора из сточных вод равен 7,0...9,0. На рис. 3.12, 3.13 представлены зависимости поглощения ацетата и высвобождения фосфора при различных значениях рН среды [60].

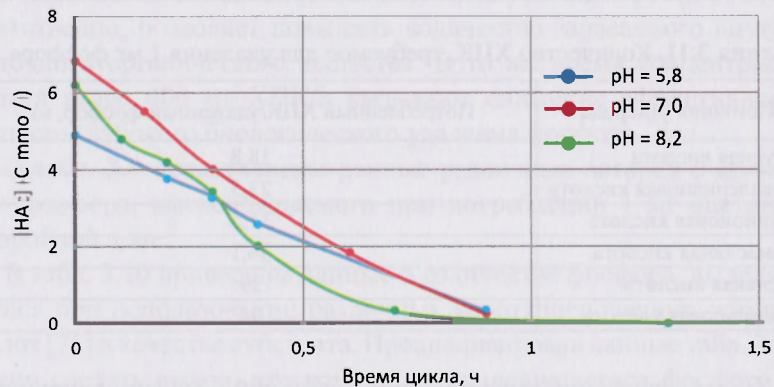


Рис. 3.12. Динамика поглощения ацетата при различных значениях рН

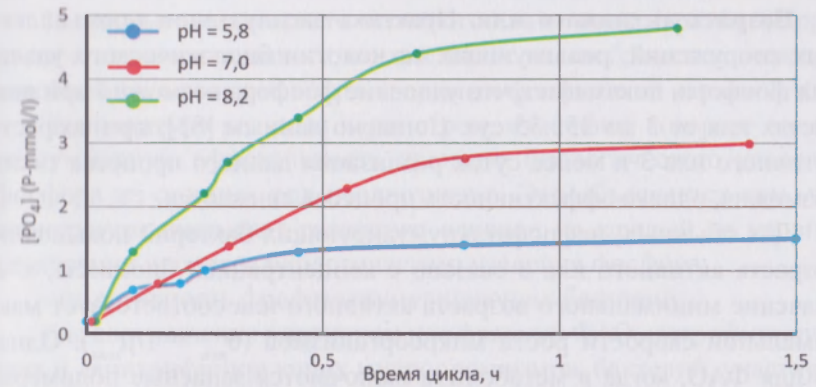


Рис. 3.13. Динамика высвобождения фосфора при различных значениях рН

Таким образом, кислотность среды, в которой находится активный ил, влияет на процесс биологического удаления фосфора. Этот фактор может быть критическим в течение анаэробной фазы.

На рис. 3.14 представлена зависимость отношения количества высвободившегося в анаэробных условиях фосфора на единицу потребленного ацетата от значения рН среды [60].

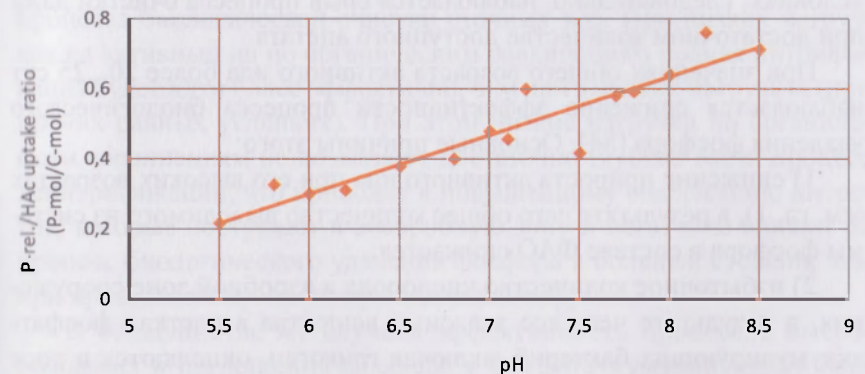


Рис. 3.14. Зависимость отношения количества высвободившегося в анаэробных условиях фосфора на единицу потребленного ацетата от значения рН среды

**Возраст активного ила.** Практика эксплуатации промышленных сооружений, реализующих технологии биологического удаления фосфора, показывает, что удаление фосфора возможно при возрастах ила от 3 до 25...35 сут. Согласно данным [83], при возрасте активного ила 3 и менее суток реализация данного процесса также возможна, однако эффективность процесса снижается.

Для обычных, нефосфатаккумулирующих бактерий повышение возраста активного ила  $\theta$  связано с концентрацией биомассы, т. е. значение минимального возраста активного ила соответствует максимальной скорости роста микроорганизмов ( $\theta_{\min} = 1/\mu_{\max}$ ). Однако для ФАО, когда в метаболизм включаются запасные полимеры, изменение возраста ила вызывает изменения во внутриклеточных запасенных компонентах, что приводит к срыву процесса биологического удаления фосфора. Скорость поглощения фосфатов определяется скоростью конверсии полигидроксibuтирата в аэробных и анаэробных условиях и величиной ПГБ-фракции в клетках бактерий. Минимальный аэробный/аноксидный возраст ила, обеспечивающий поглощение достаточного количества ацетата, составляет 3 сут. При возрасте ила менее 3 сут содержание полифосфатов становится слишком низким для обеспечения поглощения ацетата в анаэробных условиях; следовательно, наблюдается срыв процесса очистки даже при достаточном количестве доступного ацетата.

При значениях общего возраста активного ила более 20...25 сут наблюдается снижение эффективности процесса биологического удаления фосфора [84]. Основные причины этого:

1) снижение прироста активного ила при его высоких возрастах (см. гл. 1), в результате чего общее количество выводимого из системы фосфора в составе ФАО снижается;

2) избыточное количество кислорода в аэробной зоне сооружения, в результате чего все запасные вещества в клетках фосфатаккумулирующих бактерий, включая гликоген, окисляются и рост ФАО прекращается, что приводит к снижению доли ФАО в общей массе активного ила и, как следствие, к уменьшению эффективности процесса биологического удаления фосфора в сооружении;

3) при высоком возрасте активного ила возможно развитие процесса его минерализации и, как следствие, высвобождение в среду в дробной зоне сооружения растворимых фосфатов из клеток ФАО.

**Температура** является параметром, изменение которого влияет на суммарную эффективность процесса биологического удаления фосфора из сточных вод неоднозначно. Это объясняется тем, что температура оказывает различное влияние на каждый из уровней реализации процесса биологического удаления фосфора:

- на активность фосфатаккумулирующих бактерий;
- на соотношение в активном иле фракций ФАО, нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов, бактерий, участвующих в аэробном окислении органических загрязнений;
- на гидролиз высокомолекулярных соединений в анаэробных условиях и т. д.

В табл. 3.12 представлено, как влияет снижение температуры сточных вод на различные уровни процесса биологического удаления фосфора [85].

Как видно из табл. 3.12, уменьшение и повышение температуры может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на процесс биологического удаления фосфора. Количественное же выражение эффекта связано с конкретными условиями реализации процесса биологической очистки сточных вод. При низких нагрузках на активный ил по органическим соединениям полная нитрификация будет идти более эффективно, чем при высоких нагрузках (при прочих равных условиях). При этом низкие нагрузки по органическим соединениям не позволяют достаточно глубоко вести процесс денитрификации, что приводит к повышенному содержанию нитратов, которые поступают в анаэробную зону и негативно влияют на процесс биологического удаления фосфора в большей степени, чем при проведении процесса при высоких нагрузках.

В большинстве же случаев эффективность процессов высвобождения и поглощения фосфора у фосфатаккумулирующих бактерий повышается с повышением температуры. Температура в первую очередь влияет на активную биомассу, и при сравнении ведения процессов биологического удаления фосфора при различных

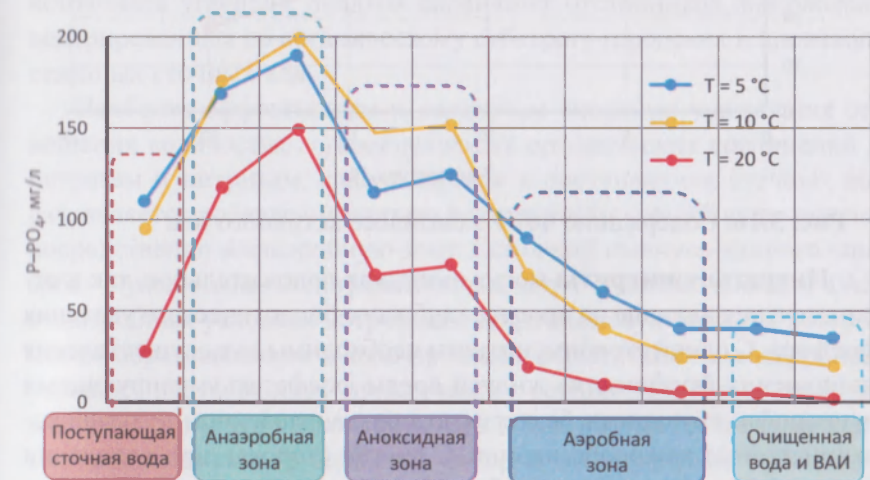
температурах скорости высвобождения и поглощения фосфора выражаются как удельные скорости процессов (на грамм беззольного вещества активного ила).

**Таблица 3.12.** Влияние снижения температуры на процесс биологического удаления фосфора

| Уровень                      | Влияние  | Результат  | Эффективность суммарного процесса |
|------------------------------|--|--|-----------------------------------|
| Активность ФАО               | Уменьшение скорости конвертации  | Уменьшение количества высвобождающегося и поглощаемого фосфора                                 | Снижение                          |
|                              | Уменьшение распада клеток микроорганизмов активного ила, приводящее к увеличению прироста ила  | Увеличение возможности запаса полифосфатов клетками ФАО  | Повышение                         |
| Популяция ФАО в активном иле | Изменение размеров фракции поли-Р-бактерий в иле (увеличение или уменьшение)*  | Изменение кинетики процессов высвобождения и поглощения фосфора                                | Снижение/повышение*               |
|                              | Уменьшение эффективности процессов нитрификации и, как следствие, уменьшение количества нитратов в возвратных потоках, поступающих в анаэробную зону | Больше доступного для ФАО субстрата, увеличение возможности запаса поли-Р-бактериями           | Повышение                         |
|                              | Уменьшение эффективности процесса гидролиза органических соединений, снижение количества ЛЖК   | Уменьшение количества субстрата, доступного ФАО, снижение возможности запаса поли-Р-бактериями | Снижение                          |

\* Увеличение или уменьшение фракции ФАО в активном иле при уменьшении температуры сточной воды зависит от состава конкретных сточных вод и технологической схемы реализации процессов удаления биогенных элементов.

На рис. 3.15 представлены графики зависимостей процессов высвобождения-поглощения фосфора ФАО при различных температурах [86]. Данные были получены при реализации процессов биологического удаления фосфора по схеме УСТ (описание данной схемы см. в п. 3.3). Доза активного ила (по беззольному веществу) составляла во всех случаях в анаэробной зоне 2,6...3,0 г/л, на выходе из аэробной зоны — 4,3...4,7 г/л. Время нахождения сточной воды в реакторах было одинаковым для всех случаев, и приведенные данные на рисунках представляют собой усредненные результаты по 8 экспериментам.



**Рис. 3.15.** Динамика концентрации P-PO<sub>4</sub> в различных зонах при различных значениях температуры

Как видно из рис. 3.15, количество высвобождаемого фосфора при температуре 5 °C составляет 80 мг/л P-PO<sub>4</sub> (увеличение концентрации фосфора фосфатов в анаэробной зоне со 110 до 190 мг/л), а поглощаемого — 150 мг/л P-PO<sub>4</sub> (снижение концентрации фосфора в аноксидной и аэробной зонах со 190 до 40 мг/л). При температуре 10 °C эти значения составляют 110 и 180 мг/л P-PO<sub>4</sub> соответственно, а при температуре 20 °C количество высвобождаемого фосфора

составило 120 мг/л  $P-PO_4$ , а в аэробной зоне поглотился практически весь фосфор. При этом доля ФАО в биомассе активного ила при повышении температуры, как показано на рис. 3.16, уменьшалась.

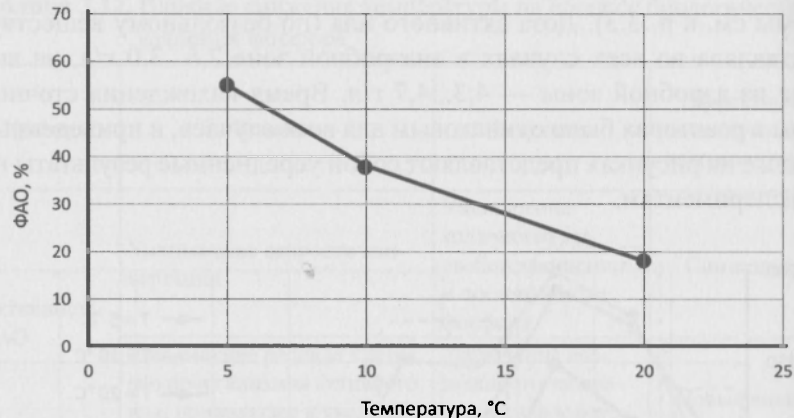


Рис. 3.16. Содержание ФАО в биомассе активного ила

**Нитраты и нитриты** могут иметь как положительное, так и отрицательное влияние на процесс глубокого биологического удаления фосфора. С одной стороны, нитраты необходимы для осуществления поглощения фосфатов из жидкой среды фосфатаккумулялирующими денитрифицирующими бактериями при направленном культивировании данных микроорганизмов. С другой стороны, при попадании нитратов и нитритов в анаэробную зону сооружения глубокого биологического удаления фосфора происходит угнетение и даже срыв процесса биологического удаления фосфора.

Нитраты и/или нитриты поступают в анаэробную зону со сточной водой, возвратным активным илом и внутренними рециклами (см. п. 3.3). Нитраты и/или нитриты могут содержаться в производственных сточных водах; в городских сточных водах их количество, как правило, незначительно и не оказывает отрицательного воздействия на процессы биологического удаления фосфора. При наличии нитратов и нитритов в поступающей воде необходимо искусственно повысить содержание ХПК в поступающем потоке. Как показано в

[87], при различных значениях ХПК и постоянной концентрации нитратов (50 мг  $N-NO_3$ /л) в поступающем в анаэробную зону потоке высвобождение фосфора наблюдалось только при ХПК 300 мг/л и более, то есть при отношении ХПК к азоту нитратов более 6.

*Для предотвращения срыва процесса биологического удаления фосфора при низких отношениях ХПК к азоту нитратов и нитритов необходимо использовать дополнительный источник углерода.*

В практических целях рекомендуется использование внешних источников углерода, осадков первичных отстойников, высококонцентрированных по органическому субстрату городских и производственных сточных вод.

Наиболее эффективным и надежным способом увеличения отношения количества легкоокисляемых органических соединений к нитратам и нитритам, содержащимся в поступающих сточных водах, является добавление ацетата в поток поступающей воды или непосредственно в анаэробную зону. Основной «минус» данного способа — увеличение эксплуатационных затрат. Помимо ацетата, ФАО в анаэробных условиях потребляют и пропионовую кислоту, которая может образовываться в ходе процесса ферментации в анаэробных условиях растворенных органических соединений (сахар, этанол, метанол и пр.), что позволяет использовать в качестве внешнего источника углерода эти вещества, которые дозируют, как правило, в начало анаэробной зоны.

В результате анаэробной ферментации первичных осадков сточных вод образуются ЛЖК, что позволяет использовать при низком отношении легкоокисляемых органических соединений к нитратам и нитритам схемы с преферментацией первичных осадков. Хотя ферментация первичных осадков для решения рассматриваемой проблемы более эффективна, чем применение ферментации возвратного активного ила, тем не менее вполне допустимо применение схемы с иреферментацией возвратного активного ила.

Для устранения попадания нитратов (и/или нитритов) в анаэробную зону с рециклами возвратного активного ила и внутренними

рециклами (п. 3.3) необходимо обеспечить минимальную концентрацию нитратов и нитритов в точках забора рециклов, подающих иловую смесь в анаэробную зону.

Наличие нитратов и нитритов в анаэробной зоне отрицательно влияет на процесс биологического удаления фосфора из-за конкуренции за субстрат денитрифицирующих и фосфатаккумулирующих бактерий. Денитрифицирующие бактерии (не фосфатаккумулирующие) при наличии нитратов (и/или нитритов) в анаэробной зоне получают преимущество перед фосфатаккумулирующими микроорганизмами и, в результате, используя связанный кислород нитратов и нитритов, окисляют, в первую очередь, легкоокисляемые органические соединения, которые необходимы ФАО. Это приводит к уменьшению количества легкоокисляемого в анаэробной зоне субстрата, который необходим для реализации процесса биологического удаления фосфора.

При отношении количества легкоокисляемого субстрата, выраженного в ХПК, к азоту нитратов  $N-NO_3$  в начале анаэробной зоны менее 6 вообще не создаются чисто анаэробные условия, и возможность культивирования ФАО отсутствует; при отношении ХПК легкоокисляемого субстрата к азоту нитратов от 6 до 9 эффективность биологического удаления фосфора очень незначительна.

На рис. 3.17 представлены зависимости концентрации фосфора фосфатов в очищенной воде от концентрации нитратов в рецикле иловой смеси из аноксидной зоны в анаэробную в аэротенках, запроектированных по технологии УСТ. Концентрация фосфора в поступающей сточной воде составляла 3,6...4,5 мг/л, значение рецикла за рассматриваемый промежуток времени не изменялось. Из данных, представленных на рис. 3.17, видно, что при содержании азота нитратов в рецикле иловой смеси, поступающей в анаэробную зону, менее чем 4 мг/л эффективность удаления фосфора фосфатов позволяет достичь качества очистки по  $P-PO_4$  на уровне ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения (0,2 мг/л). Концентрации  $N-NO_3$  в рецикле иловой смеси, поступающей в анаэробную зону аэротенков, более 4,5 мг/л приводят к существенному снижению эффективности процесса биологического удаления фосфора в рассматриваемом сооружении.

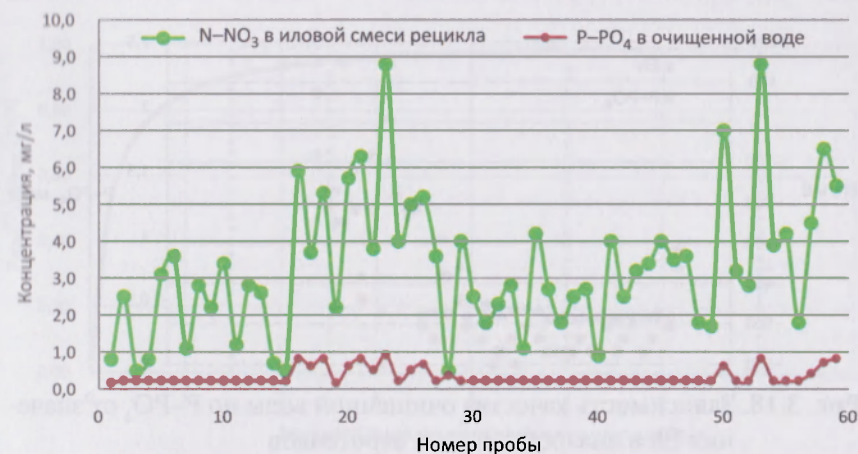


Рис. 3.17. Зависимость качества очищенной воды по  $P-PO_4$  от концентрации  $N-NO_3$  в иловой смеси рецикла, поступающей в анаэробную зону аэротенков

**Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП)** (редокс-потенциал, Reduction-Oxidation Reaction, OPR, Eh), мВ, представляет собой меру способности химических веществ присоединять электроны. ОВП определяют как электрический потенциал, устанавливающийся при погружении платины или золота (инертный электрод) в окислительно-восстановительную среду, то есть в раствор, содержащий как восстановленное, так и окисленное соединение. Для эффективного течения процесса биологического удаления фосфора значение Eh должно быть менее чем  $-200$  мВ в анаэробной зоне и существенно выше 0 мВ в аэробной. На рис. 3.18 представлена зависимость качественных показателей очищенной воды по  $P-PO_4$  от значения Eh в анаэробной зоне рассмотренных выше аэротенков.

Контроль онлайн-показаний датчика Eh в анаэробной зоне аэротенка, работающего по схеме биологического удаления фосфора, позволяет оперативно анализировать причины снижения эффективности реализации процессов удаления фосфора в реальных условиях эксплуатации и управлять работой сооружения.



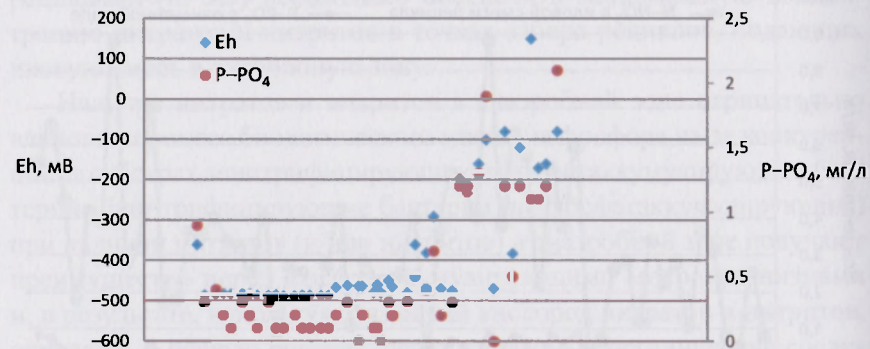


Рис. 3.18. Зависимость качества очищенной воды по  $P-PO_4$  от значения Eh в анаэробной зоне аэротенков

Показания анализатора Eh в анаэробной зоне более 0 мВ (иногда эти значения достигают более 100 мВ) сигнализируют о создании в конструктивно анаэробной зоне аноксидных и даже аэробных условий. В этом случае необходимо контролировать концентрацию нитратов в рецикле иловой смеси в анаэробную зону и концентрации растворенного кислорода в поступающей сточной воде и рециклах в анаэробную зону.

**Металлы.** Опыт эксплуатации сооружений, реализующих процессы биологического удаления фосфора, показывает, что калий и магний повышают эффективность процессов биологического удаления фосфора. Оптимальное молярное соотношение между фосфором фосфатов, калием и магнием — 3:1:1 при использовании в качестве источника углерода ацетата. Наличие в сточной воде кальция, железа и алюминия повышает эффективность удаления фосфатов в результате дополнительной преципитации.

**Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне.** Как было показано в п. 3.2.4 (формулы (3.21) и (3.22)), скорость роста фосфатаккумулялирующих микроорганизмов в аэробных условиях  $\mu_{FAO}$  и скорость потребления фосфатов  $p_{PO_4}$  увеличиваются с повышением концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне (рис. 3.19).

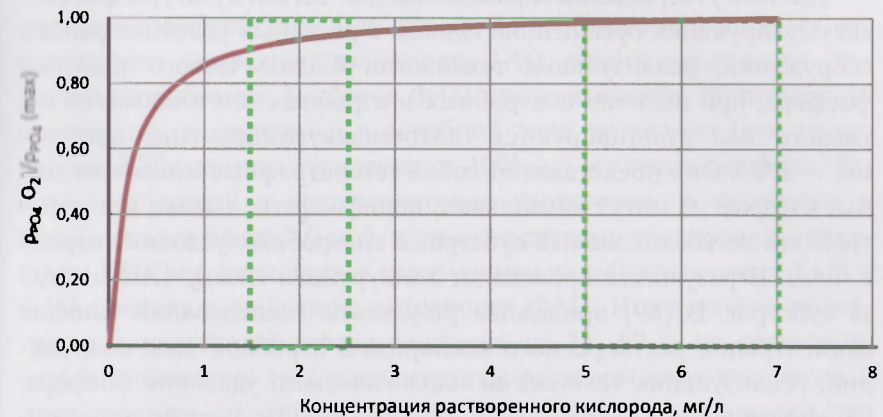


Рис. 3.19. Отношение скорости потребления фосфатов ФАО в аэробной зоне при текущей концентрации растворенного кислорода к максимальной скорости

На рис. 3.19 представлены отношения относительных скоростей потребления фосфатов  $p_{PO_4}$  при текущей концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне сооружения к скорости потребления фосфатов при максимальных концентрациях растворенного кислорода (нормальные концентрации кислорода при температуре 20 °С и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.). Уже при концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне 1,5 мг/л скорости потребления фосфатов составляют 90 % от скорости процесса при максимальных концентрациях кислорода. При концентрациях же растворенного кислорода более 2,5 мг/л скорости потребления фосфатов составляют более 95 % от скорости процесса при максимальных концентрациях кислорода. При концентрациях растворенного кислорода в аэробной зоне более 5,0 мг/л скорости процесса достигают максимальных значений.

В [88] также показано, что при реализации технологий биологического удаления фосфора повышение концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне сооружения увеличивает эффективность поглощения фосфатов.

Данные утверждения справедливы для чистой культуры фосфат-аккумулирующих организмов. Однако в реальных условиях работы сооружений, реализующих технологии биологического удаления фосфора, при наличии анаэробных и аэробных зон в биомассе активного ила культивируются гликогенаккумулирующие организмы — ГАО. Они представляют собой гетеротрофные микроорганизмы, которые не могут накапливать полифосфаты, однако могут потреблять легкоокисляемый субстрат в анаэробных условиях наряду с ФАО. В результате происходит конкуренция между ГАО и ФАО за субстрат. В [89] приведены результаты исследований влияния концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне сооружений, реализующих технологии биологического удаления фосфора, на эффективность потребления фосфора ФАО с учетом конкуренции данных микроорганизмов за субстрат с ГАО. Было получено, что при концентрациях растворенного кислорода в аэробной зоне сооружения менее 2,0 мг/л ФАО получают существенное преимущество перед ГАО, но при этом скорость потребления фосфора ФАО составляет 30...40 % от скоростей, полученных при более высоких концентрациях растворенного кислорода (рис. 3.20).

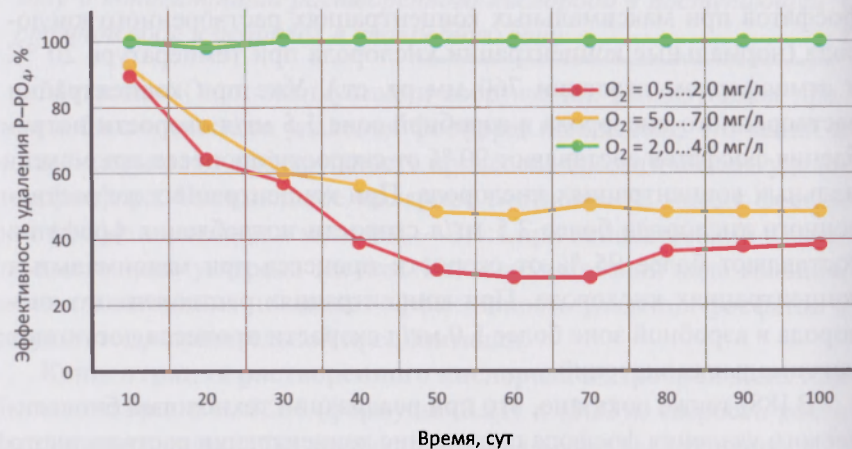


Рис. 3.20. Зависимость эффективности удаления фосфора от концентрации растворенного кислорода

При работе сооружения с концентрациями растворенного кислорода в аэробной зоне в диапазоне 2,0...4,0 мг/л наблюдалось существенное увеличение активности ГАО, однако увеличение скоростей потребления фосфатов ФАО при увеличении концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне позволило (как видно из рис. 3.20) достичь практически 100%-го удаления фосфора. Работа сооружений с концентрациями растворенного кислорода в аэробной зоне более 5,0 мг/л привела к резкому увеличению активности ГАО, и в этом случае конкуренция за субстрат между ГАО и ФАО привела к снижению активности ФАО. В результате эффективность удаления фосфора снизилась на 55...60 % по сравнению с эффективностью при концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне 2,0...4,0 мг/л. Таким образом, было установлено, что

*концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне аэротенка при реализации технологии биологического удаления фосфора должна составлять 2,0...4,0 мг/л.*

### 3.3. Схемы реализации процессов биологического удаления фосфора и нитри-денитрификации

В настоящее время существует множество технологических и технических решений для реализации процессов химического, биологического и биолого-химического удаления фосфора из сточных вод. В большинстве случаев эти схемы комплексно реализуют следующие процессы: аэробное и аноксидное окисление органических веществ, аэробное окисление аммония (нитрификация), восстановление нитратов и нитритов до газообразного азота (денитрификация) и удаление фосфора химическим, биологическим или биолого-химическим методами.

Очистные сооружения с технологией химического удаления фосфора разработаны и введены в эксплуатацию намного раньше сооружений биологического удаления фосфора. Так, в Нидерландах до последнего времени до 80 % очистных сооружений, работающих по технологии удаления биогенных элементов из городских сточных вод, использовали технологию с химической преципитацией [90],

в Германии только на трети из 900 сооружений по очистке сточных вод от фосфора используется биологический метод. В Швеции большинство сооружений по очистке от фосфора используют химические или биолого-химические методы. В Дании намечается тенденция к увеличению количества сооружений по очистке от фосфора, однако на большинстве из них в настоящее время используются биолого-химические методы. Детально схемы химического удаления фосфора, вопросы выбора типа реагента, расчета его количества и определения точки ввода реагента были рассмотрены выше в п. 3.2.1 и 3.2.2.

Сравнение надежности достижения требуемого качества очищенной воды по технологиям химического и биологического удаления фосфора показывает преимущества химического метода. В [141] приведены результаты работы двух крупных канализационных очистных сооружений Вашингтона — Blue Plains производительностью 1,4 млн м<sup>3</sup>/сут и Norman M. Cole производительностью 253 тыс. м<sup>3</sup>/сут, работающих по технологии удаления биогенных элементов. На очистных сооружениях Norman M. Cole используется комбинированная схема удаления фосфора биологическим и химическим методами. На сооружениях Blue Plains удаление фосфора производится только химическим методом. Среднее значение концентрации общего фосфора в сточных водах, поступающих на Norman M. Cole, составляет 5,8 мг/л (диапазон 3,6...8,4 мг/л), в стоках, поступающих на Blue Plains, средняя концентрация общего фосфора составляет 3,1 мг/л (диапазон 2,2...4,9 мг/л). Концентрация общего фосфора в очищенной воде Norman M. Cole составляет 0,6 мг/л, в очищенной воде Blue Plains — 0,15 мг/л. При этом отмечается, что процесс удаления фосфора на Blue Plains идет более стабильно при резком изменении качества входного стока. Однако количество реагента на Blue Plains на 1 мг/л удаляемого фосфора в 1,6 больше, чем на Norman M. Cole.

*Химическое удаление фосфора позволяет обеспечить более высокое и стабильное качество очистки сточных вод от соединений фосфора, чем комбинированный химико-биологический метод, однако цена этого преимущества высока.*

Именно высокие эксплуатационные затраты на реагенты заставляют специалистов искать надежные технологические и технические решения реализации технологий биологического удаления фосфора. Годовая стоимость реагента на реализацию технологии химического удаления фосфора для городских сточных вод составляет 700...1300 р. на 1 м<sup>3</sup> суточной производительности (в зависимости от качественных показателей поступающих сточных вод и точки ввода реагента) в ценах 2014 г. Например, для очистных сооружений средней производительностью 10 тыс. м<sup>3</sup>/сут (качество поступающей на биологическую очистку сточной воды: БПК<sub>5</sub> = 140 мг/л, концентрация взвешенных веществ 120 мг/л, концентрации N-NH<sub>4</sub> 30 мг/л и P-PO<sub>4</sub> 5 мг/л) годовое потребление реагента (FeCl<sub>3</sub>) при его дозировании в поток возвратного активного ила составит 420 м<sup>3</sup> по товарному продукту (при 42%-й концентрации). Расчет проведен для условий достижения следующего качества очищенной воды: БПК<sub>5</sub> = 2 мг/л, концентрация взвешенных веществ = 6 мг/л, концентрация N-NH<sub>4</sub> = 0,39 мг/л, N-NO<sub>2</sub> = 0,02 мг/л, N-NO<sub>3</sub> = 9,1 мг/л, P-PO<sub>4</sub> = 0,2 мг/л.

В этой связи остро встает вопрос разработки схем, обеспечивающих высокое и стабильное качество очистки сточных вод от соединений фосфора биологическим методом. Одним из первых решений биологического удаления фосфора (в сочетании с химическим) из сточных вод является процесс PhoStrip® [59, 91] (рис. 3.21).

**PhoStrip®-процесс** обеспечивает удаление фосфора из сточных вод как преципитацией фосфатов из супернатанта (надосадочной жидкости) стриппера, так и за счет реализации процесса биологического удаления фосфора и его выведения из системы с избыточным активным илом. Возвратный активный ил подвергается ферментации в анаэробном реакторе — стриппере, где происходит высвобождение фосфора в надосадочную жидкость (в реакторе также происходит разделение ила и надосадочной жидкости). Надосадочная жидкость (супернатант), обогащенная фосфором, поступает в смеситель, куда также подается известь. В результате преципитации происходит химическое удаление фосфора из системы. Возвратный активный ил после нахождения в стриппере в анаэробных условиях поступает в

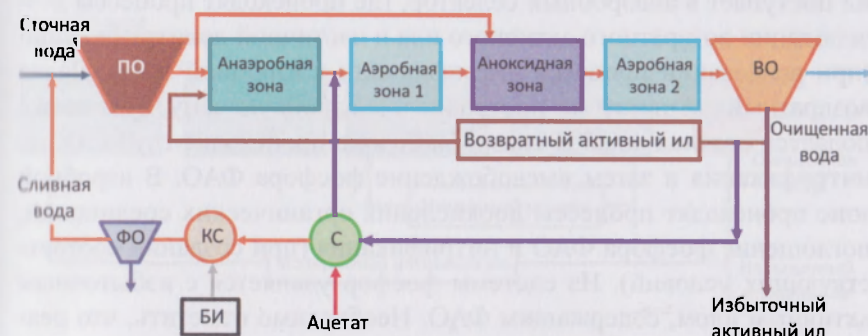
аэротенк, где обеспечиваются аэробные условия. В аэробных условиях ФАО потребляют фосфор и накапливают его в клетках. Фосфор выводится из системы с ФАО избыточного активного ила. Реализация данного процесса позволяет обеспечивать концентрацию ортофосфатов в очищенной воде менее 1,0 мг/л. С учетом того, что в данном процессе отсутствует зона денитрификации, для минимизации нитратов, поступающих с возвратным активным илом в стриппер, реализация процессов нитрификации не рекомендуется. Реализация процесса PhoStrip позволяет удалять из сточных вод органические соединения и фосфор.



**Рис. 3.21.** Схема реализации процесса PhoStrip: ПО — первичный отстойник, ВО — вторичный отстойник, С — стриппер, КС — камера смешивания, ФО — «фосфорный отстойник», БИ — бункер с известью

В процессе **Renphosystem** [92] сточная вода перед поступлением на биологическую очистку разделяется на два потока. Первый поток подается в анаэробную зону аэротенка, куда также поступает возвратный активный ил из вторичных отстойников. В анаэробной зоне происходит высвобождение фосфатов из клеток ФАО возвратного активного ила и поглощение легкоокисляемых органических соединений сточной воды. Из анаэробной зоны иловая смесь поступает в аэробную зону 1, где происходит поглощение фосфатов и параллельно протекает процесс нитрификации. Далее иловая смесь,

содержащая нитраты, поступает в аноксидную зону, куда также подается второй поток сточной воды. В аноксидной зоне нитраты восстанавливаются, при этом доноры электронов поступают со сточной водой, содержащей биодоступный субстрат. В аэробной зоне 2 удаляются остаточные количества фосфатов, аммонийного азота, азота нитритов и органических соединений. После вторичного отстойника часть возвратного активного ила подается в анаэробную зону сооружения, а часть потока подается в анаэробный стриппер, где происходит высвобождение фосфатов из клеток Р-бактерий (рис. 3.22).



**Рис. 3.22.** Технологическая схема процесса Renphosystem: ПО — первичный отстойник, ВО — вторичный отстойник, С — стриппер, КС — камера смешивания, ФО — «фосфорный отстойник», БИ — бункер с известью

Добавление ацетата в стриппер в количестве 10...20 мг ХПК/г ила стимулирует высвобождение фосфатов в анаэробных условиях (в стриппере) и рост ФАО. Возратный активный ил после стриппера поступает в аэробную зону аэротенка, и сливная вода, содержащая фосфаты, подается в камеру смешения, где смешивается с известью. В «фосфорном отстойнике» происходит осаждение фосфорного осадка из сливной воды, а сливная вода, уже не содержащая фосфаты, поступает в голову сооружений. Эффективность данного процесса составляет 97 % (по ортофосфатам) и 87 % по общему фосфору. Эффективность удаления азота в процессе Renphosystem составляет 70 % при низких и 80 % при высоких температурах, что

не позволяет обеспечить высокое качество очистки сточной воды от соединений азота. Качество очищенной воды при реализации процесса Renphosystem достигает концентрации по ортофосфатам 1 мг/л и менее.

**A/O® Process** (Anoxic-Oxic process) [93] предназначен, в основном, для окисления органических соединений и биологического удаления фосфора (рис. 3.23). При реализации данного процесса возможна, при соответствующих технологических решениях, частичная нитрификация и глубокая денитрификация. Возвратный активный ил поступает в анаэробный селектор, где происходят процессы дезоксидации возвратного активного ила и частичной денитрификации (при реализации процесса нитрификации в аэробной зоне). Далее возвратный активный ил поступает в анаэробную зону, куда также подается сточная вода. В анаэробной зоне происходит глубокая денитрификация и затем высвобождение фосфора ФАО. В аэробной зоне происходят процессы доокисления органических соединений, поглощение фосфора ФАО и нитрификация (при создании соответствующих условий). Из системы фосфор удаляется с избыточным активным илом, содержащим ФАО. Необходимо отметить, что реализация процесса нитрификации в данном процессе не позволяет, в большинстве случаев, обеспечивать условия для культивирования ФАО и, как следствие, обеспечить требуемую эффективность удаления фосфора. A/O Process применяется для биологического удаления азота и фосфора из высококонцентрированных по органическим соединениям сточных вод и не подходит для биологического удаления азота и фосфора из городских сточных вод.

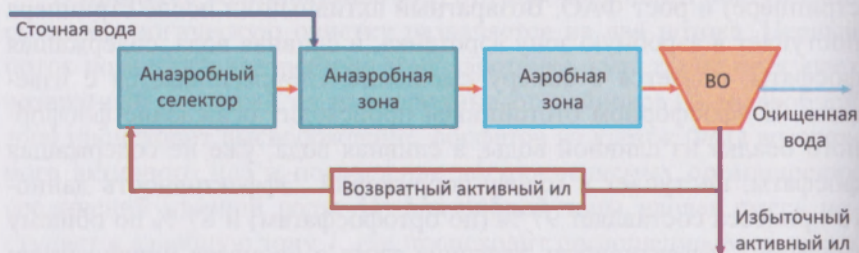


Рис. 3.23. Технологическая схема A/O Process

Модификацией A/O Process для биологического удаления азота и фосфора является **A2/O® Process** (Anaerobic-Anoxic-Oxic) [94, 95], где к конфигурации A/O Process добавляется зона денитрификации. A2/O Process реализует процессы биологического удаления фосфора и окисления органических соединений, нитрификации и денитрификации для городских сточных вод (средне- и высококонцентрированных по органическим соединениям в зависимости от наличия или отсутствия селектора). Данный процесс имеет два варианта: с селектором и без селектора (рис. 3.24).

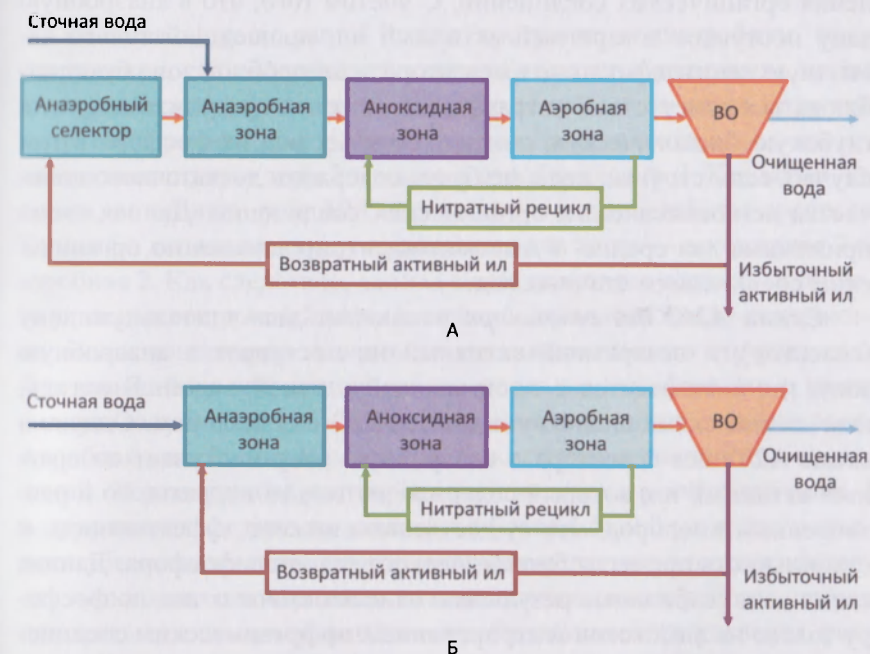


Рис. 3.24. Технологическая схема A2/O Process с анаэробным селектором (А) и без анаэробного селектора (Б)

При реализации схемы A2/O с селектором возвратный активный ил поступает в анаэробный селектор, где реализуются процессы дезоксидации возвратного активного ила и частичной денитрификации. Затем возвратный активный ил направляется в анаэробную

зону, в которую также поступает сточная вода. В анаэробной зоне происходит глубокая денитрификация, и после этого происходит высвобождение фосфора ФАО. Далее иловая смесь поступает в аноксидную зону, куда также поступает рецикл иловой смеси, обогащенной нитратами, из аэробной зоны («нитратный рецикл»). В аэробной зоне реализуются процессы нитрификации, доокисления органических соединений и поглощения фосфора ФАО. В данной схеме реализуются процессы биологического удаления фосфора, нитрификации, денитрификации, аноксидного и аэробного окисления органических соединений. С учетом того, что в анаэробную зону поступает возвратный активный ил, прошедший только частичную денитрификацию в селекторе, в анаэробной зоне будет наблюдаться присутствие нитратов, что может не позволить получить глубокую биологическую очистку сточных вод от фосфора в том случае, если сточные воды не будут содержать достаточного количества легкоокисляемых органических соединений. Данная схема применима для средне- и высококонцентрированных по органическим соединениям сточных вод.

**Схема A2/O без селектора** исключает дополнительную зону (селектор), и возвратный активный ил поступает в анаэробную зону, где смешивается с поступающей сточной водой. В остальном данная схема аналогична схеме A2/O с селектором. Однако в схеме A2/O без селектора в анаэробную зону поступает возвратный активный ил, который содержит не только нитраты, но и растворенный кислород, что существенно снижает эффективность и стабильность процесса биологического удаления фосфора. Данная схема дает стабильные результаты очистки сточных вод по фосфору только на высококонцентрированных по органическим соединениям сточных водах.

По аммонийному азоту, нитратному азоту, нитритам и органическим соединениям оба варианта A2/O-процесса позволяют получать эффективную и стабильную очистку — снижение общего азота (TN) на 80...90 % [96].

Дальнейшим развитием схемы A2/O является **пятистадийный процесс Барденфо — Bardenpho** [97] (рис. 3.25).

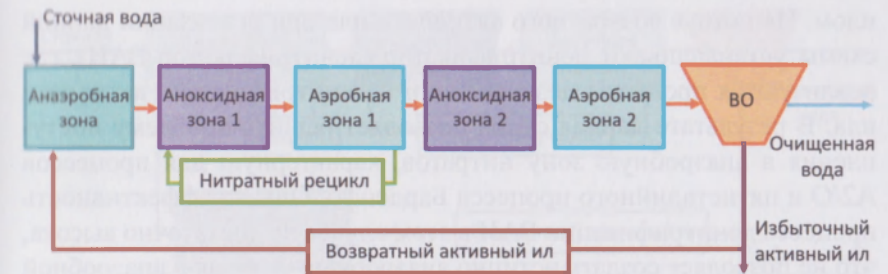


Рис. 3.25. Схема пятистадийного процесса Барденфо (Bardenpho)

Сточная вода в данной схеме поступает в анаэробную зону сооружения, где смешивается с возвратным активным илом, затем иловая смесь поступает в аноксидную зону 1, куда также подается нитратный рецикл из аэробной зоны 1. Далее иловая смесь поступает в аноксидную зону 2 и далее в аэробную зону 2. Как видно из схемы, по сравнению с A2/O-процессом в пятистадийном процессе Барденфо дополнительно устраиваются две зоны — аноксидная 2 и аэробная 2. Как следствие, данная схема позволяет достичь глубокого удаления соединений азота и может быть использована для очистки высококонцентрированных по соединениям азота сточных вод. Для повышения эффективности процесса денитрификации в аноксидную зону 2 возможно добавление внешнего источника углерода. Аэробная зона 2 используется для доокисления органических соединений. Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне 2 поддерживается, даже на выходе, не более 1,5...2,0 мг/л, что позволяет обеспечить минимальное количество растворенного кислорода, заносимого с возвратным активным илом в анаэробную зону, и повысить тем самым эффективность биологического удаления фосфора. Качество очищенной воды может достигать концентрации по общему азоту 2,0...5,0 мг/л.

Схема **The Johannesburg Process — JHB** [98], разработанная университетом города Йоханнесбург, позволяет решить проблему поступления нитратов в анаэробную зону с возвратным активным илом (рис. 3.26). Сточная вода, поступающая в анаэробную зону, смешивается с проденитрифицированным возвратным активным

илом. На потоке возвратного активного ила при реализации данной схемы устанавливают денитрификатор (денитрификатор ВАИ), где реализуются процессы дезоксидации и денитрификации активного ила. В результате данная схема позволяет решить проблему поступления в анаэробную зону нитратов, характерную для процессов А2/О и пятистадийного процесса Барденфо. Однако эффективность процесса денитрификации ВАИ в этом случае не достаточно высока, что не позволяет создать истинно анаэробные условия в анаэробной зоне сооружения.

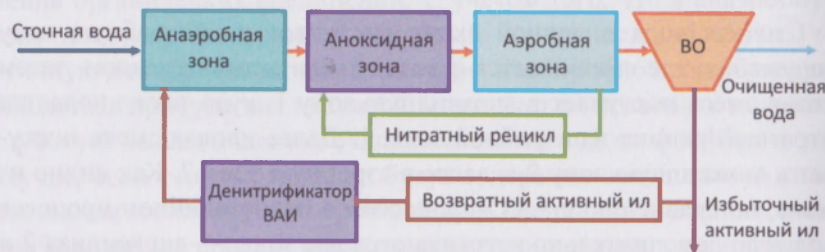


Рис. 3.26. Схема процесса JNB

Схема **процесса ISAH** (Institut für Siedelugswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität, г. Ганновер) [99] (рис. 3.27) похожа на схему JNB и отличается дополнительным рециклом иловой смеси из анаэробной зоны в денитрификатор возвратного активного ила. В анаэробной зоне из сточной воды ФАО потребляют только легкоокисляемые органические вещества, а средне- и трудноокисляемые соединения остаются в иловой смеси, которая и поступает в денитрификатор возвратного активного ила. Поступление в денитрификатор ВАИ иловой смеси из анаэробной зоны, содержащей органические соединения, позволяет проводить максимально глубоко процесс денитрификации. В результате в потоке возвратного активного ила, поступающего в анаэробную зону из денитрификатора ВАИ, концентрация нитратов практически равна нулю. Данное решение дает возможность эффективно и стабильно вести процессы биологического удаления фосфора наряду с высокой эффективностью процессов окисления органических соединений и азота.



Рис. 3.27. Схема процесса ISAH

Одной из наиболее распространенных в настоящее время схем, реализующих процессы биологического удаления фосфора и нитри-денитрификации, является **процесс UCT** (University of Cape Town) [100] (рис. 3.28).

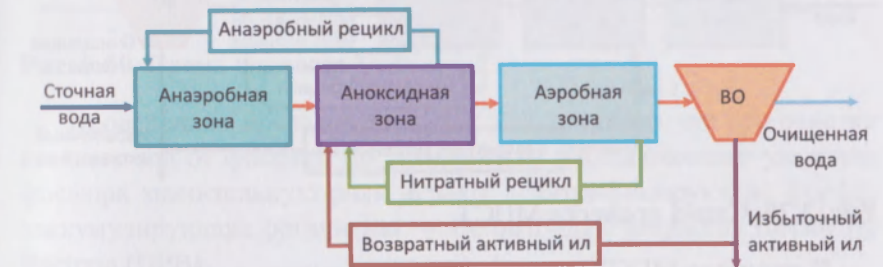


Рис. 3.28. Схема процесса UCT

При реализации процесса UCT сточная вода поступает в анаэробную зону, куда также подается рецикл иловой смеси из аноксидной зоны сооружения. Подача в анаэробную зону проденитрифицированной иловой смеси позволяет обеспечить минимальную, практически нулевую концентрацию нитратов в анаэробной зоне. В результате в анаэробной зоне создаются чисто анаэробные условия для стабильного и эффективного ведения процесса биологического удаления фосфора. Возвратный ил, содержащий нитраты, поступает в аноксидную зону сооружения вместе с нитратным рециклом.

*Процесс UCT применим не только для средне- и высококонцентрированных по органическим соединениям сточных вод, но и для низкоконцентрированных сточных вод, какими, в большинстве своем, являются сточные воды городов России.*

Реализация данной схемы позволяет достигать качество очищенных вод, характеризующееся концентрацией:  $P-PO_4$  — 0,2 мг/л и менее,  $N-NH_4$  — менее 0,4 мг/л,  $N-NO_2$  — 0,02 мг/л,  $N-NO_3$  — менее 9,0 мг/л, даже на сточных водах городов РФ [101, 102, 103, 61].

Модификация UCT процесса МУСТ (рис. 3.29) была предложена GvR. Marais из Кейптаунского университета (University of Cape Town) [142].

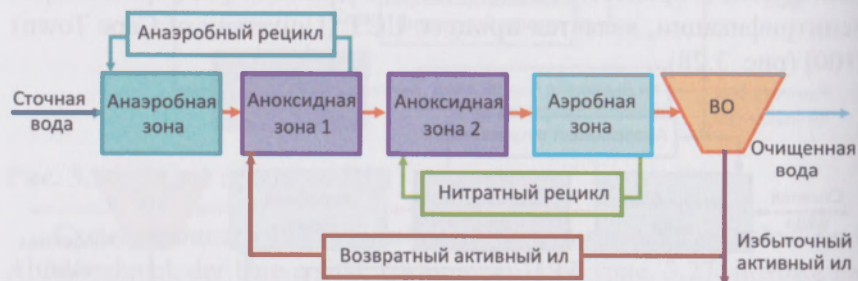


Рис. 3.29. Схема процесса МУСТ

В процессе МУСТ введена дополнительная аноксидная зона по сравнению с UCT-процессом. В аноксидную зону 1, следующую за анаэробной зоной, поступает возвратный активный ил, содержащий нитраты. Проденитрифицированный в аноксидной зоне 1 возвратный активный ил, практически не содержащий нитратов, подается в анаэробную зону, где смешивается с поступающей сточной водой. В аноксидной зоне 2 проходит процесс денитрификации, в котором используются нитраты, поступающие с нитратным рециклом из аэробной зоны. Процесс МУСТ позволяет достичь еще более высокой эффективности биологического удаления фосфора за счет того, что в аноксидной зоне 1 происходит денитрификация только возвратного активного ила на субстрате сточной воды, поступающей после анаэ-

робной зоны. Это позволяет снизить практически до нуля концентрацию нитратов в конце аноксидной зоны 1 и подавать в анаэробную зону иловую смесь, не содержащую нитратов.

Процесс VIP (Virginia Initiative Plant) [94] (рис. 3.30) похож на UCT-процесс и отличается тем, что каждая зона разделена на несколько отсеков. Это позволяет обеспечить оптимальные условия реализации биохимических процессов из-за создания гидродинамических условий, близких к реакторам идеального вытеснения.

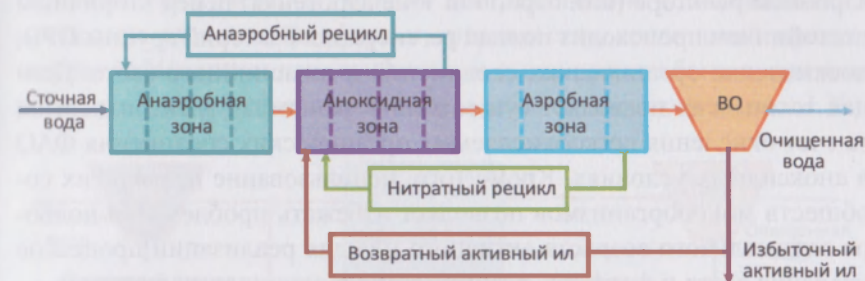


Рис. 3.30. Схема процесса VIP

Проведенные исследования [104, 105] показали, что при очистке сточных вод от фосфора по технологиям биологического удаления фосфора значительную роль играют денитрифицирующие фосфат-аккумулирующие организмы — Denitrifying Phosphorus Removing Bacteria (DPB).

Процесс DEPHANOX был разработан для оптимизации технологии удаления биогенных элементов из низкоконцентрированных по органическим соединениям сточных вод и основан на двухиловой схеме отдельного окисления аммонийного азота и органических соединений [106—108] (рис. 3.31).

Сточная вода подается в анаэробный реактор, в котором происходит высвобождение фосфатов из DPB-бактерий и сорбция основной массы органического вещества взвешенной биомассой активного ила. В последующем отстойнике 1-й ступени происходит разделение активного ила с сорбированным органическим субстратом и сточной воды, содержащей аммонийный азот. Далее сточная вода



Глава 3. Очистка сточных вод от соединений фосфора

подается в содержащий прикрепленную биомассу нитрифицирующих бактерий реактор с загрузкой, где аммонийный азот окисляется до нитратов. Активный ил (байпасный активный ил) с сорбированными органическими загрязнениями из отстойника 1-й ступени подается в аноксидный реактор (или аноксидную зону аэротенка), куда также поступает сточная вода из реактора с загрузкой, содержащая нитраты. На этом этапе происходит денитрификация, сопряженная с поглощением фосфатов ДРВ-бактериями. На стадии аэрации в аэробном реакторе (или аэробной зоне аэротенка) перед вторичным отстойником происходит полная регенерация бактерий группы ДРВ, доокисление органических соединений и аммонийного азота. Данная технология позволяет существенно экономить электроэнергию за счет окисления легкоокисляемых органических соединения ФАО в аноксидных условиях. Кроме того, использование нескольких сообществ микроорганизмов позволяет избежать проблем при подборе оптимального возраста активного ила для реализации процессов удаления азота и фосфора, возникающих в одноиловых системах.



Рис. 3.31. Схема процесса DEPHANOX: O1 — отстойник 1-й ступени; РЗ — реактор с загрузкой; БАИ — байпасный активный ил

Концепт ферментации первичных осадков для получения дополнительного количества ЛЖК позволяет повысить эффективность и стабильность работы сооружений, реализующих технологию биологического удаления фосфора. ЛЖК являются субстратом, который ФАО могут использовать непосредственно. Конверсия первичного осадка в ЛЖК и обеспечение легкоокисляемым субстратом потока, поступающего в анаэробную зону, позволяет создавать оптимальные условия для культивирования фосфатаккумулялирующих бактерий.

3.3. Схемы реализации биологического удаления фосфора и нитри-денитрификации

На рис. 3.32 приведена схема OWASA (Orange Water and Sewerage Authority) — процесса биологического удаления фосфора с ферментацией первичного осадка без реализации процессов нитри-денитрификации. Сточная вода после первичного отстойника поступает в аэробную зону аэротенка, в которую подается также иловая смесь из анаэробной зоны. Первичный осадок поступает в ферментер, откуда сливная вода, обогащенная ЛЖК, подается в анаэробную зону аэротенка. Данная схема позволяет стабильно удалять фосфор биологическим методом, однако для реализации дополнительно к процессам удаления фосфора и органических соединений процессов нитрификации и денитрификации схема должна быть дополнена реактором-денитрификатором возвратного активного ила (рис. 3.32).

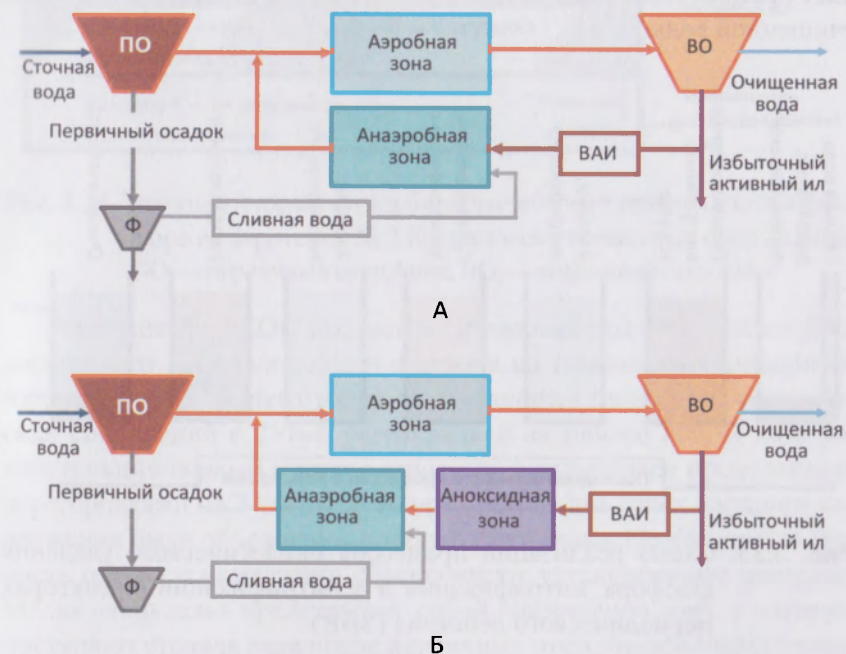
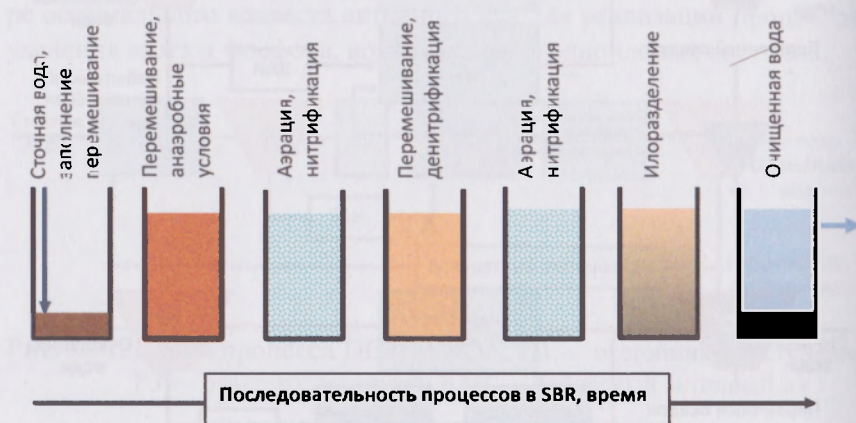


Рис. 3.32. Схема процесса OWASA: А — без нитри-денитрификации; Б — с нитри-денитрификацией: Ф — ферментер, БАИ — возвратный активный ил

На рис. 3.33 представлена схема реализации процессов нитрификации, денитрификации и биологического удаления фосфора в **реакторах периодического действия (SBR)**. Сточная вода поступает в реактор, на дне которого находится осевший активный ил. Включается перемешивание и происходит глубокая денитрификация активного ила, после чего реализуются анаэробные условия, по окончании которых включается аэрация и происходят процессы аэробного окисления органических соединений и частичная нитрификация. Затем аэрация выключается, включается перемешивающее устройство и идут процессы денитрификации, по окончании которых опять включается аэрация и происходят процессы глубокой нитрификации. После завершения фазы нитрификации аэрация отключается, и идет процесс осаждения активного ила и затем удаление из системы очищенной воды.

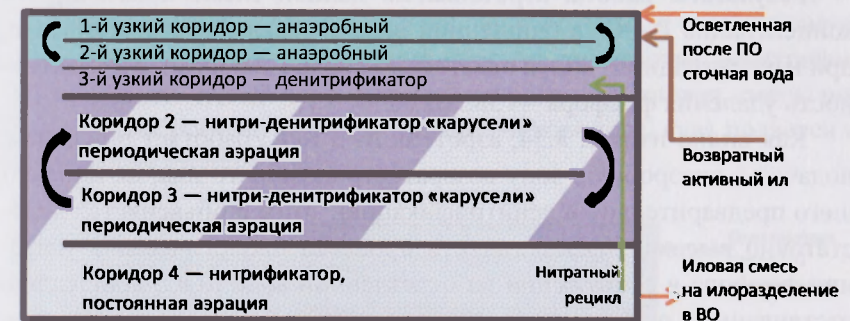


**Рис. 3.33.** Схема реализации процессов биологического удаления фосфора, нитрификации и денитрификации в реакторах периодического действия (SBR)

Рассмотренные выше схемы являются в большей степени базовыми технологическими решениями, однако конструктивная их реализация отличается достаточным разнообразием и разрабатывается

и в зависимости от конкретных условий и задач. На рис. (3.34—3.36) приведены схемы аэротенков Курьяновских и Люберецких очистных сооружений, реконструированных под технологии биологического удаления азота и фосфора.

На рис. 3.34 представлена схема реализации технологии биологического удаления азота и фосфора на аэротенке № 3 Курьяновских очистных сооружений (КОС) [109, 101].



**Рис. 3.34.** Технологическая схема биологического удаления азота и фосфора на аэротенке № 3 Курьяновских очистных сооружений: ПО — первичный отстойник, ВО — вторичный отстойник

Аэротенк № 3 КОС был реконструирован под технологию биологического удаления азота и фосфора из типового 4-коридорного аэротенка, работавшего ранее по технологии окисления органических соединений с 25%-й регенерацией активного ила. В ходе реконструкции первый коридор аэротенка был разделен продольными перегородками на 3 узких коридора, первые два узких коридора сооружения были объединены в малую «карусель». Необходимую скорость потока в «карусели» обеспечивают установленные мешалки. Малая «карусель» представляет собой анаэробную зону, в которую поступают сточная вода после первичных отстойников (осветленная вода) и возвратный активный ил. Нитратный рецикл направляется в третий узкий коридор, который в данной схеме является денитрификатором. Большая «карусельная зона» образована из коридоров

2-го и 3-го аэротенков и работает в условиях пульсирующей аэрации. Процесс нитрификации в «карусели» происходит в периоды аэрации, а денитрификация — в периоды отсутствия аэрации. Для обеспечения необходимых скоростей в большой «карусели» в каждый коридор аэротенка были установлены по две мешалки горизонтального потока. Третья зона аэротенка (4-й коридор аэротенка) работает с постоянной аэрацией и является нитрификатором.

Результаты работы аэротенка по данной схеме показали, что концентрация  $P-PO_4$  в очищенной воде составляла 0,48...1,28 мг/л, при концентрации  $P-PO_4$  в осветленной воде 1,2...3,4 мг/л эффективность удаления фосфора — 58...63 %.

Как видно из рис. 3.34, аэротенк № 3 КОС работает по схеме с подачей в анаэробную зону возвратного активного ила, не прошедшего предварительную денитрификацию. Этим и объясняется недостаточно высокая эффективность процесса биологического удаления фосфора в сооружении на осветленной воде КОС, прошедшей отстаивание в первичных отстойниках. Опыт эксплуатации показал, что для организации процесса биологического удаления фосфора по схеме, заложенной в аэротенке № 3 КОС, необходимо более высокое, чем в осветленной сточной воде КОС (сточной воде после первичных отстойников), содержание органических соединений, и что данная проблема может быть решена при использовании неосветленной сточной воды (неосветленная сточная вода — сточная вода, не прошедшая отстаивание в первичных отстойниках). При подаче в аэротенк № 3 КОС неосветленной сточной воды эффективность удаления фосфора достигла 92...97 %, концентрация  $P-PO_4$  в очищенной воде составляла 0,1...0,45 мг/л при среднем значении 0,2 мг/л, что соответствует значениям ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения.

Схема реализации технологии биологического удаления азота и фосфора на аэротенке № 15 Люберецких очистных сооружений (ЛОС) при реконструкции типового 4-коридорного аэротенка представлена на рис. 3.35 [109, 101]. Первый коридор аэротенка представляет собой анаэробную зону, второй и третий коридоры аэро-

тенки были реконструированы в «карусель», состоящую из анаэробной (2-й коридор аэротенка) и аэробной (3-й коридор аэротенка) зон. Четвертый коридор аэротенка (2-я аэробная зона) представляет собой нитрификатор с постоянной подачей воздуха. Нитратный рецикл обеспечивает подачу иловой смеси из аэробной зоны 2 в «карусель» аэротенка.

Данная схема позволила уйти от проблемы подачи возвратного активного ила, содержащего нитраты, в анаэробную зону. Возвратный активный ил подается не в голову аэротенка, а в анаэробную часть «карусельной» зоны сооружения, где происходит денитрификация иловой смеси. Проденитрифицированная иловая смесь подается в анаэробную зону аэротенка (1-й коридор), куда подается и осветленная сточная вода.

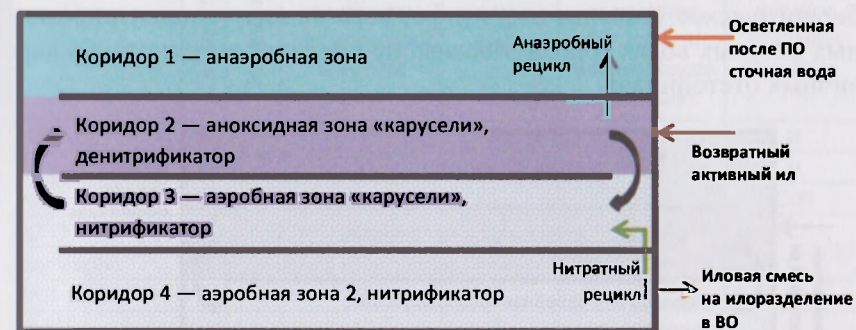


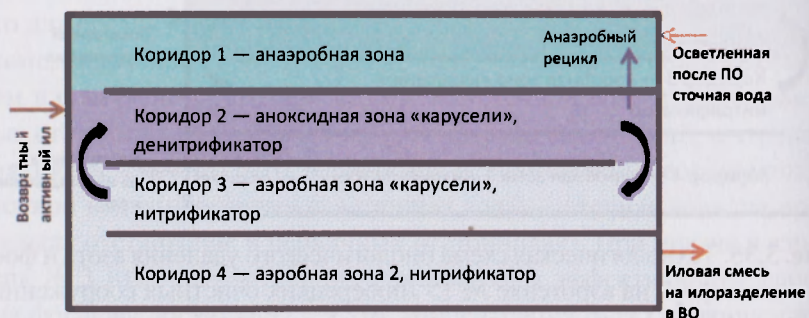
Рис. 3.35. Технологическая схема биологического удаления азота и фосфора на аэротенке № 15 Люберецких очистных сооружений: ПО — первичный отстойник, ВО — вторичный отстойник

Результаты работы аэротенка № 15 ЛОС позволяют говорить о стабильной работе данной схемы на осветленной воде низкоконтрированных стоков города Москвы. Среднее качество очищенной воды аэротенка № 15 ЛОС:

$$\begin{aligned} N-NH_4 &= 0,3 \text{ мг/л,} \\ N-NO_3 &= 7,4 \text{ мг/л,} \\ P-PO_4 &= 0,1 \text{ мг/л.} \end{aligned}$$

На рис. 3.36 представлена схема реализации процессов биологического удаления азота и фосфора на новом блоке Удаления биогенных элементов (УБЭ) ЛОС производительностью 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут, запущенного в эксплуатацию в 2006 г. [103].

В анаэробных зонах аэротенков блока УБЭ созданы глубоко анаэробные условия. Во втором и третьем коридорах аэротенков организовано круговое движение иловой смеси по принципу «карусели». При этом второй коридор (неаэрируемый) является денитрификатором (аноксидная зона), из которого иловая смесь поступает в третий коридор-нитрификатор (аэробная зона). Возвратный активный ил подается в начало 2-го коридора. Четвертый коридор является аэробной зоной, где реализуются процессы нитрификации и окисления органических соединений, в том числе фосфатаккумулирующими организмами. Данные сооружения позволяют стабильно обеспечить биологическое удаление азота и фосфора на низкоконцентрированных сточных водах города Москвы, прошедших отстаивание в первичных отстойниках.



**Рис. 3.36.** Технологическая схема биологического удаления азота и фосфора на блоке УБЭ: ПО — первичный отстойник, ВО — вторичный отстойник

Опыт эксплуатации сооружений, работающих по технологиям биологического удаления азота и фосфора, показывает, что выбор схем и их конструктивных решений, а также выбор режима эксплуатации зависит от конкретных условий и требует проведения широкого круга теоретических и экспериментальных исследований.

#### 3.4. Эксплуатация сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации и удаления фосфора. Проблемы и решения

Подход к эксплуатации сооружений удаления азота и фосфора из сточных вод зависит, в первую очередь, от технологической схемы, которая реализована на тех или иных очистных сооружениях. В табл. 3.13 представлены основные технологические параметры работы сооружений, запроектированных по различным схемам.

**Таблица 3.13.** Технологические характеристики сооружений удаления биогенных элементов, работающих по различным технологическим схемам

| Схема                          | Сложность схемы | Нитрификация | Чувствительность к колебаниям поступающей нагрузки | Степень удаления азота | Зависимость удаления фосфора от наличия нитратов и/или кислорода в рециклах | Потенциал биологического удаления фосфора |
|--------------------------------|-----------------|--------------|--|------------------------|---|---|
| PhoStrip                       | Н               | —            | Н  | Н                      | Н   | В   |
| Renphosystem                   | В               | +            | Н  | В                      | С   | В   |
| Λ/O                            | Н               | -/+          | В  | Н/С                    | В   | С/Н                                       |
| Λ2/O                           | С               | +            | В  | С                      | В   | С   |
| Bardenpho                      | В               | +            | В  | В                      | В   | С   |
| ЛНВ                            | В               | +            | В  | В                      | В   | С   |
| ISAN                           | В               | +            | С  | В                      | С   | В   |
| UCT                            | В               | +            | В  | В                      | В   | В   |
| MUCT                           | В               | +            | С  | В                      | С   | В   |
| VIP                            | В               | +            | С  | В                      | В   | В   |
| DEPHANOX                       | В               | +            | В  | В                      | В   | С   |
| OWASA без нитри-денитрификации | С               | —            | С  | Н                      | Н   | В   |
| OWASA с нитри-денитрификацией  | В               | +            | В  | С                      | С   | С   |
| SBR                            | Н               | +            | Н  | В                      | В   | С   |

Н — низкая, С — средняя, В — высокая; + — присутствует, — — отсутствует.

Преимущества и ограничения основных технологических схем реализации процессов — как только удаления фосфора, так и удаления фосфора совместно с нитри-денитрификацией — представлены в табл. 3.14.

**Таблица 3.14.** Преимущества и ограничения схем удаления фосфора из сточных вод

| Преимущества   | Ограничения   |
|--|---|
| <b>PhoStrip</b>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Легко встраивается в существующие классические сооружения;</li> <li>- процесс достаточно гибкий в управлении;</li> <li>- высокая эффективность удаления фосфора;</li> <li>- возможно низкое отношение БПК<sub>полн</sub> к фосфору в поступающих сточных водах;</li> <li>- количество реагента для преципитации существенно меньше, чем в классических схемах химического удаления фосфора;</li> <li>- стабильно обеспечивает качество очищенной воды по ортофосфатам: концентрация менее 1,0 мг/л</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Требуются дополнительные эксплуатационные затраты в результате использования реагентов по сравнению со схемами чисто биологического удаления фосфора;</li> <li>- увеличение капитальных затрат по сравнению со схемами чисто биологического или химического удаления фосфора, т. к.:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- требуется строительство дополнительного реактора-стриппера;</li> <li>- неточность расчета дозы извести может приводить к проблемам эксплуатации</li> </ul> </li> </ul> |
| <b>Renphosystem</b>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Высокая эффективность удаления азота и фосфора;</li> <li>- возможно низкое отношение БПК<sub>полн</sub> к фосфору в поступающих сточных водах;</li> <li>- количество реагента для преципитации существенно меньше, чем в классических схемах химического удаления фосфора;</li> <li>- стабильно обеспечивает качество очищенной воды по ортофосфатам: концентрация менее 1,0 мг/л</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Увеличение капитальных затрат по сравнению с процессами чисто биологического или химического удаления фосфора. т. к. требуется строительство дополнительных реакторов;</li> <li>- эксплуатационные затраты выше, чем в технологиях чисто биологического удаления азота и фосфора</li> </ul>  |
| <b>A/O</b>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Эксплуатация значительно проще по сравнению с другими процессами;</li> <li>- низкое время пребывания сточной воды (HRT);</li> <li>- активный ил с хорошими седиментационными свойствами;</li> <li>- достаточно высокая эффективность удаления фосфора при отсутствии процесса нитрификации</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Низкая эффективность удаления фосфора в присутствии процесса нитрификации;</li> <li>- рекомендуется ограничить процесс нитрификации;</li> <li>- ограничена возможность технологического управления процессами</li> </ul>   |

**Продолжение табл. 3.14**

| Преимущества   | Ограничения   |
|--|---|
| <b>A2/O</b>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Возможность удаления как фосфора, так и азота;</li> <li>- эксплуатация достаточно проста;</li> <li>- активный ил с хорошими седиментационными свойствами;</li> <li>- относительно невысокие энергозатраты за счет окисления основной части органических соединений в ходе процесса денитрификации и наличия только двух рециклов</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- В анаэробную зону поступает активный ил, не прошедший денитрификацию, т. е. содержащий нитраты, что снижает эффективность биологического удаления фосфора;</li> <li>- эффективность процесса денитрификации лимитирована расходом нитратного рецикла;</li> <li>- требование к количеству легко окисляемых органических соединений (БПК<sub>полн</sub> на 1 мг удаляемого фосфора) более жесткое, чем для процесса A/O</li> </ul> |
| <b>Bardenpho</b>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Возможность удаления как фосфора, так и азота;</li> <li>- дает возможность достигать концентрации общего азота (TN) до 2,0...5,0 мг/л в очищенной воде;</li> <li>- активный ил с хорошими седиментационными свойствами</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- В анаэробную зону поступает активный ил, не прошедший денитрификацию, т. е. содержащий нитраты, что снижает эффективность биологического удаления фосфора;</li> <li>- требуемые объемы сооружений больше, чем для A2/O-процесса</li> </ul>   |
| <b>JNB</b>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- В анаэробную зону поступает частично проденитрифицированный активный ил, что позволяет добиться большей эффективности биологического удаления фосфора по сравнению с процессами A2/O и Bardenpho;</li> <li>- высокая эффективность удаления азота;</li> <li>- активный ил с хорошими седиментационными свойствами;</li> <li>- наличие только двух рециклов</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Эффективность биологического удаления фосфора средняя;</li> <li>- требуется дополнительный объем для денитрификации возвратного активного ила (скорости денитрификации активного ила без дополнительного источника углерода, как внешнего, так и сточной воды, достаточно низкие)</li> </ul>   |
| <b>ISAN</b>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- В анаэробную зону поступает полностью проденитрифицированный активный ил, что позволяет добиться большей эффективности биологического удаления фосфора по сравнению с процессом JNB;</li> <li>- высокая эффективность удаления азота;</li> <li>- невысокая зависимость от эффективности процесса денитрификации в аэротенках;</li> <li>- активный ил с хорошими седиментационными свойствами;</li> <li>- высокие скорости денитрификации возвратного активного ила на субстрате сточной воды, поступающей с активным илом из анаэробной зоны</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Требуется дополнительный объем для денитрификации возвратного активного ила</li> </ul>   |

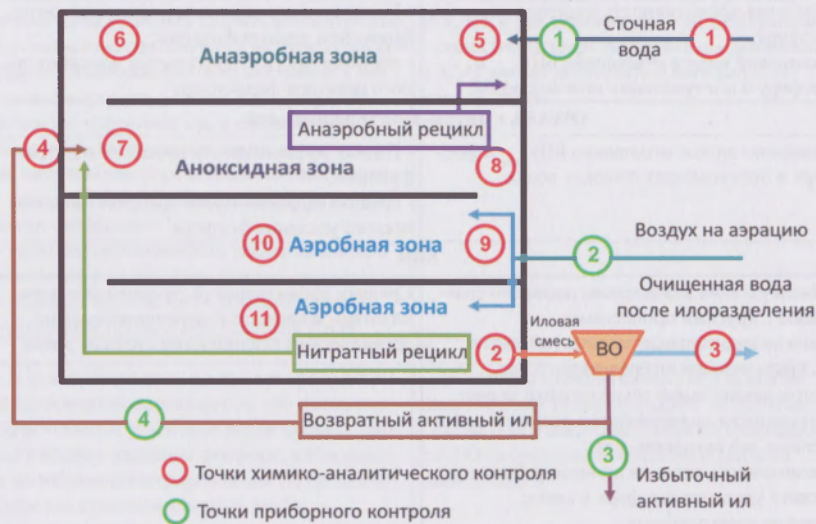
Продолжение табл. 3.14

| Преимущества   | Ограничения  |
|--|--|
| <b>УСТ</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- В анаэробную зону поступает проденитрифицированная иловая смесь, что позволяет эффективно и стабильно вести процесс биологического удаления фосфора, в том числе и на низкоконцентрированных по органическим соединениям сточных водах;</li> <li>- активный ил с хорошими седиментационными свойствами;</li> <li>- высокая эффективность удаления азота, в том числе и азота нитритов;</li> <li>- большие возможности технологического управления процессами удаления P и N</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Достаточно сложная схема как в исполнении, так и для технологической эксплуатации;</li> <li>- схема более энергозатратная по сравнению с A2/O за счет дополнительного рецикла иловой смеси</li> </ul> |
| <b>МУСТ</b>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Отдельный денитрификатор возвратного активного ила позволяет снизить концентрацию нитратов в нем практически до нуля перед его подачей в анаэробную зону, обеспечив в ней чисто анаэробные условия и как результат — высокую эффективность и стабильность биологического удаления азота, в том числе на низкоконцентрированных сточных водах;</li> <li>- активный ил с хорошими седиментационными свойствами;</li> <li>- высокая эффективность удаления азота, в том числе и азота нитритов;</li> <li>- большие возможности технологического управления процессами удаления P и N</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Достаточно сложная схема как в исполнении, так и для технологической эксплуатации;</li> <li>- схема более энергозатратная по сравнению с A2/O за счет дополнительного рецикла иловой смеси</li> </ul> |
| <b>VIP</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- В анаэробную зону поступает проденитрифицированная иловая смесь, что позволяет эффективно и стабильно вести процесс биологического удаления фосфора, в том числе и на низкоконцентрированных по органическим соединениям сточных водах;</li> <li>- секционирование зон позволяет создавать наиболее оптимальные условия реализации процессов удаления фосфора, нитрификации и денитрификации;</li> <li>- за счет создания оптимальных условий реализации биохимических процессов требуемое количество легкоокисляемых органических соединений (БПК<sub>полн</sub> на 1 мг удаляемого фосфора) меньше, чем для процессов УСТ и МУСТ</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Достаточно сложная схема как в исполнении, так и для технологической эксплуатации;</li> <li>- схема более энергозатратная по сравнению с A2/O за счет дополнительного рецикла иловой смеси</li> </ul> |

Окончание табл. 3.14

| Преимущества  | Ограничения   |
|---|---|
| <b>DEPHANOX</b>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Относительно низкие энергозатраты за счет окисления основной части органических соединений в ходе процесса денитрификации;</li> <li>- наличие только двух рециклов;</li> <li>- использование двухиловой схемы позволяет избежать проблемы выбора оптимального значения возраста активного как для процессов нитрификации, так и для процессов биологического удаления фосфора;</li> <li>- высокая эффективность и стабильность процесса нитрификации</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Нестабильность эффективности удаления фосфора в условиях колебаний поступающей нагрузки;</li> <li>- в анаэробную зону поступает активный ил, не прошедший денитрификацию, т. е. содержащий нитраты, что снижает эффективность биологического удаления фосфора;</li> <li>- сложность технологической эксплуатации;</li> <li>- повышенные капитальные затраты на строительство дополнительного отстойника</li> </ul> |
| <b>OWASA без нитри-денитрификации</b>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Высокая эффективность удаления фосфора;</li> <li>- возможно низкое отношение БПК<sub>полн</sub> к фосфору в поступающих сточных водах</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Не позволяет реализовать процессы нитрификации и денитрификации;</li> <li>- необходимость строительства дополнительного реактора-ферментера</li> </ul>   |
| <b>OWASA с нитри-денитрификацией</b>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Возможно низкое отношение БПК<sub>полн</sub> к фосфору в поступающих сточных водах</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Низкая эффективность процесса денитрификации;</li> <li>- средняя эффективность процесса биологического удаления фосфора</li> </ul>   |
| <b>SBR</b>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Эксплуатация значительно проще по сравнению с другими процессами;</li> <li>- низкие капитальные затраты (объемы в 2...3 раза меньше по сравнению с рассмотренными выше технологиями за счет возможности поддержания в реакторе повышенных доз активного ила);</li> <li>- возможность ведения процессов биологического удаления фосфора и азота;</li> <li>- низкие энергозатраты;</li> <li>- отсутствие явления выноса активного ила при залповом увеличении гидравлической нагрузки;</li> <li>- процессы илоразделения осуществляются в статическом состоянии, что позволяет достигать высокого качества очищенной воды по взвешенным веществам;</li> <li>- большая гибкость в технологическом управлении процессами удаления P и N</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Средняя эффективность удаления фосфора на низко- и среднеконцентрированных по органическим соединениям сточных водах</li> </ul>  |

Для эффективной эксплуатации сооружений очистки сточных вод от фосфора и азота требуется оперативный контроль качественных и количественных показателей поступающей на биологическую очистку сточной воды, качественных параметров очищенной воды и грамотный расчет технологических характеристик процессов. Фактические значения контролируемых качественных показателей работы сооружений определяются на основании анализа среднесуточных проб сточных вод и сведений по учету и контролю основных технологических параметров, получаемых с помощью приборов. Отбор проб проводится по карте точек отбора проб лабораторного контроля и точек размещения приборов контроля технологических параметров (рис. 3.37).



**Рис. 3.37.** Карта контроля сооружений биологической очистки сточных вод от азота и фосфора (см. табл. 3.15—3.17, 3.19)

В табл. 3.15—3.17 приведены основные показатели поступающих сточных вод, очищенных вод и технологические параметры работы сооружений биологической очистки, реализующих технологии удаления азота и фосфора. В таблицах приведены качественные

показатели, которые рекомендуется контролировать для городских сточных вод, поступающих на очистные сооружения. Для очистных сооружений, принимающих производственные сточные воды или смесь городских и производственных сточных вод, список контролируемых параметров следует дополнить специфическими веществами, которые присущи конкретным сточным водам и оказывают ингибирующее действие на биохимические процессы (см. гл. 2).

**Таблица 3.15.** График контроля количественных характеристик потоков сооружений биологической очистки сточных вод от азота и фосфора

| Точка на карте контроля | Измеряемые технологические параметры                          | Периодичность определения параметров | Примечание  |
|-------------------------|---|--------------------------------------|---|
| 1                       | Расход поступающей сточной воды, м <sup>3</sup> /сут          | Онлайн                               | Данные приборов контроля на единицу работающего сооружения  |
| 2                       | Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч                             | Онлайн или ежедневно                 |   |
| 3                       | Расход избыточного активного ила, м <sup>3</sup> /сут         | Ежедневно                            | Определяется суммарный расход на сооружения биологической очистки, работающие с общим илом                        |
| 4                       | Расход возвратного активного ила, м <sup>3</sup> /сут         | Онлайн или ежедневно                 | Данные приборов контроля на единицу работающего сооружения или с технических характеристик насосного оборудования |
| 1                       | Среднесуточный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут        | Ежедневно                            | Расчетное значение по данным приборов контроля на единицу работающего сооружения                                  |
| 1                       | Максимальный часовой расход сточных вод, м <sup>3</sup> /ч    |                                      |   |
| 1                       | Максимальный суточный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут |                                      |   |
| 1                       | Максимальный месячный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут | 1 раз в квартал                      |   |

**Таблица 3.16.** Рекомендуемый график аналитического контроля качественных характеристик потоков сооружений биологической очистки сточных вод от азота и фосфора

| Точка на карте контроля | Качественные характеристики   | Периодичность определения параметров*    |
|-------------------------|---|--|
| ①                       | Взвешенные вещества, БПК <sub>5</sub> , ХПК, N-NH <sub>4</sub> , P-PO <sub>4</sub> , P <sub>общ</sub> , TKN, pH и щелочность в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, — в распределительном канале сточной воды, поступающей в аэротенки | 2 раза в неделю                          |
| ①                       | БПК <sub>полн</sub> в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, — в распределительном канале сточной воды, поступающей в аэротенки  | 1 раз в месяц                            |
| ①                       | Вещества, указанные в обязательном графике аналитического контроля очистных сооружений  | Согласно графику аналитического контроля |
| ②                       | БПК <sub>5</sub> в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из каждого аэротенка  | 1 раз в неделю                           |
| ③                       | N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N-NO <sub>3</sub> , P-PO <sub>4</sub> , ХПК, P <sub>общ</sub> в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из каждого аэротенка   | 1 раз в неделю                           |
| ③                       | БПК <sub>5</sub> в очищенной сточной воде   | 2 раза в неделю                          |
| ③                       | БПК <sub>полн</sub> в очищенной сточной воде  | 1 раз в месяц                            |
| ③                       | Взвешенные вещества, N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>2</sub> , N-NO <sub>3</sub> , P-PO <sub>4</sub> , ХПК, P <sub>общ</sub> в очищенной сточной воде   | 2 раза в неделю                          |
| ③                       | Вещества, указанные в обязательном графике аналитического контроля очистных сооружений  | Согласно графику аналитического контроля |
| ④                       | N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>3</sub> , N-NO <sub>2</sub> , P <sub>общ</sub> , P-PO <sub>4</sub> в фильтрованной пробе возвратного активного ила  | 2 раза в неделю                          |

\* Рекомендуемая периодичность.

**Таблица 3.17.** Рекомендуемый график контроля эффективности процессов биологической очистки сточных вод от азота и фосфора

| Точка на карте контроля | Профили качественных параметров   | Периодичность определения параметров*                               | Примечание  |
|-------------------------|---|---|---|
| ③ ③<br>⑦ ③<br>③         | N-NH <sub>4</sub> , N-NO <sub>3</sub> , N-NO <sub>2</sub> , P-PO <sub>4</sub> ** в фильтрованной пробе иловой смеси | 1 раз в декаду; дополнительно — при нештатных и аварийных ситуациях | Для оценки эффективности ведения биохимических процессов  |
| ③ ⑦<br>③ ⑩<br>⑪ ②       | Концентрация растворенного кислорода  | 1 раз в декаду; дополнительно — при нештатных и аварийных ситуациях | Для оценки эффективности ведения биохимических процессов. Определяется переносным или стационарным анализатором концентрации растворенного кислорода*** |

\* Рекомендуемая периодичность.

\*\* Анализ по P-PO<sub>4</sub> в указанных точках (5, 6, 7, 8, 2) выполняется только при реализации в аэротенках технологии биологического или биолого-химического метода удаления фосфора. При реализации технологии химического удаления фосфора P-PO<sub>4</sub> определяется только в точках 5 и 2.

\*\*\* Категорически не рекомендуется для контроля работы сооружений использование метода определения концентрации растворенного кислорода по Винклеру [110].

Технологическая оценка работы сооружений биологической очистки сточных вод от азота и фосфора включает определение:

- 1) общего возраста активного ила;
- 2) аэробного возраста активного ила;
- 3) гидравлического времени пребывания сточной воды в аэротенке;
- 4) нагрузки на активный ил по органическим соединениям;
- 5) расходов внутренних рециклов;
- 6) анализ работы вторичных отстойников.



*Корректно запроектированные очистные сооружения должны обеспечивать проектное качество очищенной воды при работе в штатном режиме. Штатный режим представляет собой условия работы системы с отклонениями в допустимых пределах; параметры эксплуатации при этом не выходят за границы расчетных характеристик.*

Для оперативного анализа работы сооружений биологической очистки необходимо проводить постоянный контроль и мониторинг текущих качественных и количественных показателей сточных вод, поступающих на биологическую очистку (табл. 3.19), а также параметров технологической оценки (табл. 3.18) в сравнении с регламентными значениями.

Несоответствие текущих качественных и количественных показателей сточной воды, поступающей на биологическую очистку, проектным значениям не позволяет эксплуатировать сооружение в штатном режиме, что требует специальных мер по снижению негативных последствий нештатной работы сооружений.

Возможные последствия несоответствия проектных и текущих качественных и количественных параметров поступающих на биологическую очистку сточных вод приведены в табл. 3.20. В этой же таблице приведены меры по обеспечению максимально возможной эффективности работы сооружений в реальной нештатной ситуации.

Как показывает табл. 3.20, входные характеристики сточных вод, поступающих на очистные сооружения, являются одним из определяющих факторов достижения проектного качества очищенной воды. Первичные отстойники позволяют корректировать в некотором диапазоне качество воды, поступающей на биологическую очистку, при кратковременном и/или незначительном несоответствии качественных и количественных параметров сточной воды данным, заложенным в проект. При длительном и/или существенном несоответствии входных характеристик поступающих сточных вод проектным значениям необходимо ставить вопрос о дополнительном внедрении на очистных сооружениях систем контроля и дозирования реагентов, строительстве дополнительных объемов сооружений и/или модернизации существующих.

**Таблица 3.18.** Показатели контроля технологических параметров работы сооружений очистки сточных вод от азота и фосфора

| Параметр  | Определение   | Рекомендуемое значение  |
|---|---|---|
| Возраст активного ила (общий возраст активного ила), сут  | Отношение количества активного ила, находящегося в системе, к количеству отводимого из системы избыточного активного ила в сутки                                      | - Не менее регламентного (проектного) значения для текущей температуры сточных вод;<br>- не более 25...30 сут для процессов нитри-денитрификации и биологического удаления фосфора;<br>- не менее регламентного (проектного) значения для текущей температуры иловой смеси;<br>- не более 35...40 сут для процессов нитри-денитрификации и химического удаления фосфора |
| Аэробный возраст активного ила, сут   | Отношение количества активного ила, находящегося в аэробных зонах системы, к количеству отводимого из системы избыточного активного ила в сутки                       | Не менее регламентного (проектного) значения для текущей температуры сточных вод  |
| Нагрузка на активный ил по органическим соединениям (по БПК <sub>полн</sub> , БПК <sub>5</sub> , ХПК), кг БПК/(кг БВАИ сут), кг ХПК/(кг БВАИ сут) | Масса органических веществ, выраженная через БПК <sub>полн</sub> или БПК <sub>5</sub> , или ХПК, приходящаяся на один килограмм сухого вещества активного ила в сутки | - Не более 115 % и не менее 85 % от проектного значения для технологий удаления азота и химического удаления фосфора;<br>- не более 115 % и не менее проектного значения для технологий удаления азота и биологического удаления фосфора  |
| Гидравлическое время нахождения сточной воды в сооружении (или в одной из зон сооружения), ч  | Отношение объема сооружения (или одной из зон сооружения) к среднечасовому расходу сточной воды за рассматриваемые сутки  | Не менее проектного значения для максимального суточного расхода сточной воды   |

Таблица 3.19. Показатели контроля и мониторинга сточных вод, поступающих на сооружения очистки от азота и фосфора

| Точка на карте: контроля | Наименование показателя   | Регламентное значение эксплуатационных параметров                           | Текущие параметры   | Примечание  |
|--------------------------|---|---|---|---|
| 1                        | Среднесуточный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут**          | Не более проектного значения и не менее 80 % от проектного значения         | Расчетное значение по данным приборного контроля на единицу работющего сооружения | Среднее суточное значение расхода за прошлый месяц в первые 3 дня следующего месяца |
| 1                        | Максимальный суточный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут***  | Не более проектного значения и не менее 80 % от среднего суточного значения |   |   |
| 1                        | Максимальный месячный расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут**** | ±10 % от проектного значения  |   |   |
| 1                        | Значение БПК <sub>5</sub>   | —   | Текущие данные лаборатории  | —   |
| 1                        | Значение БПК <sub>полн</sub>                                      |   |   |   |
|                          | БПК <sub>полн</sub> /БПК <sub>5</sub>                             | —   | Рассчитывается по данным лабораторного контроля                                   | —   |

|   |   |   |   |                                  |
|---|---|---|---|----------------------------------|
| 1 | Значение ХПК  | ±15 % от проектного значения  | Текущие данные лаборатории                      | —                                |
| 1 | Концентрация взвешенных веществ, мг/л                           | Не более проектного значения  |   |                                  |
| 1 | Концентрация аммонийного азота (N-NH <sub>4</sub> ), мг/л       | Не более проектного значения  | Текущие данные лаборатории                      | —                                |
| 1 | Концентрация азота нитратов (N-NO <sub>3</sub> ), мг/л          |   |   |                                  |
| 1 | Концентрация азота нитритов (N-NO <sub>2</sub> ), мг/л          |   |   |                                  |
| 1 | Общий азот по Кьельдалю (TKN), мг/л                             | Не более 20 и не менее 4,5...5,0 для технологической денитрификации и химического удаления фосфора; не более 20 и не менее 5,5...6,0 для технологической денитрификации и биологического удаления фосфора | Рассчитывается по данным лабораторного контроля | —                                |
|   | Отношение БПК <sub>полн</sub> к общему азоту по Кьельдалю (TKN) |   |   |                                  |
|   |   |   |   | Для производственных сточных вод |

Окончание табл. 3.19

| Точка на карте контроля | Наименование показателя                                    | Регламентное значение*   | Текущие параметры  | Примечание  |
|-------------------------|--|--|--|---|
| 1                       | Фосфор фосфатов ( $P_2O_5$ ), мг/л                         | Не более проектного значения   | Текущие данные лаборатории                                   | Определяется согласно графику аналитического контроля 1 раз в месяц |
| 1                       | Общий фосфор $P_{\text{общ}}$ , мг/л                       | Не более 100 и не менее 20...25 для технологий нитрификации и биологического удаления фосфора по схемам V/F, M/CT, UCT;      | Рассчитывается по данным лабораторного контроля              | —   |
| 1 или 5                 | Отношение БПК <sub>полн</sub> к органическому фосфору (ТР) | не менее 40...45 для технологий нитри-денитрификации и биологического удаления фосфора по схемам ISAN, JNB, Bardenpho, A2/O; | Определяется согласно графику аналитического контроля онлайн | —   |
|                         | Температура, °C  | не более 100 для технологий нитрификации и химического удаления фосфора  |  |   |

|   |                                       |   |                            |  |
|---|---------------------------------------|---|----------------------------|--|
| 1 | Щелочность, мг-экв/л                  | Не менее проектного значения  |                            | Определяется согласно графику аналитического контроля  |
| 1 | pH                                    | 6,5...8,5   | Текущие данные лаборатории | —  |
| 1 | Специфические органические соединения | Не более проектного значения, концентрация не должна превышать порога ингибирования |                            | Определяется согласно графику аналитического контроля или при возникновении нештатных ситуаций |
| 1 | Металлы                               |   |                            |  |

\* Предлагаемые регламентные параметры эксплуатации сооружений могут быть откорректированы с учетом конкретного проекта очистных сооружений.

\*\* Среднесуточный расход сточных вод представляет собой отношение суммарного количества сточных вод, поступающих на очистные сооружения за рассматриваемый промежуток времени (как правило, за год), к количеству суток рассматриваемого периода, м<sup>3</sup>/сут.

\*\*\* Максимальный суточный расход сточных вод представляет собой количество сточных вод, поступающих на очистные сооружения в сутки максимально промываемый промежуток времени (как правило, за год), м<sup>3</sup>/сут.

\*\*\*\* Максимальный месячный расход сточных вод представляет собой отношение суммарного количества сточных вод, поступающих на очистные сооружения за месяц максимального притока в течение рассматриваемого промежутка времени (как правило, за год), к количеству суток в месяце максимального притока, м<sup>3</sup>/сут.

\*\*\*\*\* Месячный расход, м<sup>3</sup>/сут, определяется как отношение суммарного расхода сточных вод за месяц, м<sup>3</sup>/месяц, к количеству дней рассматриваемого месяца.

Таблица 3.20. Несоответствие проектных и текущих параметров поступающих на биологическую очистку сточных вод. Последствия и варианты устранения

| Возможные последствия   | Действия персонала   |
|---|--|
| <p><b>Повышение проектного значения расхода сточных вод на один из аэротенков или несколько аэротенков при соответствии текущего расхода, поступающего на очистные сооружения в целом, проектному значению</b></p> <p>Для процессов нитри-денитрификации и биологического удаления фосфора — снижены временные реализации процессов нитри-денитрификации и ферментации в анаэробной зоне сооружения по сравнению с проектными значениями, как следствие, превышение каустемными показателями очистной воды проектных значений (в первую очередь по соединениям азота и фосфора).</p> <p>Для процессов нитри-денитрификации и химического удаления фосфора — снижение временной реализации процессов нитри-денитрификации. При периоде превышения расходов более 10 сут — снижение значения аэробного возраста активного ила и, как следствие, превышение каустемными показателями очистной воды проектных (в первую очередь по аммонийному азоту и азоту нитритов).</p> <p>Снижение удельного расхода воздуха в сооружении и, как следствие, повышение концентраций аммонийного азота, азота нитритов и соединений фосфора в очищенной воде.</p> <p><b>Постоянное превышение проектного значения расхода сточных вод более чем на 10 % при соответствии каустемных значений</b></p> <p>Увеличение прироста активного ила и уменьшение значен- аэробного возраста активного ила, возможно увеличение в- носса взвешенных веществ из историче- стических осадков и, как следствие, превышение концентрации аммонийного азота, азота нитритов и взвешенных веществ в очищенной воде.</p> | <p>Перераспределение подачи сточной воды равномерно по всем аэротенкам</p> |

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Постоянное превышение проектного значения расхода сточных вод более чем на 10 % при соответствии каустемных значений</b></p> <p>Уменьшение эффективности работы сооружений в сооружениях, снижение эффективности работы сооружений ила и, соответ- ственно, увеличение прироста активного ила и, соответ- ственно, уменьшение удельного расхода воздуха в сооружении и, как следствие, повышение каустемными показателями очистной воды проектных, в первую очередь по аммонийно- му азоту и азоту нитритов</p> <p><b>Уменьшение расхода сточных вод, поступающих на очистные сооружения более чем на 20 % по сравнению с проектными значениями при соответствии каустемных значений</b></p> <p>Снижение эффективности процесса денитрификации, как следствие — превышение концентрации азота нитратов в очищенной воде — увеличение концентрации соединений фосфора в очищенной воде из-за увеличения концентрации нитратов, поступающих в анаэробную зону с рециклом и ювой с меси из зоны денитри- фикации (при технологии биологического удаления азота и фосфора)</p> <p><b>Превышение проектных значений БПК<sub>5</sub> (БПК<sub>полн</sub>) при проектных расходах поступающей сточной воды</b></p> <p>Увеличение прироста активного ила, как следствие, уменьшение значения аэробного возраста активного ила, недоста- точность количества подаваемого воздуха и, как следствие, пр- вышение аммонийным азотом азотом нитритов и значени- ем БПК<sub>полн</sub> в очищенной воде проектных значений</p> | <p>При длительном снижении расхода:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вывести ил из аэротенков и вернуть его в отстойники (при необходимости), обеспечить полную гидравлическую нагрузку на единицу сооружения.</li> <li>При кратковременном снижении расхода: <ul style="list-style-type: none"> <li>- учесть уровень заложения осадка в первичных отстойниках;</li> <li>- снизить значение рецикла иловой смеси из зоны денитри- фикации (при технологии биологического удаления азота и фосфора) в анаэробную зону на 30 %</li> </ul> </li> </ul> <p>более чем на 10 % ХПК — более чем на 15 % поступающей сточной воды</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках;</li> <li>- провести технические мероприятия по мероприятиям по повышению эффективности работы сооружений механической очистки</li> <li>- увеличить удельную норму расхода воздуха и ходя из текущего значения БПК<sub>5</sub> (БПК<sub>полн</sub>) сточной воды, по- г- лую- щей биологическую очистку</li> </ul> |
|--|---|



Продолжение табл. 3.20

| Возможные последствия   | Действия персонала  |
|---|---|
| <p>Отношение <math>BPK_{\text{полн}}</math> к общему фосфору (ТР) менее 20 и биологического удаления фосфора по схемам VIP, MUST, UCT</p> <p>Недостаток органических соединений для реализации технологии биологического удаления фосфора, включение системы дозирования реагента для химической преципитации приводит к увеличению количества избыточного активного ила и снижению значения азобного возраста активного ила и, как следствие, увеличение концентрации соединений фосфора в очищенной воде;</p> <p>- при снижении текущего значения азобного возраста активного ила ниже проектного значения для данной температуры — увеличение концентраций аммонийного азота и азота нитритов в очищенной воде</p> | <p>Реконструировать 2 первичных отстойника в ферментеры;</p> <p>- снизить концентрацию растворенного кислорода в точке забора нитратного реагента в аэробной зоне (оставив подачу воздуха только на протемпивание иловой смеси);</p> <p>- снизить расход реагента иловой смеси из аноксидной зоны в аэробную на 30...50 %</p> <p>- реконструировать 1 или 2 вторичных отстойника в ферментеры;</p> <p>- ввести систему дозирования внешнего источника углерода в поступающую на очистку сточную воду или химического реагента для организации процесса протемпивания и тации перед первичными отстойниками (при наличии в схеме, после вторичных отстойников (при наличии сорбентной доочистки)). При дозировании реагента в поток возвратного активного ила необходимо ежемесячно определять значение азобного возраста активного ила, чтобы не сорвать процесс нитрификации</p> |
| <p>Отношение <math>BPK_{\text{полн}}</math> к общему фосфору (ТР) менее 15 и биологического удаления фосфора по схемам VIP, MUST, UCT</p> <p>Недостаток органических соединений для реализации технологии биологического удаления фосфора, включение системы дозирования реагента для химической преципитации приводит к увеличению количества избыточного активного ила и снижению значения азобного возраста активного ила и, как следствие, увеличение концентрации соединений фосфора в очищенной воде</p>  | <p>Ввести систему дозирования внешнего источника углерода в поступающую на очистку сточную воду или химического реагента для организации процесса преципитации перед первичным отстойником (при наличии в существующей схеме), после вторичных отстойников (при наличии сорбентной доочистки).</p>  |

|  |   |
|--|---|
| <p>- увеличение концентрации соединений фосфора в очищенной воде;</p> <p>- при снижении текущего значения азобного возраста активного ила ниже проектного значения для данной температуры — увеличение концентрации аммонийного азота и азота нитритов в очищенной воде</p>  | <p>При дозировании реагента в поток возвратного активного ила и избыточно избыточно определять значение азобного возраста активного ила, чтобы не сорвать процессы нитрификации</p>   |
| <p>Отношение <math>BPK_{\text{полн}}</math> к общему фосфору (ТР) менее 40...45 и биологического удаления фосфора по схемам ISAN, JNB, Vard, npho, A2/C</p> <p>Недостаточное количество органических соединений для стабильного достижения требуемого качества очищенной воды по фазам и, как следствие, нестабильное качество очищенной воды по фосфатам</p>  | <p>Увеличить уровень осадка в первичных отстойниках;</p> <p>- снизить концентрацию растворенного кислорода на выходе из аэробной зоны аэротенка, оставив расход воздуха, требуемый только на протемпивание;</p> <p>- снизить расход возвратного активного ила на 20...30 %</p>  |
| <p>Отношение <math>BPK_{\text{полн}}</math> к общему фосфору (ТР) менее 30 и биологического удаления фосфора по схемам ISAN, JNB, Vard, npho, A2/O</p> <p>Недостаток органических соединений для реализации технологии биологического удаления фосфора, включение системы дозирования реагента для химической преципитации приводит к увеличению количества избыточного активного ила и снижению значения азобного возраста активного ила и, как следствие, увеличение концентрации соединений фосфора в очищенной воде;</p> <p>- при снижении текущего значения азобного возраста активного ила ниже проектного значения для данной температуры — увеличение концентраций аммонийного азота и азота нитритов в очищенной воде</p> | <p>Реконструировать 2 первичных отстойника в ферментеры;</p> <p>- снизить концентрацию растворенного кислорода на выходе из аэробной зоны аэротенка, оставив расход воздуха, требуемый только на протемпивание;</p> <p>- снизить расход возвратного активного ила на 30...35 %</p> <p>- реконструировать 1 или 2 вторичных отстойника в ферментеры;</p> <p>- ввести систему дозирования внешнего источника углерода в поступающую на очистку сточную воду или химического реагента для организации процесса преципитации перед первичным отстойником (при наличии в существующей схеме), после вторичных отстойников (при наличии сорбентной доочистки). При дозировании реагента в поток возвратного активного ила необходимо ежемесячно определять значение азобного возраста активного ила, чтобы не сорвать процессы нитрификации</p> |

Продолжение табл. 3.20

|   |  |
|---|--|
| Возможные последствия   | Действия персонала   |
| <p><b>Отношение БПК<sub>полн</sub> к общему фосфору (ТР) менее 20 для технологий нитрификации и биологического удаления фосфора по схемам IСАН, JНВ, Вагденрию А2/О</b></p> <p>Недостаток органических соединений для реализации технологии биологического удаления фосфора включение системы дозирования реагента для химической преципитации приводит к увеличению количества избыточного активного ила и снижению значения аэробного возраста активного ила, как следствия:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличение концентрации соединений фосфора в очищенной воде;</li> <li>- при снижении текущего значения аэробного возраста активного ила ниже проектного значения для данной температуры — увеличение концентраций аммонийного азота и азота нитритов в очищенной воде</li> </ul> <p><b>Температура поступающей сточной воды выше максимального проектного значения, но ниже 38 °С</b></p> | <p>Ввести систему дозирования внешнего источника углерода в поступающую на очистку сточную воду или химического реагента для организации процесса преципитации перед первичным отстойником (при их наличии в существующей схеме), после вторичных отстойников (при наличии сооружений доочистки). При дозировании реагента в поток возвратного активного ила необходимо ежедневно определять значение аэробного возраста активного ила, чтобы не сорвать процессы нитрификации</p> |
| <p>Снижение растворимости кислот рода в иловой смеси и как следствие, и обеспечение необходимого количества кислорода для реализации биологических процессов проектной эффективности, увеличение концентрации соединений фосфора, аммонийного азота и нитритов, значений БПК<sub>полн</sub>, ХПК в очищенной воде</p> <p><b>Температура поступающей сточной воды выше 38 °С</b></p>   | <p>Увеличить подачу воздуха в аэротенки до расчетного значения с учетом текущей температуры сточной воды</p>   |
| Снижение активности микроорганизмов вплоть до полного разрушения клеток   | Обеспечить на очистных сооружениях систему предварительного охлаждения сточных вод   |

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Температура поступающей сточной воды ниже минимального проектного значения</b></p> <p>Снижение скорости биохимических процессов и, как следствие, повышение концентрации соединений фосфора, аммонийного азота, азота нитритов, азота нитрат в значении БПК<sub>полн</sub>, ХПК в очищенной воде на проектных значениях</p> | <p>Обеспечить, при возможности, нагрев сточной воды, но с учетом наbio о ическу о очистку, или иловой смеси и н.осред.т.тенпо в аэротенках</p>                           |
| <b>Щелочность менее проектного значения</b>   |  |
| Ограничение нитрификационной возможности процесса и, как следствие, превращение аммонийным азотом в очищенной воде проектных значений   | Обеспечить дозирование щелочи (как правило, NaOH) в сточную воду, поступающую на биологическую очистку   |
| <b>pH поступающей сточной воды не соответствует требованиям биохимических процессов (6.5...8.5)</b>   | <b>рН поступающей сточной воды не соответствует требованиям реализации</b>   |
| Срыв процессов биологической дефосфотации, нитрификации, денитрификации, аэробного окисления органических соединений и, как следствие, превышение концентрации соединений фосфора, аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов в очищенной воде на проектных значениях  | Установить систему рН регулирования с мониторингом значительных рН поступающей сточной воды и дозированием щелочи и/или кислоты  |
| <b>Превышение предела ингибирования (по концентрациям) специфическими органическими соединениями, содержащимися в поступающей на биологическую очистку сточных водах</b>  | <b>Превышение предела ингибирования (по концентрациям) специфическими органическими соединениями, содержащимися в поступающей на биологическую очистку сточных водах</b> |
| Срыв процесса биологической дефосфотации, нитрификации, денитрификации, аэробного окисления органических соединений и, как следствие, превращение концентрации соединений фосфора, аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов, значениями БПК <sub>полн</sub> , ХПК в очищенной воде проектных значений                    | Выявить источники сброса органических соединений и сбросов: на период сброса увеличить на 30...50 % расход подаваемого воздуха   |

|   |  |
|---|--|
| Возможные последствия   | Действия персонала   |
| <p>Превышение предельно допустимых концентраций металлов и органических соединений в поступающих на биологическую очистку сточных водах</p> <p>Срыв процессов биологической очистки, денитрификации, аэробного окисления органических соединений азота, аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов, значительное увеличение концентрации азота в очищенной воде</p> <p>Залповый сброс нефтепродуктов, СПАВ или других органических загрязнений (залповое увеличение значения ХПК в поступающей сточной воде)</p> <p>Резкое уменьшение концентрации растворенного кислорода в аэробной зоне сооружений, срыв процессов нитрификации, снижение эффективности биологической очистки, денитрификации, аэробного окисления органических соединений, развитие процессов пенообразования и вспухания активного ила, как следствие, превышение концентрации азота нитритов, аммонийного азота, азота нитратов, соединений БПК<sub>топт</sub>, ХПК) и взвешенных веществ в очищенной воде</p> | <p>Выявить источники сброса специфических органических соединений и обеспечить прекращение сброса органических соединений</p> <p>Увеличить на 30...50 % расход подаваемого воздуха. Увеличить на 25 % расход избыточного активного ила. Нормализация кислородного режима происходит в течение 3...5 сут после прекращения сброса нефтепродуктов и СПАВ</p> |

Таблица 3.21. Контролируемые параметры эксплуатации аэротенков, работающих по технологии нитри-денитрификации и удаления фосфора

| Наименование показателя   | Регламентное значение* эксплуатационных параметров  |
|---|---|
| Расход сточной воды, м <sup>3</sup> /сут  | Не более проектного значения и не менее 80 % от проектного значения   |
| Расход возвратного активного ила, м <sup>3</sup> /ч   | ±10 % от проектного значения и расчетное значение исходя из текущего качества поступающей сточной воды или с учетом показаний датчиков онлайн-контроля при интегрировании насосов возвратного активного ила в АСУ   |
| Расход нитратного ренника м <sup>3</sup> /ч   | ±10 % от проектного значения, или расчетное значение исходя из текущего качества поступающей сточной воды или с учетом показаний датчиков онлайн-контроля при интегрировании насосов нитратного ренника в АСУ   |
| Расход иловой смеси из аноксидной зоны в анаэробную, м <sup>3</sup> /ч  | ±10 % от проектного значения, или расчетное значение исходя из текущего качества поступающей сточной воды, или с учетом показаний датчиков онлайн-контроля при интегрировании насосов иловой смеси в АСУ  |
| Количество дозируемого реагента для химической претрификации фосфора для технологической и биологической претрификации и химического удаления фосфора | Определяется расчетным путем (см. п. 3.2.2) в зависимости от типа реагента, точки его ввода, текущей концентрации общего фосфора в поступающей на биологическую очистку сточной воде, текущего расхода сточной воды, количества фосфора, потребленного на прирост биомассы активного ила, и требований к качеству очищенной воды  |
| Количество дозируемого реагента для химической претрификации и биолого-химического удаления фосфора   | Определяется расчетным путем (см. п. 3.2.2) в зависимости от типа реагента, точки его ввода, текущей концентрации общего фосфора в поступающей на биологическую очистку сточной воде, текущего расхода сточной воды, количества фосфора, потребленного на прирост биомассы активного ила, количества фосфора, улаваемого из системы ФАО, и требований к качеству очищенной воды |
| Доза активного ила на выходе из аэробной зоны аэротенка, г/л  | ±10 % от проектного значения  |
| Доза возвратного активного ила, г/л   | ±20 % от проектного значения  |
| Доза избыточного активного ила, г/л   | ±20 % от проектного значения  |



Окончание табл. 3.21

| Наименование показателя  | Регламентное значение* эксплуатационных параметров   |
|--|--|
| Зольность активного ила, %   | 0,25...0,45 (для гордых сточных вод зависит от состава сточных вод и технологии очистки; для сточных вод с органическими веществами — 0,1...0,5 (для промисленных сточных вод за исключением сточных вод и технологического режима работы сооружений). |
| Иловый индекс, см <sup>3</sup> /г  | Зависит от химических и конструктивных решений, состава сточных вод и режим эксплуатации — не более проектного значения  |
| Кинетическая константа скорости роста в аэробной зоне (коэффициент деактивации и лимитического удлинения):<br><i>Аэротенк-в-смеситель:</i><br>Концентрация растительного кислорода в аэробной зоне (на расстоянии 0,33l от начала аэробной зоны, где l — длина зоны), мг/л;<br>Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне (на расстоянии 0,66l от начала аэробной зоны, где l — длина зоны), мг/л.<br><i>Аэротенк-смеситель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне, мг/л | 1,8...2,0<br>2,0...2,3<br>2,0...2,5  |
| Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне (технология нитрификации и биологии):<br><i>Аэротенк-в-смеситель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне (на расстоянии 0,33l от начала аэробной зоны, где l — длина зоны), мг/л;<br>Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне (на расстоянии 0,66l от начала аэробной зоны, где l — длина зоны), мг/л.<br><i>Аэротенк-смеситель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне, мг/л                 | В аэробной зоне концентрация растворенного кислорода строго не должна выходить из диапазона 1,8...4,0 мг/л<br><br>2,0...2,2<br>2,2...2,5<br>2,2...2,5  |

|  |  |
|--|--|
| Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне (для технологии нитрификации, химического, биологического и биологического удаления фосфора):<br><i>Аэротенк-в-смеситель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне (на расстоянии менее 5 м от точки подачи нитратного реагента и нитратного аэрирования), мг/л;<br>Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне (на расстоянии более 5 м от точки подачи нитратного реагента и нитратного аэрирования), мг/л;<br>Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне (на расстоянии более 5 м от точки подачи нитратного реагента и нитратного аэрирования), мг/л.<br><i>Аэротенк-смеситель:</i><br>Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне, мг/л | <0,2<br><br>0...0,1<br>0,0<br><br><0,1                                       |
| Концентрация азота нитратов (N-NO <sub>3</sub> ) в аноксидной зоне в точке забора иловой смеси, подаваемой из аноксидной зоны в аэробную зону аэротенка.<br><i>Аэротенк-в-смеситель:</i><br>Концентрация N-NO <sub>3</sub> в аноксидной зоне (на расстоянии менее 5 м от точки подачи иловой смеси из аноксидной зоны в аэробную зону аэротенка), мг/л.<br><i>Аэротенк-смеситель:</i><br>Концентрация N-NO <sub>3</sub> в аноксидной зоне, мг/л  | Менее 3,0<br><br>Менее 4,0...4,5   |
| Количество избыточного активного ила, м <sup>3</sup> /сут  | Расчетное значение, обеспечивающее проектное значение возраста активного ила |
| Общий возраст ила, сут   | ±10 % от проектного значения   |
| Аэробный возраст ила, сут  | ±10 % от проектного значения   |

\* Предлагаемые регламентные параметры эксплуатации сооружений могут быть скорректированы с учетом конкретного проекта очистных сооружений.

Возможные нарушения технологических параметров работы сооружений, реализующих технологии нитри-денитрификации и удаления фосфора, и рекомендованные нами мероприятия по их устранению представлены в табл. 3.22.

**Таблица 3.22.** Нарушения технологических параметров работы сооружений биологической очистки сточных вод от азота (при реализации технологий нитри-денитрификации и удаления фосфора)

| Нарушение технологического режима  | Действия персонала по устранению нарушений  |
|--|---|
| Пониженная концентрация растворенного кислорода в аэробных зонах аэротенка (рабочие значения см. табл. 3.21) | <p>При кратковременном уменьшении концентрации растворенного кислорода (до 3 суток):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличить расход воздуха, подаваемого в аэротенки, на 20...30 % по сравнению с регламентным значением;</li> <li>- выровнять концентрацию растворенного кислорода по длине аэробной зоны с помощью задвижек стояков аэрационной системы;</li> <li>- провести внеочередной анализ качественного состава поступающих сточных вод, определить возможные причины снижения концентрации растворенного кислорода;</li> <li>- снизить уровень стояния осадка в первичных отстойниках до минимально возможного.</li> </ul> |
|  | <p>При ежесуточных снижениях концентрации растворенного кислорода в часы максимальных нагрузок по органическим соединениям и аммонийному азоту необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- провести оптимизацию кислородного профиля по длине сооружения;</li> <li>- установить систему автоматического регулирования подачи воздуха по показаниям анализатора концентрации растворенного кислорода в аэробных зонах.</li> </ul>   |
|  | <p>При устойчивом тренде снижения концентрации растворенного кислорода с момента замены аэрационной системы при проектных параметрах сточной воды, поступающей на биологическую очистку, необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- оценить состояние аэрационной системы;</li> <li>- провести мероприятия по чистке, ремонту или замене аэраторов</li> </ul>   |

**Продолжение табл. 3.22**

| Нарушение технологического режима  | Действия персонала по устранению нарушений  |   |
|--|---|---|
| Повышенная концентрация растворенного кислорода в аноксидных зонах аэротенка (рабочие значения см. табл. 3.21) | <p>При ежесуточном увеличении концентрации растворенного кислорода в аноксидных зонах в часы минимальных нагрузок по органическим соединениям и аммонийному азоту в поступающих на биологическую очистку сточных водах необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отрегулировать кислородный профиль в аэробной зоне аэротенка, обеспечить в точке забора нитратного рецикла расход воздуха только на перемешивание иловой смеси;</li> <li>- установить систему автоматического регулирования подачи воздуха по показаниям анализатора концентрации растворенного кислорода в аэробных зонах, задав максимальное значение концентрации растворенного кислорода (см. табл. 3.21).</li> </ul> <p>При постоянном превышении концентрации растворенного кислорода в аноксидных зонах вне зависимости от поступающей в аэротенки нагрузки необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- отрегулировать кислородный профиль в аэробной зоне аэротенка, обеспечить в точке забора нитратного рецикла расход воздуха только на перемешивание иловой смеси;</li> <li>- оптимизировать расход нитратного рецикла, обеспечив минимальный расход, дающий необходимое для достижения проектного качества очищенной воды по нитратам количество подаваемых в аноксидную зону нитратов</li> </ul> |   |
|  | <p>Повышенная концентрация азота нитратов (<math>N-NO_3</math>) в аноксидной зоне в точке забора иловой смеси, подаваемой из аноксидной зоны в анаэробную зону аэротенка (рабочие значения см. табл. 3.21)</p>  | <p>Оценить причины неэффективности процесса денитрификации (см. гл. 2) и принять соответствующие меры по повышению его эффективности</p>  |
|  | <p>Увеличение дозы активного ила в аэротенке более чем на 10 % от проектного значения из-за повышенного прироста активного ила</p>  | <p>При увеличении концентрации взвешенных веществ в очищенной воде из-за превышения проектного значения дозы активного ила в аэротенке необходимо:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- увеличить расход избыточного активного ила, контролируя расчетное значение аэробного возраста, не допуская его снижения ниже проектного значения;</li> <li>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках</li> </ul> |

Окончание табл. 3.22

| Нарушение технологического режима  | Действия персонала по устранению нарушений  |
|--|---|
| Уменьшение дозы активного ила в аэротенке по сравнению с проектным значением из-за пониженного прироста активного ила  | - Увеличить уровень осадка в первичных отстойниках;<br>- контролируя дозу активного ила в аэротенке, снизить расход избыточного активного ила, не допуская увеличения значения общего возраста активного ила более 45 сут   |
| Снижение значения возраста активного ила ниже проектного значения  | При проектном значении прироста активного ила — снизить расход избыточного активного ила.<br>При повышенном приросте активного ила:<br>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках;<br>- включить в работу все первичные отстойники;<br>- по возможности снизить гидравлическую нагрузку на аэротенки, где наблюдается повышенный прирост ила;<br>- параллельно со снижением прироста ила (в ходе указанных выше мероприятий) проводить снижение расхода избыточного активного ила до значения, необходимого для обеспечения проектного значения возраста ила |
| Увеличение значения возраста активного ила выше проектного значения  | Увеличить расход избыточного активного ила, при этом доза активного ила не должна быть ниже проектного значения   |
| Увеличение значения илового индекса более 160 см <sup>3</sup> /г вследствие сброса нефтепродуктов, СПАВ или повышенных концентраций других органических соединений | - Увеличить расход воздуха на 30...50 %;<br>- увеличить расход избыточного активного ила на 25 %, контролируя расчетное значение аэробного возраста активного ила, не допуская его снижения ниже проектного значения более чем на 20 %;<br>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках  |
| Развитие процессов пенообразования   | См. гл. 1   |

*Проблемы технического исполнения вторичных отстойников, так же как и неоптимальный режим их эксплуатации, могут привести к ухудшению качества очищенной воды после вторичных отстойников по сравнению с качеством на выходе из аэротенка.*

В табл. 3.23 приведены основные показатели очищенных вод, постоянный мониторинг которых позволяет не только контролировать качество очищенной воды, но и дает возможность предвидеть развитие негативных явлений и проводить мероприятия, позволяющие избежать ухудшения качества очистки.

Таблица 3.23. Качественные показатели очищенной воды, характеризующие эффективность работы сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации и удаления фосфора

| Наименование показателя                                   | Регламентное значение эксплуатационных параметров | Примечание  |
|---|---|---|
| Значение БПК <sub>5</sub>                                 | Проектное значение                                | Определяется согласно графику аналитического контроля                   |
| Значение БПК <sub>полн</sub>                              |   | Определяется 1 раз в месяц или согласно графику аналитического контроля |
| БПК <sub>полн</sub> / БПК <sub>5</sub>                    | —   | Рассчитывается по данным лабораторного контроля                         |
| Значение ХПК  | Проектное значение                                | Определяется согласно графику аналитического контроля                   |
| Концентрация взвешенных веществ, мг/л                     |   |   |
| Концентрация аммонийного азота (N-NH <sub>4</sub> ), мг/л |   |   |
| Концентрация азота нитратов (N-NO <sub>3</sub> ), мг/л    |   |   |
| Концентрация азота нитритов (N-NO <sub>2</sub> ), мг/л    |   |   |
| Концентрация фосфора фосфатов (P-PO <sub>4</sub> ), мг/л  |   |   |
| Специфические органические соединения                     |   |   |
| Металлы   |   |   |

Возможные причины несоответствия качественных параметров очищенной воды проектным значениям представлены в табл. 3.24.

**Таблица 3.24.** Причины несоответствия качественных параметров очищенной воды проектным значениям

| Возможные причины   | Действия персонала  |
|---|---|
| <b>Превышение проектных значений ХПК при соответствии значения БПК<sub>полн</sub> проектному значению в очищенной воде</b>                                    |   |
| Поступление со сточными водами биохимически неокисляемых веществ, концентрация которых превышает проектное значение   | При периодически возникающей проблеме снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках.<br>При постоянном превышении устанавливать сооружения доочистки от бионеразлагаемых органических соединений    |
| <b>Кратковременное превышение проектных значений БПК<sub>полн</sub> и ХПК</b>   |   |
| Залповый сброс повышенных концентраций нефтепродуктов, СПАВ или других органических загрязнений (залповое увеличение значения ХПК в поступающей сточной воде) | - Увеличить на 30...50 % расход подаваемого воздуха;<br>- увеличить на 25 % расход избыточного активного ила;<br>- снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках                                    |
| <b>Постоянное превышение проектных значений БПК<sub>полн</sub> и ХПК</b>  |   |
| Несоответствие качественных и количественных параметров сточной воды, поступающей на биологическую очистку, проектным значениям                               | См. табл. 3.20  |
| Режим эксплуатации сооружений не соответствует проектным параметрам   | См. гл. 1   |
| <b>Превышение проектного значения концентрации аммонийного азота в иловой смеси аэротенков (в фильтрованной пробе иловой смеси)</b>                           |   |
| Низкая концентрация кислорода в аэротенке   | Выявить причины снижения концентрации растворенного кислорода и провести мероприятия по достижению концентрации растворенного кислорода регламентных значений (см. табл. 3.21, 3.22)  |
| Значение аэробного возраста активного ила ниже проектного   | Обеспечить проектное значение аэробного возраста активного ила (см. табл. 3.22)   |
| Превышение проектных значений концентраций аммонийного азота и/или общего органического азота в сточных водах, поступающих на биологическую очистку           | При кратковременном превышении продолжать эксплуатировать в штатном режиме. При постоянном превышении входными концентрациями проектных провести модернизацию сооружений с учетом изменения качества поступающей сточной воды |

**Продолжение табл. 3.24**

| Возможные причины  | Действия персонала   |
|--|--|
| Температура поступающих сточных вод ниже проектного значения   | При кратковременном снижении температуры продолжать эксплуатировать в штатном режиме; при ежегодном периоде более 20 сут, в течение которого температура иловой смеси в аэротенках ниже проектного значения, необходимо решать вопрос искусственным повышением температуры иловой смеси или повышением окислительной мощности сооружения |
| рН сточных вод не соответствует диапазону 6,5...8,5  | При однократном несоответствии продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом несоответствии установить систему рН-контроля и регулирования рН   |
| Щелочность поступающих сточных вод ниже проектного значения  | При разовом снижении продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом или постоянном установить систему дозирования реагента NaOH  |
| Недостаток фосфора в поступающей сточной воде — отношение фосфора к БПК <sub>полн</sub> в поступающей на биологическую очистку сточной воде менее 0,01   | При разовом уменьшении продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом или постоянном установить систему дозирования реагента — источника фосфора (например, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )   |
| Превышение концентрациями веществ, оказывающих ингибирующее воздействие на процессы нитрификации, в поступающих сточных водах порога ингибирования (см. п. 2.2.3)  | При разовом сбросе увеличить на 30...50 % расход воздуха и на 25...30 % расход избыточного активного ила, при периодических сбросах решать вопрос о недопущении поступления неочищенных (неэффективно очищенных) производственных сточных вод на биологические очистные сооружения   |
| <b>Превышение концентрации аммонийного азота в очищенной воде после вторичных отстойников при соответствии концентрации аммонийного азота проектным данным в фильтрованной пробе иловой смеси аэротенков</b> |  |
| Развитие процесса аммонификации во вторичных отстойниках   | - Снизить до минимально возможного уровень осевшего ила во вторичных отстойниках;<br>- устранить технические проблемы механизмов сбора ила во вторичных отстойниках;<br>- не допускать образования «мертвых зон» неудаляемого осадка   |

Продолжение табл. 3.24

| Возможные причины   | Действия персонала   |
|---|--|
| <b>Превышение проектного значения концентрации азота нитритов в иловой смеси аэротенков (в фильтрованной пробе иловой смеси)</b>                                  |  |
| Низкая концентрация кислорода в аэротенке   | Выявить причины снижения концентрации растворенного кислорода и провести мероприятия по достижению регламентного значения концентрации растворенного кислорода (см. табл. 3.22)  |
| Значение аэробного возраста активного ила ниже проектного   | Обеспечить проектное значение аэробного возраста активного ила (см. табл. 3.22)  |
| Температура поступающих сточных вод ниже проектного значения  | При кратковременном снижении температуры продолжать эксплуатировать в штатном режиме; при ежегодном периоде более 20 сут, в течение которого температура иловой смеси в аэротенках ниже проектного значения, необходимо решать вопрос искусственным повышением температуры иловой смеси или повышением окислительной мощности сооружения |
| pH сточных вод не соответствует диапазону 6,5...8,5   | При одноразовом несоответствии продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом несоответствии установить систему pH-контроля и регулирования pH   |
| Щелочность поступающих сточных вод ниже проектного значения   | При одноразовом снижении продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом или постоянном установить систему дозирования реагента NaOH  |
| Недостаток фосфора в поступающей сточной воде — отношение фосфора к БПК <sub>полн</sub> в поступающей на биологическую очистку сточной воде менее 0,01            | При разовом уменьшении продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом или постоянном установить систему дозирования реагента — источника фосфора (например, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )   |
| Превышение концентрациями веществ, оказывающих ингибирующее воздействие на процессы нитрификации, в поступающих сточных водах порога ингибирования (см. п. 2.2.3) | При разовом сбросе увеличить на 30...50 % расход воздуха и на 25...30 % расход избыточного активного ила, при периодических сбросах решать вопрос о недопущении поступления неочищенных (неэффективно очищенных) производственных сточных вод на биологические очистные сооружения   |

Продолжение табл. 3.24

| Возможные причины  | Действия персонала   |
|--|--|
| <b>Повышенная концентрация азота нитратов в очищенной воде</b>   |  |
| Значения БПК <sub>полн</sub> (БПК <sub>5</sub> , ХПК) в поступающей на биологическую очистку сточной воде ниже проектных значений при проектных значениях концентраций аммонийного азота и общего азота            | Увеличить уровень осадка в первичных отстойниках и/или установить систему дозирования внешнего источника углерода  |
| Концентрация кислорода в аноксидной зоне превышает регламентное значение в аэротенке   | Выполнить мероприятия по снижению концентрации растворенного кислорода в аноксидной зоне (см. табл. 3.22)  |
| Значение возраста активного ила более 45 сут   | Увеличить расход избыточного активного ила, при этом доза ила в аэротенке не должна снижаться менее проектного значения (см. табл. 3.22)   |
| Температура поступающих сточных вод ниже проектного значения   | При кратковременном снижении температуры продолжать эксплуатировать в штатном режиме; при ежегодном периоде более 20 сут, в течение которого температура иловой смеси в аэротенках ниже проектного значения, необходимо решать вопрос искусственным повышением температуры иловой смеси или повышением окислительной мощности сооружения |
| pH сточных вод не соответствует диапазону 6,5...8,5  | При одноразовом несоответствии продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом несоответствии установить систему pH-контроля и регулирования pH   |
| Недостаток азота и фосфора в поступающей сточной воде (отношение фосфора к БПК <sub>полн</sub> в поступающей на биологическую очистку сточной воде менее 0,01, отношение азота к БПК <sub>полн</sub> — менее 0,05) | Установить систему дозирования реагентов — источников азота и/или фосфора (например, мочевины, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )  |
| Превышение концентрациями веществ, оказывающих ингибирующее воздействие на процессы денитрификации, в поступающих сточных водах порога ингибирования (см. п. 2.2.3)  | При разовом сбросе увеличить на 25...30 % расход избыточного активного ила, при периодических сбросах решать вопрос недопущения поступления неочищенных (неэффективно очищенных) производственных сточных вод на биологические очистные сооружения   |

**Продолжение табл. 3.24**

| Возможные причины  | Действия персонала   |
|--|--|
| <b>Повышенная концентрация фосфора фосфатов в очищенной воде (при реализации технологии химического удаления фосфора)</b>  |  |
| Концентрация общего фосфора поступающей сточной воды превышает проектное значение  | Увеличить расход дозируемого реагента для химической преципитации фосфора  |
| Низкая нагрузка по органическим соединениям, в результате чего снижается прирост активного ила   | - Увеличить уровень осадка в первичных отстойниках;<br>- увеличить расход дозируемого реагента для химической преципитации фосфора   |
| <b>Повышенная концентрация фосфора фосфатов в очищенной воде (при реализации технологии биологического удаления фосфора)</b>   |  |
| Значения БПК <sub>полн</sub> (БПК, ХПК) в поступающей на биологическую очистку сточной воде ниже проектных значений при проектном значении общего фосфора (фосфора фосфатов) | Увеличить уровень осадка в первичных отстойниках и/или установить систему дозирования внешнего источника углерода  |
| Концентрация азота нитратов в аноксидной зоне в точке забора иловой смеси в анаэробную зону превышает регламентное значение в аэротенке                                      | Выполнить мероприятия по снижению концентрации азота нитратов в аноксидной зоне в точке забора иловой смеси в анаэробную зону (см. табл. 3.22)   |
| Температура поступающих сточных вод ниже проектного значения   | При кратковременном снижении температуры продолжать эксплуатировать в штатном режиме; при ежегодном периоде более 20 сут, в течение которого температура иловой смеси в аэротенках ниже проектного значения, необходимо решать вопрос искусственным повышением температуры иловой смеси или повышением окислительной мощности сооружения |
| pH сточных вод не соответствует диапазону 6,5...8,5  | При одноразовом несоответствии продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом несоответствии установить систему pH-контроля и регулирования pH   |
| Недостаток азота в поступающей сточной воде (отношение азота к БПК <sub>полн</sub> менее 0,05)   | Установить систему дозирования реагентов — источников азота (например, мочевины)   |
| Концентрация общего азота в поступающей сточной воде выше проектной  | При одноразовом несоответствии продолжать эксплуатировать в штатном режиме, при периодическом несоответствии установить систему дозирования внешнего источника углерода  |

**Окончание табл. 3.24**

| Возможные причины  | Действия персонала  |
|--|---|
| Превышение концентрациями веществ, оказывающих ингибирующее воздействие на активность гетеротрофных микроорганизмов, в поступающих сточных водах порога ингибирования (см. гл. 1)                          | При разовом сбросе увеличить на 25...30 % расход избыточного активного ила, при периодических сбросах решать вопрос недопущения поступления неочищенных (неэффективно очищенных) производственных сточных вод на биологические очистные сооружения  |
| Неэффективность реализации процесса денитрификации, повышенная концентрация азота нитратов в рецикле иловой смеси, поступающей в анаэробную зону (см. табл. 3.21, 3.22)                                    | Принять меры по повышению эффективности процесса денитрификации (см. п. 2.2)  |
| Наличие растворенного кислорода в анаэробной зоне  | - Выявить потоки поступления растворенного кислорода в анаэробную зону: с поступающей сточной водой, с рециклом возвратного активного ила, с внутренними рециклами иловой смеси;<br>- провести технические мероприятия по устранению насыщения поступающей сточной воды кислородом;<br>- провести технологические мероприятия по минимизации концентрации растворенного кислорода в точках забора рециклов, поступающих в анаэробную зону |
| Концентрация растворенного кислорода в аэробных зонах ниже 2,0 мг/л и выше 4,0 мг/л  | Обеспечить рабочий для биологической дефосфотации кислородный режим в аэробной зоне: 2,0...4,0 мг/л   |
| <b>Превышение концентрации фосфора фосфатов в очищенной воде после вторичных отстойников при соответствии концентрации фосфора фосфатов проектным данным в фильтрованной пробе иловой смеси аэротенков</b> |   |
| Развитие процесса анаэробного высвобождения фосфора из клеток ФАО при нахождении осевшего активного ила во вторичных отстойниках   | - Снизить до минимально возможного уровень осевшего ила во вторичных отстойниках;<br>- устранить технические проблемы механизмов сбора ила во вторичных отстойниках;<br>- не допускать образования «мертвых зон» неудаляемого осадка  |

При эксплуатации реальных сооружений возможны неоднозначные ситуации, примеры некоторых из них представлены в табл. 3.25.

**Таблица 3.25.** Примеры несоответствия качества очищенных вод проектным значениям и пути исправления ситуаций (для технологий, реализующих процессы глубокого удаления органических соединений, нитри-денитрификации и удаления фосфора)

| Качественные параметры очищенной воды  | Решения  |
|--|--|
| БПК <sub>полн</sub> < 3...5 мг/л (в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из азротенка), N-NH <sub>4</sub> > 1 мг/л                         | Возможно несоответствие значения аэробного возраста активного ила проектному значению (за последние 10 сут) для данной температуры. Рассчитайте значение аэробного возраста активного ила за последние 10 сут и в случае, когда это значение меньше проектного для текущей температуры, следуйте рекомендациям табл. 3.22, 2.19, 2.21  |
| Нестабильность концентрации N-NH <sub>4</sub> : постоянные колебания значений от менее 0,5...0,7 мг/л до более 2 мг/л                            | Удаление избыточного активного ила нестабильное, при повышении концентрации N-NH <sub>4</sub> до 0,5...0,7 мг/л и более остановить отвод избыточного активного ила на трое суток и затем начинать выводить избыточный активный ил с расходом 0,3Q <sub>was</sub> в течение 3 последующих суток (где Q <sub>was</sub> — расчетный расход избыточного активного ила для обеспечения проектного значения аэробного возраста активного ила для текущей температуры), 0,5Q <sub>was</sub> в течение следующих 3 суток, 0,8Q <sub>was</sub> в следующие 3 суток, и затем обеспечивать стабильный ежесуточный расход избыточного активного ила Q <sub>was</sub> |
| Концентрация N-NH <sub>4</sub> более 2 мг/л, активный ил изменил окраску на темно-коричневую и даже черную                                       | Возможен дефицит кислорода в аэробных зонах сооружения и/или значение общего возраста активного ила превышает рабочие значения. Проверьте концентрацию растворенного кислорода в аэробных зонах, она не должна быть меньше рабочих значений (см. табл. 3.21), пересчитайте значение общего возраста активного ила, которое не должно быть больше 40...45 сут   |
| Коричневые крупные скопления (комки) ила, поднимающиеся на поверхность вторичных отстойников, при концентрациях N-NH <sub>4</sub> менее 1,0 мг/л | Флотация активного ила может происходить за счет образования газообразного азота и углекислого газа в ходе процесса денитрификации в толще осевшего во вторичных отстойниках активного ила. Проверьте расход возвратного активного ила и увеличьте его до проектного значения, снизьте время пребывания ила в отстойнике до 2,0...2,5 ч. Проверьте эффективность работы системы сброса и удаления ила вторичных отстойников. Увеличьте периодичность очистки стен и водосливов вторичных отстойников   |

**Продолжение табл. 3.25**

| Качественные параметры очищенной воды   | Решения   |
|---|---|
| БПК <sub>полн</sub> > 20 мг/л (в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из азротенка), N-NH <sub>4</sub> > 5...10 мг/л  | Проверьте значения аэробного и общего возраста активного ила за последние 10 сут, значение аэробного возраста должно быть не менее проектного значения для текущей температуры, значение общего возраста не должно быть более 40...45 сут. Проверьте концентрацию растворенного кислорода в аэробной зоне сооружения, которая должна соответствовать рабочим значениям (см. табл. 3.21), проверьте дозу активного ила, которая должна быть не менее проектного значения. Если указанные параметры не нарушены, проверьте возможность поступления ингибирующих веществ со сточными водами, проверьте эффективность работы сооружений предварительной очистки — механической и физико-химической (при их наличии) |
| Концентрация N-NH <sub>4</sub> < 0,4 мг/л, концентрация N-NO <sub>3</sub> > 9,1 мг  | Проверьте качественные и количественные параметры сточных вод, поступающих на биологическую очистку, при их несоответствии проектным значениям примите меры (табл. 3.20—3.24). Проверьте концентрацию растворенного кислорода в аноксидной зоне (см. табл. 3.21)  |
| Концентрация P-PO <sub>4</sub> > 0,2...0,4 мг/л, концентрация общего фосфора (TP) > 0,5...1,0 мг/л, БПК <sub>полн</sub> < 3...5 мг/л (в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из азротенка)  | Проверьте концентрацию растворенного кислорода в анаэробной зоне (см. табл. 3.21), концентрацию азота нитратов в потоках рециклов, поступающих в анаэробную зону (см. табл. 3.21); возможен недостаток ЛЖК в анаэробной зоне сооружения — требуется добавление или внешнего источника углерода, или супернатанта сооружений ферментации осадка. Фосфор может высвобождаться из клеток ФАО при нахождении этих организмов в анаэробных условиях, образуемых в толще осевшего активного ила во вторичных отстойниках, — увеличьте расход возвратного активного ила, уменьшите уровень ила в отстойниках до 0,2...0,3 м, проверьте систему сброса и удаления ила во вторичных отстойниках                          |
| Концентрация P-PO <sub>4</sub> > 0,2...0,4 мг/л, концентрация TP > 0,5...1,0 мг/л, БПК <sub>полн</sub> < 3...5 мг/л (в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из азротенка), концентрация взвешенных веществ во взболтанной пробе очищенной воды более 15...20 мг/л | Введите ежедневный контроль концентрации взвешенных веществ в часы максимального притока сточной воды, определите причину, приводящую к повышению концентрации взвешенных веществ в очищенной воде: гидравлическая перегрузка, развитие процессов пенообразования и вспухания (см. гл. 1), низкий рецикл возвратного активного ила. Примите соответствующие меры. В качестве оперативной меры можно рекомендовать использование полимеров или солей металлов для повышения седиментационных свойств активного ила   |

Окончание табл. 3.25

| Качественные параметры очищенной воды   | Решения  |
|---|--|
| Концентрация $P-PO_4 < 0,1...0,2$ мг/л,<br>концентрация $TP < 0,2...0,5$ мг/л,<br>$BPK_{полн} \geq 15...20$ мг/л<br>(в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из аэротенка)   | Нагрузка по органическим соединениям превышает проектное значение, проверьте нагрузку на активный ил по органическим соединениям   |
| Концентрация $P-PO_4 < 0,1...0,2$ мг/л,<br>концентрация $TP < 0,2...0,5$ мг/л,<br>концентрация $N-NH_4 < 0,4$ мг/л,<br>$N-NO_2 < 0,02$ мг/л,<br>концентрация $N-NO_3 \geq 9,5$ мг/л   | Проверьте расход нитратного рецикла из аэробной зоны в аноксидную. При необходимости увеличьте расход до расчетного значения (см. гл. 2). Проверьте концентрацию растворенного кислорода в аноксидной зоне (см. табл. 3.21)  |
| Концентрация $P-PO_4 < 0,1...0,2$ мг/л,<br>концентрация $TP < 0,2...0,5$ мг/л, концентрация $N-NH_4 < 0,4$ мг/л,<br>$N-NO_2 < 0,02$ мг/л,<br>$N-NO_3 \geq 9,5$ мг/л, значение $BPK_{полн} > 15...20$ мг/л<br>(в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из аэротенка)              | Проверьте количество дозируемого внешнего источника углерода, его количество может быть завышено   |
| Концентрация $P-PO_4 < 0,1...0,2$ мг/л,<br>концентрация $TP < 0,2...0,5$ мг/л,<br>концентрация $N-NH_4 \geq 0,5$ мг/л,<br>$N-NO_3 \geq 0,02$ мг/л,<br>концентрация $N-NO_3 < 9,0$ мг/л, значение $BPK_{полн} < 3$ мг/л<br>(в фильтрованной пробе иловой смеси на выходе из аэротенка) | Проверьте значение аэробного возраста активного ила за последние 10 сут, его значение может быть ниже проектного значения для текущей температуры. В этом случае следует уменьшить расход избыточного активного ила до восстановления требуемого значения аэробного возраста активного ила |

## Глава 4. РАСЧЕТЫ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ. ОПЫТ РЕШЕНИЯ. ПРИМЕРЫ

### 4.1. Контроль работы сооружений

#### биологической очистки сточных вод

Опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора показывает, что основная проблема достижения требуемого качества очищенной воды заключается в нестабильности работы аэротенков в условиях существенного колебания поступающей нагрузки. Канализационные очистные сооружения, принимающие не только производственные, но и городские сточные воды, работают в условиях ярко выраженной нестационарности входных потоков.

#### 4.1.1. Динамика качественных и количественных характеристик поступающих сточных вод

На рис. 4.1—4.9 представлены данные часовых колебаний загрязнений сточных вод, поступающих на Курьяновские очистные сооружения (КОС), Люберецкие очистные сооружения (ЛОС) и канализационные сооружения, принимающие стоки от промышленного узла города Волжского Волгоградской области [111, 112, 29].

Из графиков видно, что динамика качественных параметров сточных вод, в том числе и городских, носит, с точки зрения математического описания процесса, случайный характер. Анализ рисунков показывает, что амплитуда колебаний концентраций  $N-NH_4$  в часовых пробах составляет 30...50 % для КОС и 40...65 % для ЛОС от средних суточных концентраций  $N-NH_4$  в рассматриваемые сутки (средние суточные концентрации (значения) рассматриваемых параметров определяются как среднее арифметическое концентраций (значений) соответствующих параметров в часовых пробах в рассматриваемые сутки).



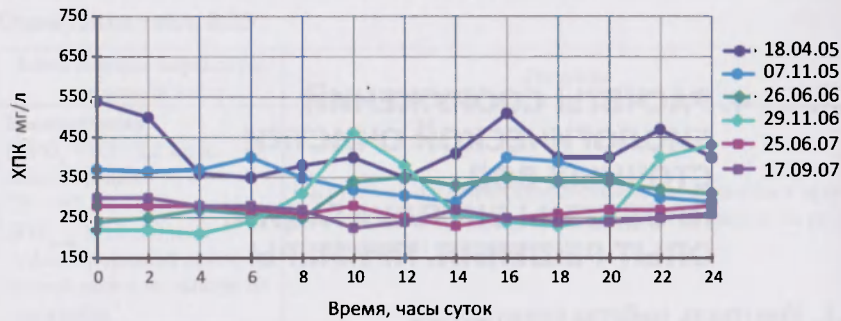


Рис. 4.1. Суточная динамика ХПК в сточной воде, поступающей на КОС

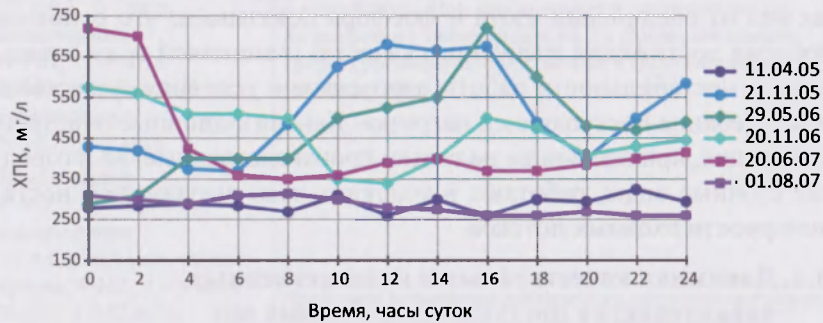


Рис. 4.2. Суточная динамика ХПК в сточной воде, поступающей на ЛОС

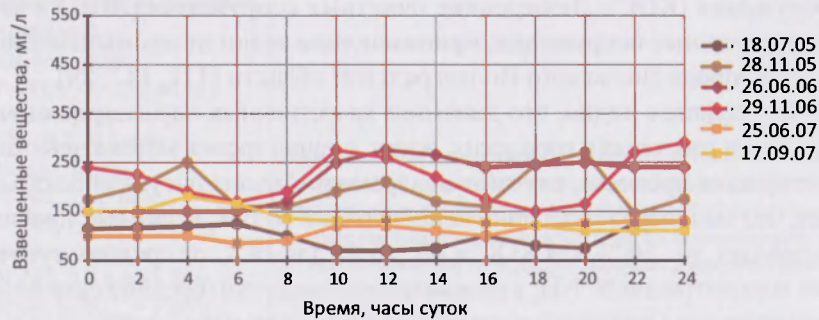


Рис. 4.3. Суточная динамика взвешенных веществ в сточной воде, поступающей на КОС



Рис. 4.4. Суточная динамика взвешенных веществ в сточной воде, поступающей на ЛОС

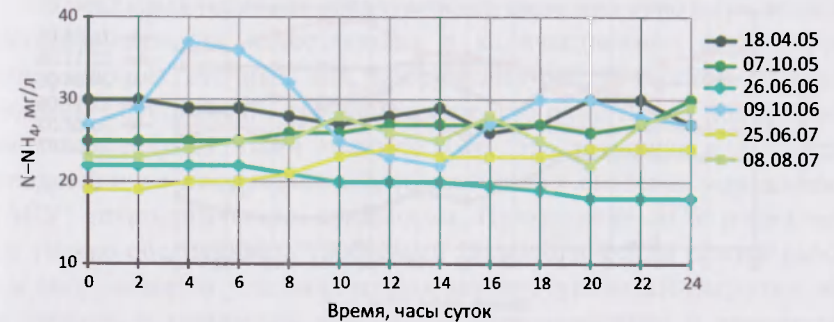


Рис. 4.5. Суточная динамика N-NH<sub>4</sub> в сточной воде, поступающей на КОС

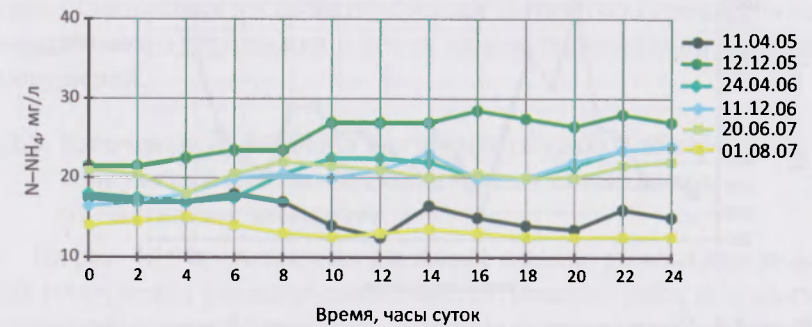


Рис. 4.6. Суточная динамика N-NH<sub>4</sub> в сточной воде, поступающей на ЛОС

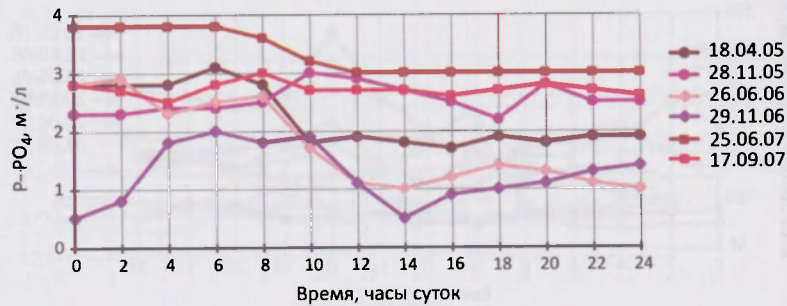


Рис. 4.7. Суточная динамика  $P-PO_4$  в сточной воде, поступающей на КОС

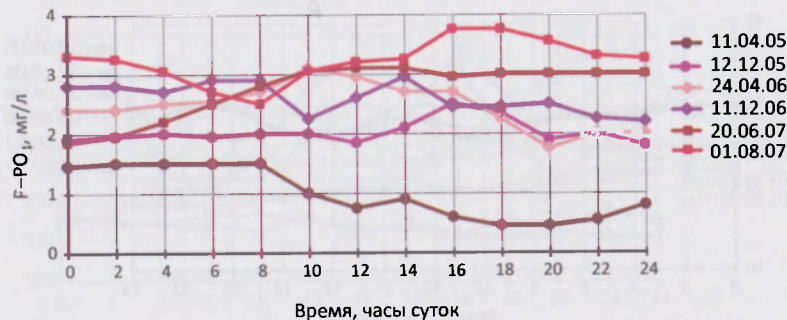


Рис. 4.8. Суточная динамика  $P-PO_4$  в сточной воде, поступающей на ЛОС

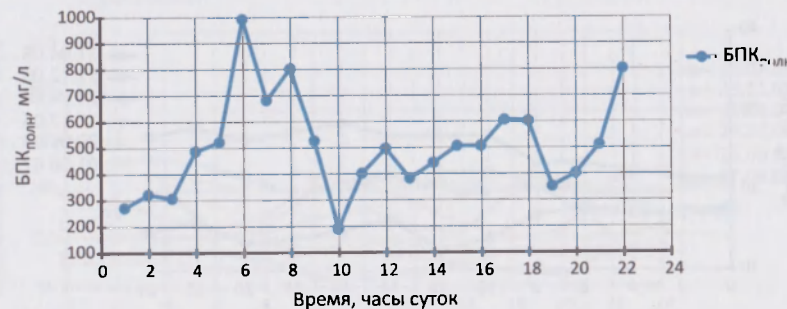


Рис. 4.9. Суточная динамика  $BPK_{полн}$  в сточной воде, поступающей на очистные сооружения промышленного узла г. Волжского Волгоградской обл.

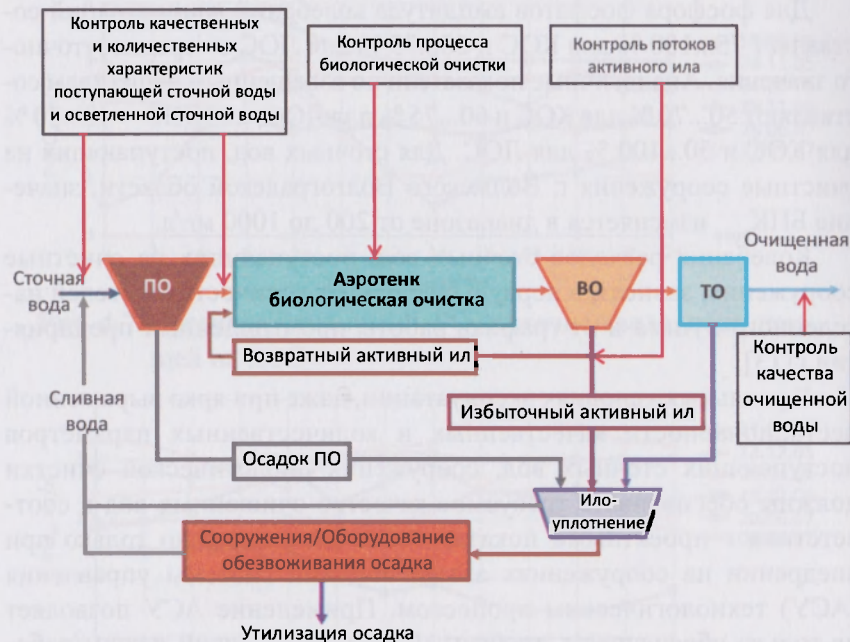
Для фосфора фосфатов амплитуда колебаний концентраций составляет 75...100 % для КОС и 60...95 % для ЛОС от среднесуточного значения. Аналогичные показатели по взвешенным веществам составляют 50...70 % для КОС и 60...75 % для ЛОС; по ХПК — 40...70 % для КОС и 50...100 % для ЛОС. Для сточных вод, поступающих на очистные сооружения г. Волжского Волгоградской области, значение  $BPK_{полн}$  изменяется в диапазоне от 200 до 1000 мг/л.

Колебания расходов сточных вод, поступающих на очистные сооружения, зависят, в первую очередь, от количества жителей населенного пункта и от графика работы промышленных предприятий [113].

В реальных условиях эксплуатации, даже при ярко выраженной нестационарности качественных и количественных параметров поступающих сточных вод, сооружения биологической очистки должны обеспечивать требуемое качество очищенных вод в соответствии с проектными показателями. Это возможно только при внедрении на сооружениях автоматической системы управления (АСУ) технологическим процессом. Применение АСУ позволяет не только обеспечивать требуемый технологический режим работы сооружений в условиях изменения поступающей нагрузки, но и сводить к минимуму перерасход электроэнергии и реагентов. Рассмотрение базовых принципов АСУ сооружений биологической очистки сточных вод выходит за границы этой книги, и мы лишь остановимся здесь на понимании алгоритмов процессов технологического управления с точки зрения эксплуатации очистных сооружений.

#### 4.1.2. Ключевые параметры инструментального контроля сооружений биологической очистки сточных вод от биогенных элементов

На рис. 4.10 представлены ключевые параметры контроля очистных сооружений биологической очистки, реализующих технологию удаления биогенных элементов. Вопросы контроля и управления сооружениями механической очистки сточных вод и обработки осадка выходят за формат этой книги.

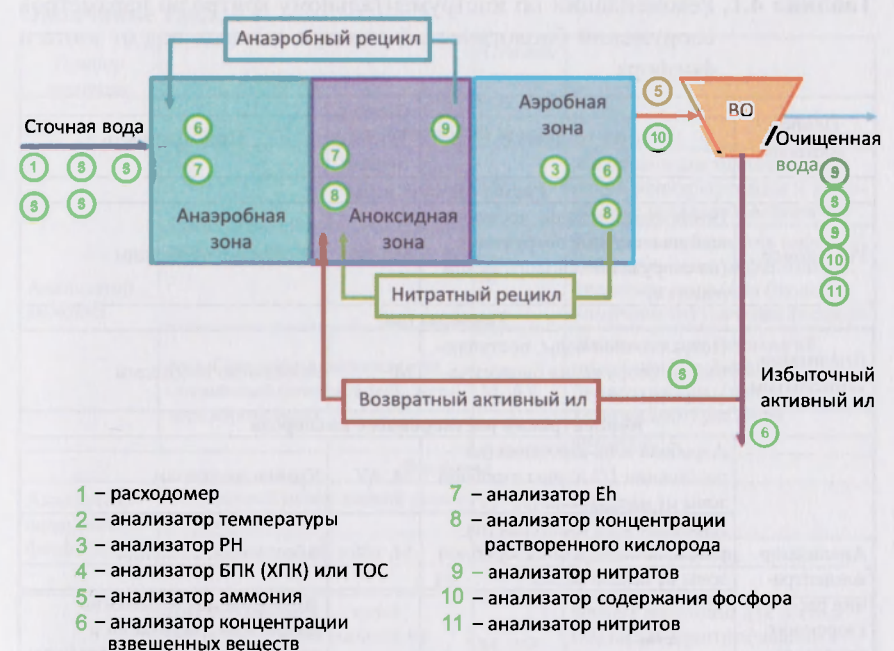


**Рис. 4.10.** Ключевые параметры контроля очистных сооружений, реализующих технологию удаления азота и фосфора

Детальная информация о параметрах, указанных на рис. 4.10, дана в табл. 3.15—3.17, 3.19.

*Основной задачей применения автоматической системы управления на канализационных очистных сооружениях является поддержание стабильного требуемого качества очищенных вод в реальных условиях нестационарности поступающей нагрузки при минимальных эксплуатационных затратах.*

На рис. 4.11 представлена рекомендуемая нами общая схема инструментального контроля сооружений биологической очистки сточных вод, реализующих технологию биологического удаления азота и фосфора.



**Рис. 4.11.** Общая схема инструментального контроля сооружений биологической очистки сточных вод, реализующих технологию биологического удаления азота и фосфора

В табл. 4.1 даны более детальные рекомендации по инструментальному контролю сооружений биологической очистки сточных вод, реализующих технологию удаления азота и фосфора, с учетом схемы контроля, приведенной на рис. 4.11.

В табл. 4.2 даны рекомендации по месторасположению КИП и обоснования необходимости применения того или иного измерения для контроля и оптимизации технологического режима сооружений удаления азота и фосфора из сточных вод.

На рис. 4.12 и 4.13 даны примеры алгоритмов управления контурами, которые достаточно часто используются в системе автоматического управления сооружениями биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора.

**Таблица 4.1.** Рекомендации по инструментальному контролю параметров сооружений биологической очистки сточных вод от азота и фосфора

| Прибор контроля  | Точка установки  | Степень автоматизации* | Необходимость  |
|--|--|------------------------|--|
| <b>Расход сточной воды</b>   |  |                        |  |
| Расходомер   | Поток сточной воды, поступающей на очистные сооружения (на сооружения биологической очистки) | М, АУ                  | Абсолютно необходим  |
| <b>Температура</b>   |  |                        |  |
| Анализатор температуры   | Поток сточной воды, поступающей на сооружения биологической очистки                          | М                      | Абсолютно необходим  |
| <b>Концентрация растворенного кислорода</b>  |  |                        |  |
| Анализатор концентрации растворенного кислорода  | Аэробная зона аэротенка (на расстоянии 1/3 длины аэробной зоны от начала зоны)               | М, АУ                  | Крайне желателен   |
|  | Аэробная зона аэротенка (на расстоянии 2/3 длины аэробной зоны от начала зоны)               | М, АУ                  | Абсолютно необходим  |
|  | Аноксидная зона аэротенка  | М                      | Желателен для технологий нитри-денитрификации и химического удаления фосфора; крайне желателен для технологий нитри-денитрификации и биологического (или биолого-химического) удаления фосфора |
| <b>pH</b>  |  |                        |  |
| Анализатор pH  | Поток сточной воды, поступающей на биологическую очистку                                     | М, АУ                  | Крайне желателен для городских, абсолютно необходим для производственных сточных вод   |
|  | Аэробная зона аэротенка  | М, АУ                  | Крайне желателен   |
| <b>NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub></b>  |  |                        |  |
| Анализатор нитратов и нитритов (или отдельно датчики NO <sub>3</sub> и NO <sub>2</sub> ) | Аноксидная зона аэротенка (точка забора рецикла в анаэробную зону)                           | М, АУ                  | Крайне желателен   |
|  | Поток очищенной воды   | М, АУ                  | Желателен  |
| Анализатор NO <sub>3</sub>   | Поток сточной воды, поступающей на биологическую очистку                                     | М                      | Желателен (только для производственных сточных вод)  |
|  | Аноксидная зона (точка дозирования внешнего источника углерода)                              | М, АУ                  | Желателен  |

**Окончание табл. 4.1**

| Прибор контроля                            | Точка установки   | Степень автоматизации* | Необходимость  |
|--|---|------------------------|--|
| <b>Аммонийный азот</b>                     |   |                        |  |
| Анализатор аммония                         | Поток сточной воды, поступающей на биологическую очистку  | М                      | Желателен для технологий нитри-денитрификации и химического удаления фосфора                                     |
|  |   | М                      | Крайне желателен для технологий нитри-денитрификации и биологического (или биолого-химического) удаления фосфора |
|  | Аэробная зона аэротенка (или смешанный поток иловой смеси всех аэротенков)  | М, АУ                  | Желателен для технологий нитри-денитрификации и биологического (или биолого-химического) удаления фосфора        |
| <b>Фосфаты</b>                             |   |                        |  |
| Анализатор содержания фосфора              | Смешанный поток иловой смеси всех аэротенков  | М, АУ                  | Желателен  |
|  | Поток очищенной воды  | М, АУ                  | Крайне желателен   |
| <b>Eh</b>                                  |   |                        |  |
| Анализатор Eh                              | Анаэробная зона — точка смешения потока рецикла из аноксидной зоны в анаэробную и поступающей сточной воды              | М, АУ                  | Крайне желателен для технологий нитри-денитрификации и биологического (или биолого-химического) удаления фосфора |
|  | Аноксидная зона (точка поступления нитратного рецикла из аэробной зоны)   | М, АУ                  | Желателен  |
| <b>БПК (ХПК) или ТОС</b>                   |   |                        |  |
| Анализатор БПК (ХПК) или ТОС               | Поток сточной воды, поступающей на биологическую очистку  | М                      | Желателен  |
| <b>Взвешенные вещества</b>                 |   |                        |  |
| Анализатор концентрации взвешенных веществ | Анаэробная зона — точка смешения потока рецикла из аноксидной зоны в анаэробную и поступающей в сооружение сточной воды | М, АУ                  | Желателен  |
|  | Аэробная зона аэротенка (на выходе из аэробной зоны)  | М, АУ                  | Крайне желателен   |
|  | Поток очищенной воды  | М, АУ                  | Крайне желателен   |
|  | Поток избыточного активного ила   | М, АУ                  | Крайне желателен   |
|  | Поток возвратного активного ила   | М, АУ                  | Желателен  |

\* М — мониторинг, АУ — системы автоматического управления.

**Таблица 4.2.** Рекомендации по месторасположению КИП в сооружениях биологической очистки сточных вод, реализующих технологии удаления биогенных элементов

| КИП  | Цель  | Комментарии  |
|--|---|--|
| <b>Сточная вода, поступающая на биологическую очистку</b>  |   |  |
| Анализатор аммония   | Мониторинг  | Необходим для определения причины нарушения эффективности процессов нитрификации и биологического (или биолого-химического) удаления фосфора   |
| <b>Аноксидная зона, расположенная перед аэробной зоной</b>   |   |  |
| Анализатор концентрации растворенного кислорода (в точке поступления нитратного рецикла из аэробной зоны сооружения)   | Мониторинг и оптимизация процессов  | Необходим для определения причин снижения эффективности процессов денитрификации, а также биологического удаления фосфора; для принятия решений о снижении (при необходимости) количества кислорода, поступающего в аноксидную зону с нитратным рециклом |
| Анализатор нитратов и нитритов (в точке забора рецикла в анаэробную зону сооружения)   | Мониторинг и оптимизация процессов  | Необходим для мониторинга, а также оценки эффективности процессов денитрификации, для определения причин снижения эффективности процессов биологического удаления фосфора (при необходимости)  |
| <b>Аэробная зона</b>   |   |  |
| Анализатор концентрации растворенного кислорода (на расстоянии 1/3 длины аэробной зоны азротенка от начала аэробной зоны — для азротенка-вытеснителя, в любой точке — для азротенка-смесителя) | Контроль и оптимизация аэробных биохимических процессов; энергосбережение | Создание оптимального кислородного режима для микроорганизмов; недопущение перерасхода электроэнергии на аэрацию   |
| Анализатор концентрации растворенного кислорода (на расстоянии 2/3 длины аэробной зоны азротенка от начала аэробной зоны — для азротенка-вытеснителя, в любой точке — для азротенка-смесителя) | Контроль и оптимизация аэробных биохимических процессов; энергосбережение | Создание оптимального кислородного режима для микроорганизмов; недопущение перерасхода электроэнергии на аэрацию, недопущение подачи избыточного количества кислорода в аноксидную зону с нитратным рециклом   |

**Окончание табл. 4.2**

| КИП   | Цель  | Комментарии   |
|---|---|---|
| Анализатор pH   | Контроль и оптимизация аэробных биохимических процессов           | Необходим для определения причин снижения эффективности процессов нитрификации, аэробного окисления органических соединений и биологического удаления фосфора (при необходимости)                                   |
| <b>Постаноксидная зона (если реализована схема с postanоксидной зоной — аноксидной зоной, расположенной после аэробной зоны) в точке подачи внешнего источника углерода</b> |   |   |
| Анализатор концентрации растворенного кислорода   | Мониторинг и оптимизация процесса денитрификации                  | Необходим для определения причин снижения эффективности процессов денитрификации и принятия решения по минимизации количества кислорода, поступающего в postanоксидную зону с потоком иловой смеси из аэробной зоны |
| Анализатор нитратов и нитритов  | Определение количества дозируемого внешнего источника углерода    | Необходим для достижения требуемого качества очищенной воды по нитратам и оптимизации эксплуатационных затрат на реагенты   |
| <b>Анаэробная зона (в точке поступления рецикла иловой смеси из аноксидной зоны сооружения)</b>   |   |   |
| Анализатор Eh   | Мониторинг и оптимизация процесса биологического удаления фосфора | Необходим для определения причин снижения эффективности процесса биологического удаления фосфора и принятия корректных решений по достижению проектного качества очищенной воды по фосфатам (общему фосфору)        |

При разработке алгоритма системы управления дозированием реагента при реализации технологии химического удаления фосфора (рис. 4.12) необходимо учитывать, что все данные в режиме реального времени поступают на пульт оператора, который в случае сигнала об аварийной ситуации переводит управление в ручной режим.

В то же время следует отметить, что понятие «режим реального времени» является достаточно условным, так как технически достичь мгновенной реакции системы управления на то или иное

событие, происходящее на управляемом объекте в настоящее время, не представляется возможным, и всегда имеется некоторая задержка (time delay). Это время задержки необходимо для обработки и реакции на происходящее событие на управляемом объекте. Для рассматриваемого алгоритма работы системы управления достаточным будет time delay в диапазоне от 10 до 30 мин. При поступлении данных о текущей концентрации фосфора в очищенной воде в систему производится пересчет необходимой дозы реагента и ее коррекция. В случае, когда расхождения между необходимой и оптимальной дозой реагента превышают допустимый предел, также заложенный в систему, выводится сообщение технологу или дежурному диспетчеру, который в зависимости от ситуации принимает решение о переходе на ручной режим управления.

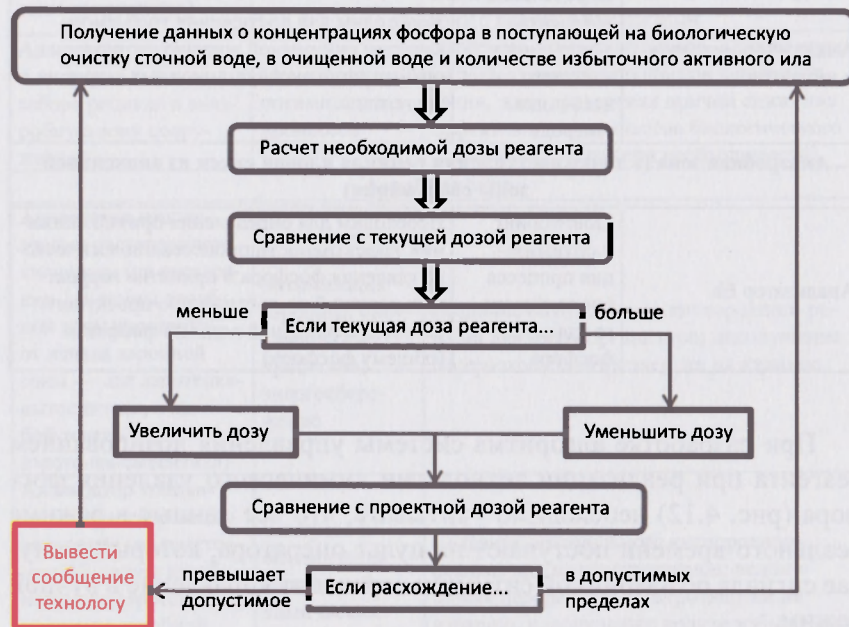


Рис. 4.12. Алгоритм работы системы управления дозированием реагента для химической преципитации фосфора

Наиболее часто используемым контуром в системе автоматического управления сооружениями биологической очистки сточных вод, реализующих технологии удаления азота и фосфора, является управление кислородным режимом (рис. 4.13). Задачей рассматриваемого контура является поддержание заданной концентрации растворенного кислорода в значимой, с точки зрения определения режима штатной работы сооружения, точке аэротенка (см. гл. 2 и 3).

При реализации технологии биологического удаления фосфора наиболее сложной задачей является поддержание строго анаэробных условий в анаэробной зоне сооружения (см. гл. 3). Использование контура управления нитратным рециклом в зависимости от показаний анализатора Eh (редокс-потенциала) позволяет достичь стабильного качества удаления фосфора в реальных условиях колебания поступающей нагрузки. Алгоритм данного контура управления включает в себя получение данных с анализатора Eh, расположенного в анаэробной зоне аэротенка. Задачей анализатора редокс-потенциала в этом случае является поддержание анаэробных условий. В зависимости от показаний анализатора (при  $-400...-500$  мВ условия в реакторе являются глубоко анаэробными, при  $-250...-300$  мВ — недостаточно анаэробными) регулируется расход насоса рецикла иловой смеси из аноксидной зоны в анаэробную.

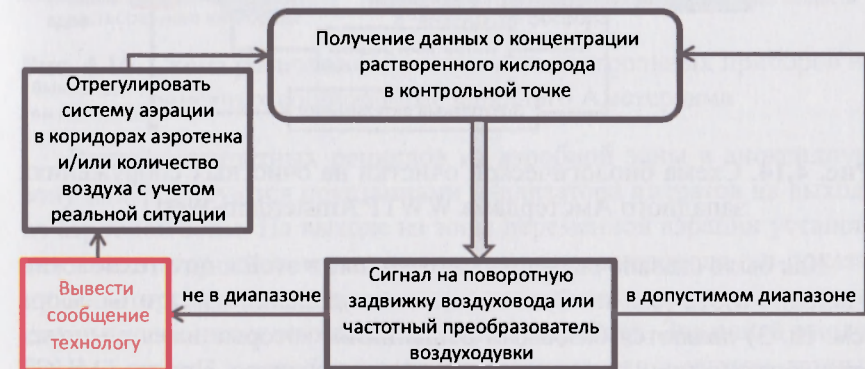


Рис. 4.13. Алгоритм работы управления подачей воздуха в зависимости от текущей концентрации растворенного кислорода

### 4.1.3. Примеры мониторинга и автоматического технологического управления сооружениями удаления азота и фосфора

Канализационные очистные сооружения г. Амстердама (WWTP Amsterdam-West) реализуют технологию биологической очистки сточных вод от азота и фосфора по технологии MUCT [114] (рис. 4.14). На биологическую очистку поступает осветленная в первичных отстойниках сточная вода. Среднечасовой проектный расход для сухой погоды составляет 7000 м<sup>3</sup>/ч, среднесуточный расход с учетом дождевых сточных вод составляет 200 000 м<sup>3</sup>/сут, пиковый расход — 30 000 м<sup>3</sup>/ч. Проектная суточная нагрузка составляет: TN = 8900 кг/сут, TKN = 9000 кг/сут, N-NO<sub>3</sub> = 140 кг/сут, N-NO<sub>2</sub> = 30 кг/сут, TP = 1250 кг/сут, БПК<sub>5</sub> = 44 000 кг/сут, ХПК = 97 000 кг/сут, по взвешенным веществам — 52 800 кг/сут. Требуемое качество очистки: концентрация общего фосфора (TP) составляет 1,0 мг/л, общего азота — 10,0 мг/л, БПК<sub>5</sub> — 20 мг/л, концентрация взвешенных веществ — 30 мг/л.



Рис. 4.14. Схема биологической очистки на очистных сооружениях западного Амстердама WWTP Amsterdam-West

Как было сказано выше, рассмотренные в этой книге технологии удаления азота (см. гл. 2) и технологии удаления азота и фосфора (см. гл. 3) являются базовыми решениями, которые имеют множество конструктивных и технологических вариантов. Процесс MUCT на очистных сооружениях западного Амстердама реализован в 4 отделенных друг от друга зонах. Сточная вода после первичных от-

стойников поступает в анаэробную зону, куда также подается рецикл иловой смеси из конца аноксидной зоны. После анаэробной зоны иловая смесь поступает в аноксидную зону, в которую поступают нитратный рецикл из аэробной зоны и возвратный активный ил из вторичных отстойников. Затем часть иловой смеси подается в анаэробную зону с рециклом, а часть поступает в зону переменной аэрации, где поочередно создаются аэробные и аноксидные условия. В эту же зону поступает дополнительный нитратный рецикл из аэробной зоны. Илоразделение происходит гравитационным методом во вторичных отстойниках.

Схема расположения контрольных приборов на очистных сооружениях западного Амстердама представлена на рис. 4.15 [115].

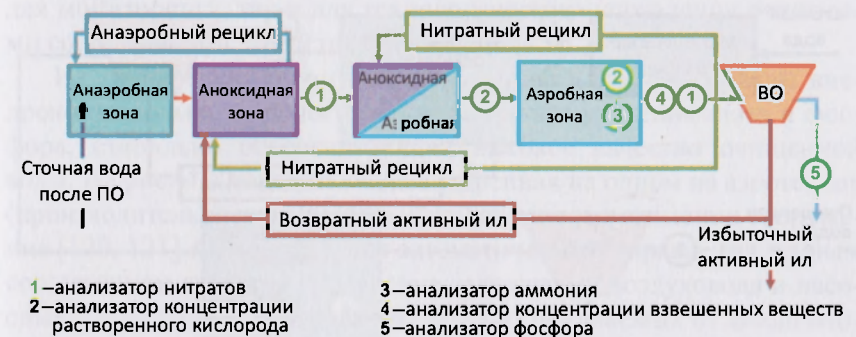
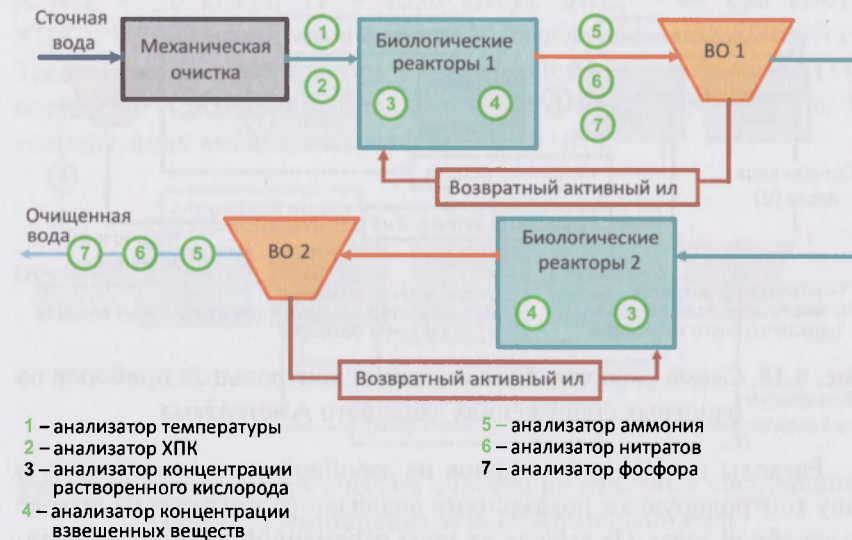


Рис. 4.15. Схема расположения основных контрольных приборов на очистных сооружениях западного Амстердама

Расходы нитратных рециклов из аэробной зоны в аноксидную зону контролируются показаниями анализатора нитратов на выходе из аэробной зоны. На выходе из зоны переменной аэрации установлен анализатор концентрации растворенного кислорода, по показаниям которого происходит попеременное включение/выключение системы аэрации и перемешивающих устройств. Заданный кислородный режим в аэробной зоне поддерживается с учетом данных анализатора концентрации растворенного кислорода и анализатора аммония, установленных в этой зоне. Для обеспечения требуемой

дозы активного ила в сооружении на выходе из аэробной зоны установлен анализатор концентрации взвешенных веществ. Среднегодовое качество очистки сточных вод на канализационных очистных сооружениях западного Амстердама составляет: концентрация общего азота (TN) — менее 6,7 мг/л, общего фосфора (TP) — менее 0,8 мг/л [116, 117].

Канализационные очистные сооружения г. Блिसбрука, принимающие сточные воды от северной части Люксембурга (Bleesbruck WWTP), были реконструированы в 1998 г. под технологию нитриденитрификации и биолого-химического удаления фосфора с увеличением производительности с 9 900 до 17 800 м<sup>3</sup>/сут. Схема очистки сточных вод представлена на рис. 4.16 [118].



**Рис. 4.16.** Схема блока очистки сточных вод и расположения измерительных приборов на станции г. Блисбрука (Люксембург): биологические реакторы 1 — 1-я ступень биологической очистки; ВО 1 — вторичные отстойники 1-й ступени биологической очистки; биологические реакторы 2 — 2-я ступень биологической очистки; ВО 2 — вторичные отстойники 2-й ступени биологической очистки

Биологическая очистка на очистных сооружениях г. Блисбрука осуществляется по двухступенчатой схеме (АВ-технология). На 1-й ступени происходит окисление органических соединений в биологических реакторах 1, и затем иловая смесь поступает на вторичные отстойники 1-й ступени (ВО 1). Реагенты для химической преципитации фосфора подаются в биологические реакторы 1-й ступени, и фосфорный осадок выпадает во вторичных отстойниках 1-й ступени. На 2-й ступени реализуются процессы нитрификации и доокисления органических соединений.

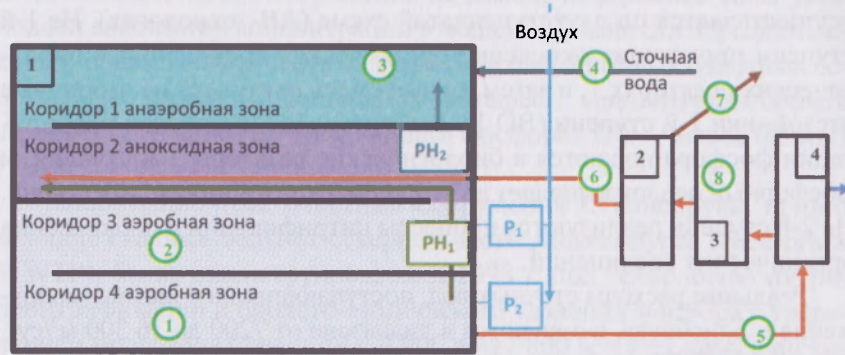
Реальные расходы сточных вод, поступающих на очистные сооружения г. Блисбрука, изменяются в диапазоне от 7200 до 16 300 м<sup>3</sup>/сут, нагрузка по ХПК изменяется от 110 до 1000 кг/ч (при среднем значении 480 кг/ч) [119]. Измерительные приборы, используемые как для мониторинга, так и для технологического управления очистными сооружениями, представлены на рис. 4.16.

На Люберецких очистных сооружениях (ЛОС) г. Москвы внедрено несколько технологий биологического удаления азота и фосфора, стабильно обеспечивающих высокое качество очищенной воды. На рис. 4.17 представлена внедренная на одном из аэротенков (производительностью 80 000 м<sup>3</sup>/сут) схема автоматизации сооружения [120, 121]. Основой схемы автоматического управления данным сооружением является управление задвижками воздуховода и насосными агрегатами на основании данных, получаемых от анализаторов концентрации растворенного кислорода, значений Eh и расходов иловой смеси, возвратного и избыточного активного ила.

С помощью АСУ контролируются и управляются следующие технологические операции:

- автоматическое управление насосом рецикла иловой смеси из аноксидной зоны в анаэробную по значению Eh-анализатора, установленного в анаэробной зоне аэротенка (в 1-м коридоре);
- автоматическое управление задвижкой воздуховода, подающего воздух в 3-й коридор аэротенка, по показаниям анализатора концентрации растворенного кислорода;
- автоматическое управление задвижкой воздуховода, подающего воздух в 4-й коридор аэротенка, по показаниям датчика концентрации растворенного кислорода.

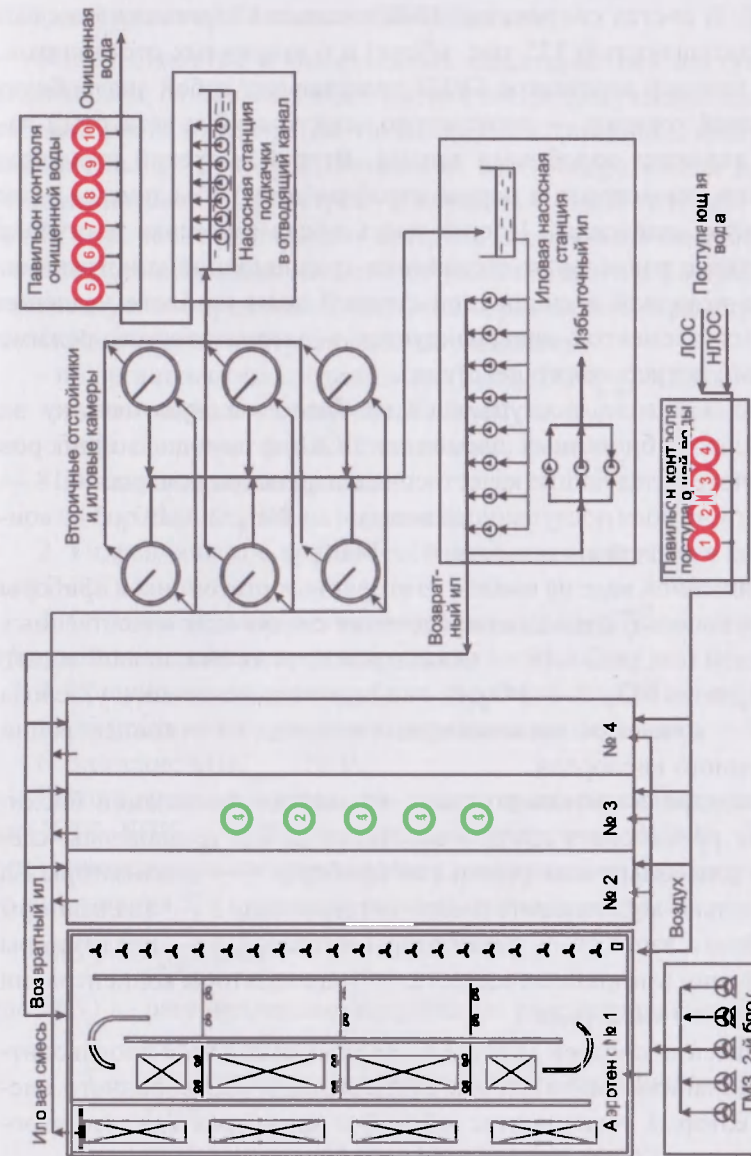




- 1, 2 —  $O_2$  3,4К-анализаторы концентрации растворенного кислорода в коридоре 3 и коридоре 4,
- 3 — Eh1K-анализатор Eh в коридоре 1,
- 4 — анализатор концентрации взвешенных веществ в поступающей осветленной сточной воде,
- 5 — датчик расхода иловой смеси,
- 6 — датчик расхода возвратного активного ила,
- 7 — датчик расхода избыточного активного ила,
- 8 — датчик уровня активного ила,
- $P_1, P_2$  — регулируемые задвижки на воздуховоде,
- $PH_1$  — регулируемый насос нитратного рецикла,
- $PH_2$  — регулируемый насос анаэробного рецикла

**Рис. 4.17.** Схема расположения приборов и исполнительных механизмов на азротенке ЛОС производительностью 80 000 м<sup>3</sup>/сут: 1 — азротенк; 2 — распределительная камера возвратного активного ила; 3 — приемный резервуар возвратного активного ила; 4 — вторичные отстойники

В 2006 г. на Люберецких очистных сооружениях был запущен блок удаления биогенных элементов (БУБЭ) производительностью 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут, реализующий технологию биологического удаления азота и фосфора [122, 53]. Технология блока разработана специалистами Мосводоканала, проект — МосводоканалНИИпроект в тесном сотрудничестве со специалистами Мосводоканала.



**Рис. 4.18.** Схема расположения приборов на сооружениях блока удаления биогенных элементов ЛОС производительностью 500 000 м<sup>3</sup>/сут

Схема расположения приборов на данном блоке представлена на рис. 4.18. В состав сооружений БУБЭ входят 4 аэротенка (каждый производительностью 125 тыс. м<sup>3</sup>/сут) и 6 вторичных отстойников. Первый коридор аэротенков БУБЭ представляет собой анаэробную зону, второй коридор — аноксидную зону, третий и четвертый коридоры являются аэробными зонами. Второй и третий коридоры аэротенков (аноксидная и первая аэробная зоны) объединены в так называемую «карусель». Иловая смесь после аэротенка поступает на вторичные радиальные отстойники традиционной конструкции. Качество исходной и очищенной сточной воды на блоке удаления биогенных элементов контролируется в автоматическом режиме приборами непрерывного действия.

В сточной воде, поступающей на биологическую очистку на блок удаления биогенных элементов ЛОС, с помощью приборов определяются следующие качественные параметры (см. рис. 4.18 — павильон контроля поступающей воды): 1 — NH<sub>4</sub>, 2 — PO<sub>4</sub>, 3 — концентрация взвешенных веществ, 4 — БПК<sub>5</sub>.

В очищенной воде на выходе из вторичных отстойников приборы контроля используются для определения следующих качественных показателей (см. рис. 4.18 — павильон контроля очищенной воды): 5 — NH<sub>4</sub>, 6 — NO<sub>3</sub>, 7 — PO<sub>4</sub>, 8 — общего органического углерода (ТОС), 9 — концентрации взвешенных веществ, 10 — концентрации растворенного кислорода.

Для контроля технологических параметров реализации биохимических процессов в каждом аэротенке БУБЭ установлены следующие контрольно-измерительные приборы: 1 — анализаторы Eh (окислительно-восстановительного потенциала), 2 — анализаторы аммонийного азота, 3 — анализаторы нитратов, 4 — анализаторы концентрации взвешенных веществ, 5 — анализаторы концентрации растворенного кислорода.

Управление подачей воздуха в сооружениях БУБЭ производится по показаниям анализаторов концентрации растворенного кислорода, которые установлены в 3 и 4-м коридорах каждого аэротенка.

#### 4.1.4. Расчеты, используемые при технологическом контроле сооружений биологической очистки

Количественные и качественные характеристики поступающих сточных вод, очищенных вод и иловой смеси, полученные как в ходе лабораторного контроля (см. гл. 2 и 3), так и с помощью контрольно-измерительных приборов, позволяют вести оперативный контроль технологических параметров сооружений биологической очистки. В ходе технологического контроля сооружений биологической очистки, реализующих технологии удаления азота и фосфора, нами рекомендуется определение следующих расчетных параметров:

1. Нагрузка по поступающим загрязнениям:

- по органическим соединениям (БПК<sub>5</sub>, БПК<sub>полн</sub>, ХПК);
- по аммонийному азоту и/или общему азоту;
- по фосфору фосфатов и/или общему фосфору;
- по взвешенным веществам;
- по специфическим загрязнениям.

2. Гидравлическое время пребывания сточной воды в сооружении (HRT).

3. Отношение количества питательных веществ к массе микроорганизмов активного ила (нагрузка на активный ил).

4. Общий возраст активного ила, аэробный возраст активного ила.

5. Эффективность удаления загрязняющих веществ.

6. Значение БПК<sub>полн</sub> / N / P.

Поступающая **нагрузка по рассматриваемым загрязнениям** (по ХПК, БПК<sub>полн</sub>, БПК<sub>5</sub>, взвешенным веществам, N—NH<sub>4</sub>, P—PO<sub>4</sub> и т. д.) определяется как произведение концентрации рассматриваемого загрязнения  $S_i$  и суточного расхода сточных вод  $Q_d$ :

$$M(S_i) = S_i Q_d / 1000, \quad (4.1)$$

где  $M(S_i)$  — рассчитываемая нагрузка по рассматриваемому загрязнению, кг/сут;

$S_i$  — концентрация рассматриваемого загрязнения, мг/л или г/м<sup>3</sup>;

$Q_d$  — расход поступающих сточных вод, м<sup>3</sup>/сут.

**Пример 1.** Рассчитать поступающую в аэротенки нагрузку по взвешенным веществам.

Исходные данные:

- концентрация взвешенных веществ в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, 135 мг/л;
- суточный расход сточных вод 11 350 м<sup>3</sup>/сут.

Поступающая нагрузка по взвешенным веществам определяется по формуле (4.1), где  $S_c$  — концентрация взвешенных веществ в среднесуточной пробе (в рассматриваемые сутки), мг/л или г/м<sup>3</sup>;  $Q_d$  — расход сточных вод за рассматриваемые сутки, м<sup>3</sup>/сут:

$$M(S_c) = 135 \cdot 11\,350 / 1000 = 1532 \text{ кг/сут.}$$

**Пример 2.** Рассчитать поступающую в аэротенки нагрузку по БПК<sub>5</sub>.

Исходные данные:

- значение БПК<sub>5</sub> в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, 120 мг/л;
- расход сточных вод за рассматриваемые сутки 14 500 м<sup>3</sup>/сут.

Поступающая нагрузка по БПК<sub>5</sub> определяется по формуле (4.1), где  $S_5$  — значение БПК<sub>5</sub> (в рассматриваемые сутки), мг/л или г/м<sup>3</sup>;  $Q_d$  — расход сточных вод за рассматриваемые сутки, м<sup>3</sup>/сут:

$$M(S_5) = 120 \cdot 14\,500 / 1000 = 1740 \text{ кг/сут.}$$

**Пример 3.** Рассчитать поступающую в аэротенки нагрузку по аммонийному азоту.

Исходные данные:

- концентрация N-NH<sub>4</sub> в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, 22 мг/л;
- расход сточных вод за рассматриваемые сутки 12 800 м<sup>3</sup>/сут.

Поступающая в аэротенки нагрузка по N-NH<sub>4</sub> определяется по формуле (4.1), где  $S_{N-NH_4}$  — концентрация N-NH<sub>4</sub> в средне-

суточной пробе (в рассматриваемые сутки), мг/л или г/м<sup>3</sup>;  $Q_d$  — расход сточных вод за рассматриваемые сутки, м<sup>3</sup>/сут:

$$M(S_{N-NH_4}) = 22 \cdot 12\,800 / 1000 = 282 \text{ кг/сут.}$$

Аналогично производится расчет поступающих нагрузок по ХПК, БПК<sub>полн</sub>, P-PO<sub>4</sub> и т. д.

**Гидравлическое время пребывания сточной воды в сооружении** (Hydraulic Retention Time — HRT) представляет собой отношение объема сооружения к расходу поступающих в рассматриваемое сооружение сточных вод. Для аэротенков гидравлическое время пребывания сточной воды определяется по формуле:

$$t_{at} = \frac{V_{aer} \cdot N_{aer}}{Q_d} \cdot 24, \quad (4.2)$$

где  $t_{at}$  — гидравлическое время пребывания сточной воды в одном аэротенке, ч;

$V_{aer}$  — объем одного аэротенка, м<sup>3</sup>;

$N_{aer}$  — количество работающих аэротенков;

$Q_d$  — суточный расход сточных вод, поступающих на биологическую очистку, м<sup>3</sup>/сут.

**Пример 4.** Рассчитать гидравлическое время пребывания сточной воды в одном аэротенке.

Исходные данные:

- суточный расход сточных вод, поступающих на биологическую очистку за рассматриваемые сутки, 112 000 м<sup>3</sup>/сут;
- объем одного аэротенка 18 000 м<sup>3</sup>;
- количество работающих аэротенков 4 шт.

Определяем гидравлическое время нахождения сточной воды в аэротенке по формуле (4.2):

$$t_{at} = \frac{18\,000 \cdot 4}{112\,000} \cdot 24 = 15,4 \text{ ч.}$$

**Отношение количества питательных веществ**, поступающих со сточными водами, **к массе микроорганизмов** ( $F/M$  Ratio) представляет собой отношение суточного количества органического субстрата, поступающего со сточными водами на биологическую очистку, к массе беззольного вещества активного ила (БВАИ), находящегося в аэротенках.  $F/M$  Ratio используется в настоящий момент в большинстве стран и является международным общепризнанным параметром, определение которого является обязательным при эксплуатации очистных сооружений. Отношение количества питательных веществ к массе микроорганизмов ( $F/M$ ) является фундаментальным параметром контроля сооружений биологической очистки, определение которого позволяет оперативно оценивать ситуацию и принимать грамотные технологические решения. Высокое значение  $F/M$  означает избыточное количество субстрата (выраженного через БПК<sub>5</sub>, БПК<sub>полн</sub> или ХПК) на единицу массы бактерий, что создает условия для высоких скоростей потребления субстрата и роста микроорганизмов. При высоком значении  $F/M$  хлопья активного ила, как правило, недостаточно крупные, что ведет к ухудшению процесса седиментации ила и, как следствие, к увеличению значения илового индекса (см. гл. 1), снижению скоростей осаждения ила во вторичных отстойниках и увеличению концентрации взвешенных веществ в очищенной воде. Низкие значения  $F/M$  приводят к снижению скорости и эффективности процессов окисления органических соединений и к ухудшению седиментационных свойств активного ила.

Рабочие значения  $F/M$  для БПК<sub>5</sub>, кг БПК<sub>5</sub>/кг БВАИ·сут:

- для высоконагружаемых аэротенков — 0,5...1,5;
- для средненагружаемых аэротенков — 0,2...0,5;
- для низконагружаемых аэротенков — 0,04...0,2.

Значения  $F/M$  определяются по следующей формуле:

$$F/M = \frac{S_i Q_d}{X(1-Z)V_{aer} N_{aer} \cdot 1000}, \quad (4.3)$$

где  $F/M$  — отношение количества питательных веществ к массе микроорганизмов, для БПК<sub>5</sub> кг БПК<sub>5</sub>/кг БВАИ·сут;

$Q_d$  — суточный расход сточных вод, поступающих на биологическую очистку, м<sup>3</sup>/сут;

$X$  — доза активного ила в аэротенке, г/л = кг/м<sup>3</sup>;

$S_i$  — концентрация рассматриваемого субстрата (значение БПК<sub>5</sub>, БПК<sub>полн</sub> или ХПК), мг/л = г/м<sup>3</sup>;

$Z$  — зольность ила, доли единицы;

$V_{aer}$  — объем одного аэротенка, м<sup>3</sup>;

$N_{aer}$  — количество работающих аэротенков.

Изначально показатель  $F/M$  был определен и использовался для технологий окисления органических соединений в аэротенках только с аэробными зонами. При реализации технологий нитриденитрификации, технологий нитри-денитрификации и удаления фосфора в ходе оперативного контроля сооружений рекомендуется определять  $F/M$  в целом на сооружение (см. формулу (4.3)). В отдельных случаях (например, при проведении технологического обследования сооружений (технологического аудита) и исследовательских работ) определяют  $F/M$  для каждой технологической зоны (анаэробной, аноксидной и аэробной), при этом учитывают количество органических соединений, поступающих в соответствующие зоны, концентрацию активного ила в рассматриваемых зонах и их объемы.

**Пример 5.** Рассчитать  $F/M$  — отношение количества питательных веществ к массе микроорганизмов в аэротенке.

Исходные данные:

- расход поступающих сточных вод за рассматриваемые сутки 13 500 м<sup>3</sup>/сут;
- объем одного аэротенка 2300 м<sup>3</sup>;
- количество работающих аэротенков 3 шт.;
- доза активного ила 3,3 г/л;
- зольность ила 0,34;

- БПК<sub>5</sub> сточных вод, поступающих на биологическую очистку, 125 мг/л.

$$F/M = \frac{125 \cdot 13\,500}{3,3(1-0,34) \cdot 2300 \cdot 3 \cdot 1000} = 0,11 \frac{\text{кг БПК}_5}{\text{кг БВАИ} \cdot \text{сут}}$$

В РФ для оценки количества загрязняющих веществ на единицу массы активного ила используют такой показатель, как нагрузка на активный ил. Нагрузка на активный ил представляет собой массу загрязняющих веществ в граммах (килограммах), приходящуюся на один грамм (килограмм) беззольного вещества активного ила в сутки:

$$q_i = \frac{S_i}{X(1-Z)t_{at} \cdot 1000}, \quad (4.4)$$

где  $S_i$  — концентрация рассматриваемого загрязнения, мг/л или г/л;  
 $X$  — доза активного ила в аэротенках, г/л;  
 $t_{at}$  — гидравлическое время нахождения сточной воды в аэротенке, ч или сут;  
 $Z$  — зольность активного ила, доли единицы.

Сравнивая формулы (4.3) и (4.4), можно увидеть, что показатели  $F/M$  и нагрузка на активный ил математически идентичны.

**Пример 6.** Рассчитать нагрузку на активный ил по БПК<sub>5</sub>.

Исходные данные:

- расход поступающих сточных вод за рассматриваемые сутки 15 000 м<sup>3</sup>/сут;
- объем аэротенка 3100 м<sup>3</sup>;
- количество работающих аэротенков 2 шт.;
- доза активного ила 2,3 г/л;
- зольность ила 0,35;
- БПК<sub>5</sub> сточных вод, поступающих на биологическую очистку, 140 мг/л.

Определяем гидравлическое время нахождения сточной воды в аэротенке:

$$t_{at} = 3100 \cdot 2 / 15\,000 = 0,41 \text{ сут, или } t_{at} = 0,41 \text{ сут} \cdot 24 \text{ ч} = 9,9 \text{ ч.}$$

Из формулы (4.4) определяем нагрузку на активный ил по БПК<sub>5</sub>:

$$q_{\text{БПК}_5} = \frac{140}{2,3(1-0,35)0,41 \cdot 1000} = 0,23 \frac{\text{г БПК}_5}{\text{г} \cdot \text{сут}} = 0,23 \frac{\text{кг БПК}_5}{\text{кг} \cdot \text{сут}}$$

Аналогично рассчитываются нагрузки на активный ил и по другим видам загрязнений.

**Возраст активного ила** (общий возраст активного ила) представляет собой отношение количества активного ила, находящегося в системе, к количеству ила, отводимого из системы (см. гл. 2):

$$\theta_{tot} = \frac{XV_{aer}N_{aer} + X_{SST}V_{sl,SST}N_{SST}}{Q_{was}X_{was}}, \quad (4.5)$$

где  $\theta_{tot}$  — общий возраст активного ила, сут;  
 $X$  — доза активного ила в аэротенке, г/л = кг/м<sup>3</sup>;  
 $V_{aer}$  — объем одного аэротенка, м<sup>3</sup>;  
 $N_{aer}$  — количество работающих аэротенков;  
 $N_{SST}$  — количество работающих вторичных отстойников;  
 $X_{SST}$  — доза осевшего активного ила во вторичном отстойнике, г/л = кг/м<sup>3</sup>;  
 $V_{sl,SST}$  — суммарный объем активного ила, осевшего во вторичных отстойниках, м<sup>3</sup>;  
 $Q_{was}$  — расход избыточного (отводимого) активного ила, м<sup>3</sup>/сут;  
 $X_{was}$  — доза избыточного (отводимого) активного ила, г/л = кг/м<sup>3</sup>.

**Пример 7.** Рассчитать общий возраст активного ила в системе.

Исходные данные:

- объем одного аэротенка 7200 м<sup>3</sup>;
- количество работающих аэротенков 4 шт.;
- доза активного ила в аэротенках 3,6 г/л;
- уровень ила во вторичных отстойниках 0,3 м;

- диаметр вторичных отстойников 40 м;
- количество вторичных отстойников 3;
- доза осевшего ила во вторичных отстойниках 8 г/л;
- расход избыточного активного ила 700 м<sup>3</sup>/сут;
- доза избыточного активного ила 8 г/л.

Определяем объем ила, осевшего в одном вторичном отстойнике:

$$V_{sl,SST} = F_{SST} h_{sl}$$

где  $h_{sl}$  — уровень ила во вторичном отстойнике;

$F_{SST}$  — площадь поверхности одного отстойника, которая для радиального отстойника определяется как

$$F_{SST} = \frac{\pi D_{SST}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 40^2}{4} = 1256 \text{ м}^2.$$

Тогда

$$V_{sl,SST} = 1256 \cdot 0,3 = 376,8 \text{ м}^3.$$

Определяем общий возраст активного ила по формуле (4.5):

$$\theta_{tot} = \frac{3,6 \cdot 7200 \cdot 4 + 8 \cdot 376,8 \cdot 3}{700 \cdot 8} = 20,1 \text{ сут.}$$

Аэробный возраст активного ила  $\theta_a$  представляет собой отношение количества активного ила, находящегося в аэробных условиях (аэробной зоне аэротенка, аэробных каналах), к количеству отводимого из системы избыточного ила (см. гл. 2):

$$\theta_a = \frac{XV_{aerob} N_{aer}}{Q_{was} X_{was}}, \quad (4.6)$$

- где  $X$  — доза активного ила в аэротенке, г/л = кг/м<sup>3</sup>;
- $V_{aerob}$  — объем аэробных зон одного аэротенка, м<sup>3</sup>;
- $N_{aer}$  — количество работающих аэротенков;
- $Q_{was}$  — расход избыточного активного ила, м<sup>3</sup>/сут;
- $X_{was}$  — доза избыточного активного ила, г/л = кг/м<sup>3</sup>.

**Пример 8.** Рассчитать аэробный возраст активного ила в системе.

Исходные данные:

- объем аэробных зон одного аэротенка 4200 м<sup>3</sup>;
- количество работающих аэротенков 4 шт.;
- доза активного ила в аэротенках 3,6 г/л;
- расход избыточного активного ила 700 м<sup>3</sup>/сут;
- доза избыточного активного ила 8 г/л.

Определяем аэробный возраст активного ила согласно формуле (4.6):

$$\theta_a = \frac{3,6 \cdot 4200 \cdot 4}{700 \cdot 8} = 10,8 \text{ сут.}$$

Для поддержания проектных значений возрастов активного ила (общего и аэробного) службам эксплуатации очистных сооружений следует обеспечивать соответствующий расход избыточного активного ила  $Q_{was}$ . Необходимый расход избыточного активного ила  $Q_{was}$  рассчитывается в день получения данных по дозам активного ила из лаборатории с учетом проектных (требуемых) значений общего возраста активного ила и аэробного возраста активного ила.

Расход избыточного активного ила  $Q_{was}$  для обеспечения проектного (требуемого) общего возраста активного ила определяется по формуле

$$Q_{was} = \frac{XV_{aer} N_{aer} + X_{SST} V_{sl,SST} N_{SST}}{\theta_{tot, design} X_{was}}, \quad (4.7)$$

где  $\theta_{tot, design}$  — проектное (требуемое) значение общего возраста активного ила, сут;

- $X$  — доза активного ила в аэротенке, г/л = кг/м<sup>3</sup>;
- $V_{aer}$  — объем одного аэротенка, м<sup>3</sup>;
- $N_{aer}$  — количество работающих аэротенков;
- $N_{SST}$  — количество работающих вторичных отстойников;
- $X_{SST}$  — доза активного ила на дне вторичного отстойника, г/л = кг/м<sup>3</sup>;

$V_{sl,SST}$  — суммарный объем активного ила, осевшего во вторичных отстойниках, м<sup>3</sup>;  
 $X_{was}$  — доза избыточного активного ила, г/л = кг/м<sup>3</sup>.

**Пример 9.** Рассчитать требуемый расход избыточного активного ила для обеспечения значения общего возраста активного ила 28 сут.

Исходные данные:

- объем аэротенка 7200 м<sup>3</sup>;
- количество работающих аэротенков 4 шт.;
- доза активного ила в аэротенках 4,0 г/л;
- уровень ила во вторичных отстойниках 0,2 м;
- диаметр вторичных отстойников 40 м;
- количество вторичных отстойников 3 шт.;
- доза ила на дне отстойников 10 г/л;
- доза избыточного активного ила 10 г/л.

Определяем объем ила, осевшего в одном вторичном отстойнике:

$$V_{sl,SST} = F_{SST} \cdot h_{sl}$$

где  $h_{sl}$  — уровень ила во вторичном отстойнике;

$F_{SST}$  — площадь поверхности одного отстойника, которая для радиального отстойника определяется, как

$$F_{SST} = \frac{\pi D_{SST}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 40^2}{4} = 1256 \text{ м}^2.$$

Тогда

$$V_{sl,SST} = 1256 \cdot 0,2 = 251,2 \text{ м}^3.$$

Определяем требуемый расход избыточного активного ила по формуле (4.7):

$$Q_{was} = \frac{4,0 \cdot 7200 \cdot 4 + 10 \cdot 251,2 \cdot 3}{28 \cdot 10} = 438,3 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Расход избыточного активного ила  $Q_{was}$  для обеспечения проектного (требуемого) значения аэробного возраста активного ила определяется по формуле:

$$Q_{was} = \frac{X V_{aerob} N_{aer}}{\theta_{a,design} X_{was}}, \quad (4.8)$$

где  $X$  — доза активного ила в аэротенке, г/л = кг/м<sup>3</sup>;

$V_{aerob}$  — объем аэробных зон одного аэротенка, м<sup>3</sup>;

$N_{aer}$  — количество работающих аэротенков;

$\theta_{a,design}$  — проектное (требуемое) значение аэробного возраста активного ила, сут;

$X_{was}$  — доза избыточного активного ила, г/л = кг/м<sup>3</sup>.

**Пример 10.** Рассчитать требуемый расход избыточного активного ила для обеспечения значения аэробного возраста активного ила 15 сут.

Исходные данные:

- объем аэробных зон одного аэротенка 4200 м<sup>3</sup>;
- количество работающих аэротенков 4 шт.;
- доза активного ила в аэротенках 4,0 г/л;
- доза избыточного активного ила 10 г/л.

Определяем расход избыточного активного ила по формуле (4.8):

$$Q_{was} = \frac{4,0 \cdot 4200 \cdot 4}{15 \cdot 10} = 448 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

**Эффективность удаления загрязняющих веществ** как в целом на канализационных очистных сооружениях, так и на отдельных сооружениях определяется по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{S_i} = \frac{S_{i,inf} - S_{i,ef}}{S_{i,inf}} 100 \%, \quad (4.9)$$

где  $\mathcal{E}_{S_i}$  — эффективность удаления рассматриваемого загрязняющего вещества  $S_i$ , %;

- $S_{i,inf}$  — концентрация рассматриваемого загрязняющего вещества  $S_i$  на входе в сооружение, мг/л;  
 $S_{i,ef}$  — концентрация рассматриваемого загрязняющего вещества  $S_i$  на выходе из сооружения, мг/л.

**Пример 11.** Определить эффективность снижения БПК<sub>5</sub> в первичных отстойниках  $\mathcal{E}_{PST}$  в аэротенках  $\mathcal{E}_{aer}$ , а также суммарную эффективность снижения БПК<sub>5</sub> в первичных отстойниках и в аэротенках  $\mathcal{E}_{PST+aer}$

Исходные данные:

- значение БПК<sub>5</sub> в сточной воде, поступающей на очистные сооружения,  $S_{PST,inf} = 310$  мг/л;
- значение БПК<sub>5</sub> в осветленной сточной воде на выходе из первичных отстойников  $S_{PST,ef} = 220$  мг/л;
- значение БПК<sub>5</sub> в очищенной воде на выходе из аэротенков (в фильтрованной пробе)  $S_{aer,ef} = 5$  мг/л.

Эффективность снижения БПК<sub>5</sub> в первичных отстойниках определяем по формуле (4.9):

$$\mathcal{E}_{PST} = \frac{S_{PST,inf} - S_{PST,ef}}{S_{PST,inf}} 100\% = \frac{310 - 220}{310} 100\% = 29\%$$

Эффективность снижения БПК<sub>5</sub> в аэротенках определяем также по формуле (4.9):

$$\mathcal{E}_{aer} = \frac{S_{aer,inf} - S_{aer,ef}}{S_{aer,inf}} 100\% = \frac{220 - 5}{220} 100\% = 97,7\%$$

Суммарная эффективность снижения БПК<sub>5</sub> в первичных отстойниках и аэротенках:

$$\mathcal{E}_{PST+aer} = \frac{S_{PST,inf} - S_{aer,ef}}{S_{PST,inf}} 100\% = \frac{310 - 5}{310} 100\% = 98,4\%$$

**Определение значений БПК<sub>полн</sub>/N/P в сточных водах,** поступающих на биологическую очистку, в ходе оперативного контроля очистных сооружений производится в день получения данных соот-

ветствующих анализов из лаборатории. Как было показано в п. 1.2.5, для создания рабочих условий роста микроорганизмов в сточной воде должно быть достаточное количество биогенных элементов, и значения БПК<sub>полн</sub>/N/P должны быть не более чем 100/5/1. Следовательно, БПК<sub>полн</sub>/N = 100/5 должно быть не более 20, а БПК<sub>полн</sub>/P — не более 100. В [6] указано, что «содержание биогенных элементов не должно быть менее 5 мг/л азота N и 1 мг/л фосфора P на каждые 100 мг/л БПК<sub>полн</sub>». В странах Западной Европы данное соотношение принимается не для БПК<sub>полн</sub>, а для БПК<sub>5</sub> — БПК<sub>5</sub>/N/P. Соотношение БПК<sub>полн</sub>/N > 20 означает, что на каждые 100 мг/л БПК<sub>полн</sub> концентрация азота составляет менее 5 мг/л, что недостаточно для создания рабочих условий культивирования микроорганизмов. Аналогично, при БПК<sub>полн</sub>/P > 100 на каждые 100 мг БПК<sub>полн</sub> приходится менее 1 мг фосфора, что также недостаточно для роста микроорганизмов. Как было показано в предыдущих главах, недостаток биогенных элементов в поступающих на биологическую очистку сточных водах приводит, в лучшем случае, к снижению эффективности биохимических процессов очистки сточных вод и развитию процессов вспухания активного ила и пенообразования. В случае же постоянного недостатка питательных веществ в поступающих сточных водах происходит полный срыв биологических процессов очистки.

Достаточность азота в поступающих на биологическую очистку сточных водах определяется сравнением их значений с минимально требуемыми концентрациями N и P.

Минимально требуемая концентрация азота определяется:

$$N_{req} = \frac{\text{БПК}_{полн, inf}}{\left(\frac{\text{БПК}_{полн}}{N}\right)_{req}}, \quad (4.10)$$

где  $N_{req}$  — минимально требуемая концентрация азота в поступающих на биологическую очистку сточных водах, мг/л;

$\text{БПК}_{полн, inf}$  — значение БПК<sub>полн</sub> в поступающих на биологическую очистку сточных водах, мг/л;

$(\text{БПК}_{полн}/N)_{req}$  — требуемое отношение БПК<sub>полн</sub> к N, не более 20.



Минимально требуемая концентрация фосфора в поступающих на биологическую очистку сточных водах определяется по формуле:

$$P_{req} = \frac{БПК_{полн, inf}}{\left(\frac{БПК_{полн}}{P}\right)_{req}}, \quad (4.11)$$

где  $P_{req}$  — минимально требуемая концентрация фосфора в поступающих на биологическую очистку сточных водах, мг/л;

$БПК_{полн, inf}$  — значение  $БПК_{полн}$  в поступающих на биологическую очистку сточных водах, мг/л;

$(БПК_{полн}/P)_{req}$  — требуемое отношение  $БПК_{полн}$  к  $P$ , которое должно быть не более 100.

Затем производят сравнение  $N_{req}$  с концентрацией азота в поступающих на биологическую очистку сточных водах  $N_{inf}$  и  $P_{req}$  — с концентрацией фосфора  $P_{inf}$ . Если  $N_{inf} \geq N_{req}$ , то количество азота в поступающих сточных водах достаточно для роста микроорганизмов и дополнительного дозирования источника азота не требуется. При  $N_{inf} < N_{req}$  однозначно требуется дозирование внешнего источника азота. Аналогично определяются необходимость дозирования внешнего источника фосфора.

Количество внешних источников азота и фосфора определяется исходя из разницы требуемых концентраций  $N$  и  $P$  для реализации биохимических процессов ( $N_{req}$  и  $P_{req}$ ) и реальных данных качественного состава поступающих на биологическую очистку сточных вод  $N_{inf}$  и  $P_{inf}$ :

$$N_{add} = N_{req} - N_{inf}, \quad (4.12)$$

где  $N_{add}$  — дополнительная концентрация азота, мг/л, которую должен обеспечивать внешний источник азота.

$$P_{add} = P_{req} - P_{inf}, \quad (4.13)$$

где  $P_{add}$  — дополнительная концентрация фосфора, мг/л, которую должен обеспечивать внешний источник фосфора.

Далее определяется суточное количество азота:

$$Q_{Nd, add} = N_{add} Q_d, \quad (4.14)$$

где  $Q_{Nd, add}$  — суточное количество азота, которое необходимо дозировать в систему, г/сут;

$Q_d$  — суточный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/сут;

и фосфора, которое требуется дозировать в систему:

$$Q_{Pd, add} = P_{add} Q_d, \quad (4.15)$$

где  $Q_{Pd, add}$  — суточное количество фосфора, которое необходимо дозировать в систему, г/сут;

$Q_d$  — суточный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/сут.

Расчет суточного количества дополнительного источника азота (готового коммерческого продукта) рассчитывается как отношение суточного количества азота, которое необходимо дозировать в систему (4.14), к процентному содержанию азота в используемом коммерческом продукте с учетом концентрации в водном растворе самого коммерческого продукта. Этот же подход используется при расчете готового коммерческого продукта — источника фосфора.

**Пример 12.** Оценить необходимость в дополнительном дозировании источников азота и фосфора и в случае необходимости рассчитать суточное количество готовых продуктов — источников азота и фосфора (в качестве коммерческих продуктов — источников азота и фосфора — рассмотреть безводный аммиак и фосфорную кислоту).

Исходные данные:

- суточный расход сточных вод 30 000 м<sup>3</sup>/сут;
- значение  $БПК_{полн}$  в сточных водах, поступающих на биологическую очистку, 220 мг/л;
- концентрация ТKN в сточных водах, поступающих на биологическую очистку, 4,0 мг/л;
- концентрация  $P$  в сточных водах, поступающих на биологическую очистку, 1,0 мг/л;

- продукты, используемые в качестве дополнительных источников азота и фосфора: безводный аммиак ( $\text{NH}_3$ ) с содержанием в товарном продукте 80 % по весу; фосфорная кислота ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) = 50 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$  раствора по весу (удельный вес 1,335).

Определяем требуемую минимальную концентрацию азота в сточных водах, поступающих на биологическую очистку, при значении БПК<sub>полн</sub> = 220 мг/л:

$$N_{req} = \frac{220}{\left(\frac{100}{5}\right)_{r_{req}}} = \frac{220}{20} = 11 \text{ мг/л.}$$

Требуемая минимальная концентрация фосфора для рассматриваемых сточных вод:

$$P_{req} = \frac{220}{\left(\frac{100}{1}\right)_{r_{req}}} = \frac{220}{100} = 2,2 \text{ мг/л.}$$

Таким образом, для рассматриваемых сточных вод минимальные концентрации азота и фосфора должны составлять 11 и 2,2 мг/л соответственно. С учетом того, что в сточных водах концентрация ТKN составляет 4,0 мг/л, а Р — 1,0 мг/л, рассчитываем дополнительные концентрации азота и фосфора, которые должны быть обеспечены внешними источниками биогенных элементов:

$$N_{add} = 11 - 4 = 7 \text{ мг/л и } P_{add} = 2,2 - 1,0 = 1,2 \text{ мг/л.}$$

Суточная потребность в дополнительных количествах азота и фосфора составляет:

$$Q_{Nd,add} = 7 \cdot 30\,000 = 210\,000 \text{ г/сут, или } 210 \text{ кг/сут.}$$

$$Q_{Pd,add} = 1,2 \cdot 30\,000 = 36\,000 \text{ г/сут, или } 36 \text{ кг/сут.}$$

Суточное количество безводного аммиака  $\text{NH}_3$  составит:

$$Q_{\text{NH}_3,d} = \frac{210}{\left(\frac{14}{17}\right)} = 255 \text{ кг/сут.}$$

Количество товарного продукта составит:

$$255/0,8 = 319 \text{ кг/сут.}$$

Суточное количество фосфорной кислоты составит:

$$Q_{\text{H}_3\text{PO}_4,d} = \frac{36}{\left(\frac{31}{98}\right)} = 44 \text{ кг/сут,}$$

$$\text{количество товарного продукта: } \frac{44}{0,5 \cdot 1,335} = 66 \text{ кг/сут.}$$

#### 4.2. Нештатные и аварийные ситуации.

##### Примеры возможных проблем и пути их решения

Главная задача технологического управления в нештатных и аварийных ситуациях заключается в поддержании стабильности технологического процесса и выполнении заданных технических, экологических и экономических норм процесса. Нештатная ситуация — ситуация, при которой технологический процесс или состояние оборудования выходит за рамки нормального функционирования и может привести к аварии. Аварийная ситуация — ситуация, когда произошла авария и возможно дальнейшее ее развитие. Авария — опасное событие, состоящее во внезапном разрушении каких-либо элементов технических устройств и/или строительных сооружений или в опасном нарушении нормального режима работы или течения каких-либо процессов [123].

Как нештатные, так и аварийные ситуации на канализационных очистных сооружениях можно разделить на два уровня: локальный и глобальный. Локальный уровень затрагивает нарушение работы одного сооружения, глобальный — блока сооружений или канализационных очистных сооружений в целом. Причиной аварийных ситуаций локального уровня являются, как правило, нарушения внутри системы, глобального — внешние воздействия.

На рис. 4.19, 4.20 приведены примеры глобальных и локальных нештатных ситуаций.

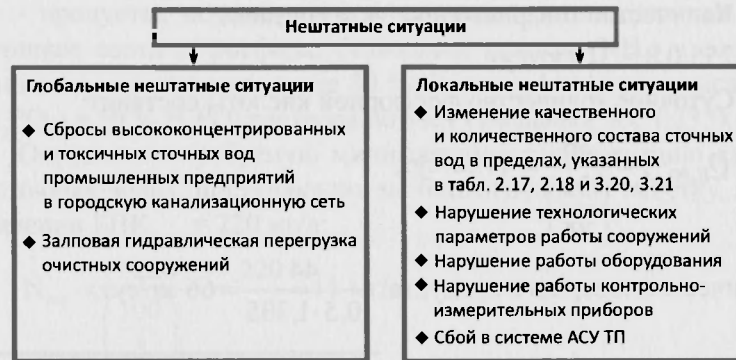


Рис. 4.19. Классификация возможных нештатных ситуаций на канализационных очистных сооружениях

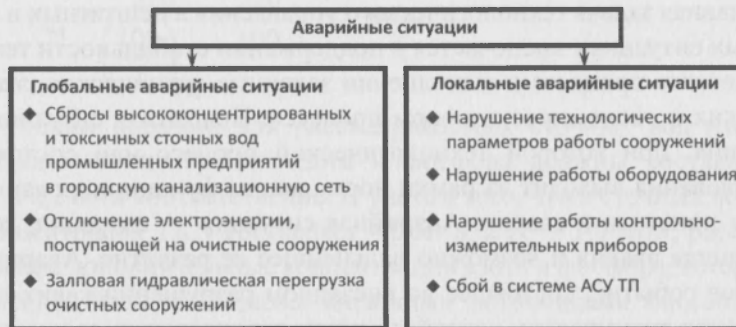


Рис. 4.20. Классификация возможных аварийных ситуаций на канализационных очистных сооружениях

В табл. 4.3 приведены примеры нештатных ситуаций локального уровня на сооружениях биологической очистки сточных вод и необходимые действия служб эксплуатации при их возникновении.

Аварийные ситуации локального уровня на очистных сооружениях развиваются, как правило, при недостаточном внимании к нештатным ситуациям локального уровня. Действия по устранению локальных аварийных ситуаций требуют больших затрат как людских, так и материальных ресурсов по сравнению с устранением последствий локальных нештатных ситуаций.

Таблица 4.3. Примеры нештатных ситуаций локального уровня на сооружениях биологической очистки сточных вод

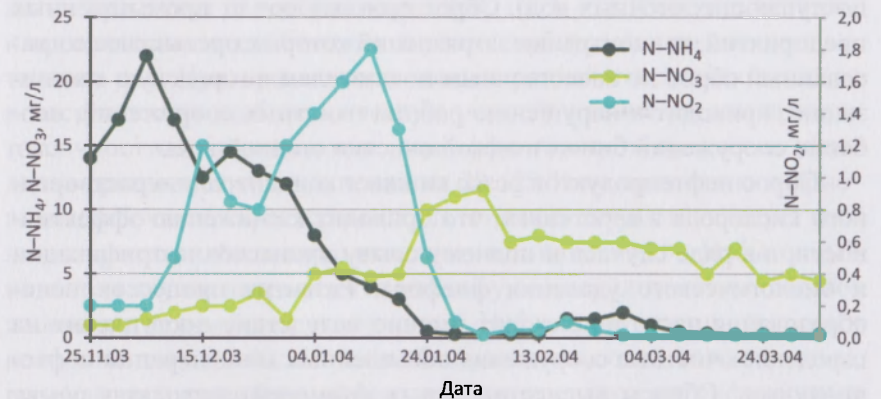
| Последствия   | Действия по устранению нештатной ситуации   |
|---|---|
| <b>Разовые превышения нагрузок по БПК<sub>5</sub> (БПК<sub>полн</sub>, ХПК) проектных значений более чем на 15 %</b>  |   |
| Увеличение прироста активного ила, возможна недостаточность количества кислорода на реализацию биохимических процессов  | Снизить до минимально возможного уровень осадка в первичных отстойниках, обеспечить равномерное распределение гидравлической нагрузки по всем аэротенкам, увеличить дозу активного ила, обеспечив контроль качества очищенной воды на выходе из вторичных отстойников по взвешенным веществам до 3 раз в сутки. При превышении проектных значений концентрации взвешенных веществ необходимо увеличить расход избыточного активного ила. Последний при этом не должен превышать расчетное значение (формулы (4.7), (4.8)), которое обеспечивает проектный возраст активного ила. Увеличить расход воздуха на аэротенки для обеспечения регламентного значения концентрации растворенного кислорода в контрольных точках |
| <b>Превышение расчетного значения расхода избыточного активного ила, обеспечивающего проектное значение возраста активного ила</b>  |   |
| Значение возраста активного ила ниже проектного значения для текущей температуры  | Расчитать требуемое значение расхода избыточного активного ила, обеспечивающего проектное значение возраста активного ила исходя из текущей ситуации (формулы (4.7), (4.8))   |
| <b>Неравномерное распределение сточной воды по аэротенкам</b>   |   |
| Дозы активного ила в аэротенках могут существенно различаться. В аэротенках с низкими дозами активного ила наблюдается недостаточная эффективность процессов, в первую очередь нитрификации, что приводит к существенным превышениям концентраций качественных характеристик очищенной воды в данных аэротенках. Как следствие, качественные характеристики общего потока очищенной воды превышают требуемые значения | Отрегулировать равномерность подачи сточной воды во все аэротенки   |
| <b>Превышение проектного значения расхода возвратного активного ила</b>   |   |
| Доза активного ила в потоке возвратного ила снижается   | Обеспечить проектное значение расхода возвратного активного ила   |
| <b>Нарушение работы аэрационной системы аэротенков</b>  |   |
| Единичные вырывы или разрывы мембран аэраторов (при количестве вырванных или разорванных мембран не более 5 % от общего числа аэраторов в аэротенке)  | Проведение визуального мониторинга вырывов и/или разрывов мембран аэраторов еженедельно. При количестве вырванных или разорванных мембран более 5 % ситуация переходит в разряд аварийной, что требует вывода аэротенка из работы, опорожнения и замены аэраторов   |

**Таблица 4.4.** Примеры аварийных ситуаций локального уровня на сооружениях биологической очистки сточных вод

| Вид оборудования   | Аварийная ситуация   | Действия по устранению аварии  |
|--|--|--|
| 1. Аэрационная система аэротенков — аэраторы и распределительные воздуховоды | Вырывы или разрывы мембран аэраторов                       | При количестве вырванных или разорванных мембран более 5 % от общего числа аэраторов в аэротенке — вывод аэротенка из работы, опорожнение и замена аэраторов |
|  | Вырыв аэрационной распределительной решетки в аэротенке    | Вывод аэротенка из работы, опорожнение аэротенка и замена крепежа плети  |
|  | Разрыв стояка или аэрационной плети                        | Вывод аэротенка из работы, опорожнение аэротенка и замена стояка   |
| 1а. Задвижки с ручным управлением подачи воздуха на стояках                  | Выход из строя   | Вывод аэротенка из работы и замена запорной арматуры   |
| 1б. Задвижки с ручным управлением подачи воздуха на магистрали               | Выход из строя   | Отключение подачи воздуха, замена задвижки   |
| 2. Система удаления ила из отстойников                                       | Выход из строя илососов                                    | Вывод отстойника из работы и проведение ремонтных работ  |
|  | Выход из строя илоскреба                                   |  |
|  | Выход из строя подшипника камеры иловой трубы              |  |
|  | Выход из строя приводной тележки                           |  |
| 3. Осевой насос  | Выход из строя электрического оборудования. Поломка насоса | Вывод отстойника из работы и проведение ремонта оборудования   |

Рассматривая нештатные и аварийные ситуации глобально уровня, следует отметить, что граница между ними достаточно условная и определяется, как правило, не изначальными факторами развития ситуации, а ее последствиями. Последствия же, не в последнюю очередь, зависят от эффективности и оперативности действия технологов и инженеров, эксплуатирующих канализационные очистные сооружения.

**Пример 1. Нештатные ситуации, связанные с аккумуляцией нитритов.** Как показывает и опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод, реализующих технологии удаления биогенных элементов, и теоретические аспекты процессов нитрификации (см. гл. 2), существенное увеличение нитритов в очищенной воде наблюдается в температурном интервале от 10 до 17 °С [124]. Температура иловой смеси в аэротенках менее 10 °С может быть причиной увеличения нитритов в очищенной воде до 5...9 мг/л. Необходимо отметить, что температура, при которой реализуется процесс биологической очистки в реальных условиях эксплуатации, является параметром, на который практически невозможно влиять. Следовательно, при расчете объемов и технологических схем сооружений, предназначенных для биологической очистки сточных вод, необходимо корректно учитывать минимальную температуру сточной воды.



**Рис. 4.21.** Типовая динамика качества очищенной воды в аэротенках городских очистных сооружений в период запуска сооружения в эксплуатацию

В период пуско-наладочных работ (на начальном этапе эксплуатации аэротенков) при низком содержании нитрифицирующих микроорганизмов в активном иле имеет место подавление процесса нитрификации. Причиной являются высокие удельные нагрузки

по аммонийному азоту на бактерии-нитрификаторы, что приводит к ингибированию нитрификации. Активность бактерий 1-й стадии, более устойчивых к действию ингибирующих факторов, приводит к аккумуляции азота нитритов в очищенной воде. По мере нарастания количества нитрифицирующих микроорганизмов в активном иле удельные нагрузки на бактерии-нитрификаторы снижаются, происходит снижение концентрации аммонийного азота и возрастает активность популяции микроорганизмов, окисляющих нитриты. В результате в очищенной воде снижается концентрации нитритов и повышается концентрация азота нитратов (рис. 4.21).

**Пример 2. Залповые сбросы высокотоксичных сточных вод на очистные сооружения.** На городские канализационные очистные сооружения может поступать до 30...35 % сточных вод от промышленных предприятий (в некоторых городах количество производственных сточных вод достигает 50 % и более от общего количества поступающих сточных вод). Сброс сточных вод от промышленных предприятий, концентрации загрязнений которых превышают согласованный сброс по качественным показателям в городскую канализацию, приводит к нарушению работы очистных сооружений, особенно сооружений биологической очистки сточной воды.

Сброс нефтепродуктов резко снижает концентрацию растворенного кислорода в аэротенках, что приводит к снижению эффективности, а в ряде случаев и полному срыву процессов нитрификации и биологического удаления фосфора. Развитие процессов пенообразования часто происходит именно вследствие поступления на городские очистные сооружения повышенных концентраций нефтепродуктов. Сбросы высокотоксичных примесей приводят к срыву процессов нитрификации, денитрификации, биологического удаления фосфора и снижению эффективности окисления углеродсодержащих соединений.

Залповые сбросы сточных вод с высоким содержанием минеральных примесей приводят к увеличению зольности активного ила и, как следствие, к увеличению его прироста. В этом случае для обеспечения требований к качеству очищенной воды по взвешенным веществам приходится увеличивать расход избыточного активного

ила, что приводит к снижению значения аэробного возраста ила и к полному срыву процесса нитрификации. Увеличение зольности активного ила приводит также к снижению эффективности биохимических процессов при поддержании заданной дозы активного ила.

Концентрации тяжелых металлов, превышающие предельные значения (см. п. 1.2.5, 2.2.3, 2.2.6, 3.2.5), токсичны для биохимических процессов очистки сточных вод и не позволяют в дальнейшем использовать осадки сточных вод в сельском хозяйстве и при изготовлении почвогрунтов.

При попадании токсичных веществ в сточные воды происходит ингибирование активности микроорганизмов активного ила, которое выражается по-разному, в зависимости от природы данных веществ: ингибирование процессов нитрификации, денитрификации, аэробного окисления органических соединений, биологического удаления фосфора. Токсичные вещества также являются провокаторами развития процессов пенообразования (см. гл. 1—3). Тяжелые металлы и органические ксенобиотики хорошо сорбируются на хлопках активного ила. При превышении концентрацией токсичных веществ в поступающих на биологическую очистку сточных водах предела токсичности и снижении при этом эффективности процессов окисления органических соединений на 20...25 % по сравнению с фоновыми (рабочими, характерными для штатных ситуаций) следует увеличить расход избыточного активного ила на 30...50 %. Избыточный ил в этом случае направляется на сооружения уплотнения и обезвоживания с дальнейшей утилизацией. Нефтепродукты при залповых концентрациях до 40...60 мг/л обладают невысокой токсичностью, но вызывают снижение эффективности процесса нитрификации и образование пены. В этом случае для повышения эффективности процесса нитрификации следует на 15...20 % увеличить расход подаваемого в аэротенки воздуха. При развитии процесса пенообразования в данной ситуации рекомендуется механическое удаление пены и ее складирование с обработкой сорбентом (например, торфом).

Токсичные биоразлагаемые органические вещества (см. гл. 2) могут быть обезврежены биологически. В этом случае рекомендуется увеличить процент регенерации активного ила до максимально

возможного, повысить до максимально возможной (с учетом эффективности работы вторичных отстойников) дозу активного ила и обеспечить значение возраста активного ила до 35 сут.

**Пример 3. Отключение электроэнергии.** При отключении энергоснабжения очистных сооружений и отсутствии автономного источника электроэнергии необходимо, по возможности, перевести аэротенки на схему работы с минимальным процентом регенерации активного ила. Если перерыв в подаче электроэнергии был от 8 до 16 ч, то после возобновления подачи электроэнергии требуется обеспечить концентрацию растворенного кислорода не ниже 2,0...2,5 мг/л в контрольных точках аэротенка и увеличить в первые трое суток расход осадка первичных отстойников до максимально возможного значения. Если перерыв в подаче электроэнергии был 16...30 ч, то после возобновления подачи электроэнергии требуется обеспечить концентрацию растворенного кислорода до 3,0...3,5 мг/л в контрольных точках аэротенка и увеличить в первые трое суток расход осадка первичных отстойников до максимально возможного значения. Кроме того, требуется обеспечить максимально возможный расход избыточного активного ила, что позволит полностью обновить активный ил за минимально короткий период времени. При перерыве в подаче электроэнергии более 30...36 ч необходимо решать вопрос о полной замене массы активного ила в аэротенках на активный ил из других очистных сооружений. При невозможности полной замены массы активного ила необходимо применять действия, описанные в ситуации прекращения подачи электроэнергии на 16...30 ч. При этом время наращивания активной биомассы может достигать нескольких недель.

В [121] описана ситуация, сложившаяся на Курьяновских и Люберецких очистных сооружениях при энергоаварии в Москве 25 мая 2005 г., последствия и действия служб эксплуатации данных очистных сооружений. При отключении энергоснабжения очистных сооружений подача воздуха в аэротенки отключается, и активный ил, успевший сорбировать на себя основную часть органических веществ, оседает на дно аэротенков. В аэротенке при этом находится достаточно чистая сточная вода, которая начинает постепенно вытесняться

продолжающей поступать в аэротенки сточной водой. В результате после шестичасового перерыва в работе аэротенков Курьяновских очистных сооружений БПК<sub>полн</sub> отводимых сточных вод за сутки возросло с 4 до 12 мг/л при БПК<sub>полн</sub> поступающих сточных вод 60 мг/л.

*Опыт эксплуатации сооружений в условиях отключения их энергоснабжения позволяет сделать вывод, что при перерыве в подаче электроэнергии на канализационные очистные сооружения менее чем 5...7 ч наиболее эффективным решением, с экологической точки зрения, является продолжение приема сточных вод в аэротенки.*

В результате анализа динамики восстановления процесса биологической очистки на Люберецких очистных сооружениях по аммонийному азоту установлено, что период восстановления нитрификационной способности активного ила составляет около трех суток.

Принципиальным решением повышения надежности очистных сооружений при отключениях энергоснабжения является создание на них автономного резервного источника энергоснабжения.

**Пример 4. Технические неисправности сооружений.** При анализе технической неисправности узлов сооружений биологической очистки сточных вод необходимо оценивать степень их влияния на эффективность (или возможность) реализации биохимических процессов в аэротенках. В табл. 4.5 даны примеры технических неисправностей сооружений биологической очистки сточных вод и их влияние на эффективность и возможность реализации биохимических процессов.

Одним из важнейших принципов поиска и устранения технологических и технических проблем в ходе эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод является общий анализ ситуации, поиск возможных причин и действия по устранению проблемы. При этом отклик системы биологической очистки на проведенные действия составляет до 10...14 сут. В табл. 4.6 мы обобщили возможные технологические и технические проблемы эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод и дали рекомендации по их устранению.



Окончание табл. 4.5

| Технические неполадки                            | Причины   | Возможное влияние на процесс   |
|--|---|--|
| Выход из строя анализатора концентрации нитратов | - Поломка анализатора;<br>- нарушение цепей передачи                    | Ухудшение качества очистки сточных вод по нитратам из-за невозможности регулирования расхода нитратного рецикла  |
| Выход из строя расходомера возвратного ила       | Поломка датчика или вторичного прибора                                  | Отсутствие правильного учета количества возвратного ила, невозможность регулирования расхода возвратного активного ила и, как следствие, снижение эффективности процесса нитрификации              |
| Выход из строя расходомеров в воздухе            | Неисправность импульсных линий или вторичного прибора                   | - Отсутствие возможности подержания заданного режима подачи воздуха в аэротенки и, как следствие, снижение эффективности биохимических процессов;<br>- отсутствие приборного учета расхода воздуха |
| Выход из строя АСУ                               | Поломка компьютера  | - Невозможность работы сооружений блока в автоматическом режиме;<br>- ухудшение качества очистки сточных вод   |
| Выход из строя затвора на канале очищенной воды  | —   | Невозможность регулирования нагрузок на сооружения доочистки и обеззараживания   |
| Разрушение канала                                | Нарушение герметичности дна и стенок канала                             | - Нарушение работы блока;<br>- срыв качественных показателей очистки сточных вод   |
| <b>Механизм удаления ила из отстойников</b>      |   |  |
| Выход из строя илоскребов                        | Отрав илоскреба   | - Наружное воздействие ила<br>- увеличение концентрации вредных веществ в очищенной воде   |
| Выход из строя питательного электрокабеля        | - Длительная эксплуатация питающего кабеля;<br>- обрыв питающего кабеля | Увеличение концентрации взвешенных веществ в очищенной воде  |

Таблица 4.6. Возможные технологические и технические проблемы эксплуатации сооружений биологической очистки и пути их решения

| Вероятная причина   | Контроль и мониторинг  | Решения  |
|---|--|--|
| <b>1. Хлопки ила поднимаются на поверхность вторичных отстойников*</b>  |  |  |
| 1а. В активном иле присутствуют филаментные микроорганизмы (всплывающие хлопья ила см. гл. 1)   | 1а. Мониторинг ила должен проводиться на уровне филаментных микроорганизмов  | 1а. Увеличить концентрацию растворенного кислорода (см. гл. 1);<br>- увеличить расход избыточного активного ила, обеспечив в аэротенке и ламинаризации в аэротенках технологический нитри-денитрификационный цикл;<br>- увеличить расход избыточного активного ила, который не приводит к снижению значения активного ила ниже проектного для текущей температуры сточных вод;<br>- проверить соотношение БПК <sub>полн</sub> /N/P в поступающей сточной воде, которое должно быть не более 100/5/1. При необходимости добавить внешний источник азота и или фосфора;<br>- добавить 5...10 мг/л хлора для снижения значения илового индекса менее 16) см <sup>3</sup> /г или 50...200 мг/л перекиси водорода с ежедневным контролем данного показателя. После достижения значения илового индекса менее 16) продолжать ежедневный контроль данного показателя в течение 3...4 дней;<br>- увеличить значение pH до 6,5, включив систему контроля и корректировки pH |
| 1б. Деятельность отстойников вторичных отстойников обусловлена газобульностью азота при динитрогенной активности вторичного отстойника; вместе с хлопьями активного ила | 1б. Определить концентрацию NO <sub>x</sub> в фильтрованной пробе иловой смеси, поступающей во вторичные отстойники (или на выходе из аэротенки в) | 1б. Увеличить расход возвратного активного ила, срезив ил, находящийся осевшего ила во вторичных отстойниках до 1,5...2,0 ч<br>- увеличить концентрацию растворенного кислорода на выходе из аэротенков до 3,5...4,0 мг/л;<br>- снизить уровень ила во вторичных отстойниках до 0,2...0,3 м<br>- проверить эффективность работы насосов, их механизмов на предмет отсутствия обратных потоков ила в аэротенки, из которых не происходит удаление ила   |





Окончание табл. 4.6

| Вероятная причина  | Контроль и мониторинг  | Решения   |
|--|--|---|
| <b>5. Активный ил периодически (в залповом режиме) переливается через водосливы вторичных отстойников</b>  |  |   |
| Неравномерное распределение гидравлической нагрузки по вторичным отстойникам, что приводит к гидравлической перегрузке: старые сооружения в часы максимального притока сточных вод | Водосливы вторичных отстойников  | - Следует отрегулировать распределение иловой смеси по отстойникам<br>- деление по отстойникам<br>- провести работы по выравниванию уровня водосливов (при необходимости)   |
| <b>6. Значение pH иловой смеси опускается ниже 6.5 активный ил визуально менее плотный по сравнению с рабочим состоянием</b>   |  |   |
| 6а. Медленный процесс нитрификации: изменение щелочности в результате поступления сточных вод ниже, чем необходимо для удаления азотной концентрации аммония                       | 6а. Концентрация $\text{NH}_4^+$ в поступающей на биологическую очистку сточной воде и щелочность в воде поступающей на биологическую очистку: тоновой воды и очищенной воды | 6а. Обеспечить подачу внешнего источника щелочности (например, гидрокарбонат натрия)  |
| 6б. Низкое значение pH в поступающей сточной воде  | 6б. pH в поступающей сточной воде  | 6б. Определить источник поступления кислотных стоков и обеспечить прекращение их сброса на очистные сооружения;<br>- установить систему регулирования pH в точках впадения биологической очистки;<br>- обеспечить подачу внешнего источника щелочности (например, гидроксид натрия) |

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>7. Низкая доза активного ила в потоке возвратного активного ила</b>     |   |   |
| 7а. Повышенный расход возвратного активного ила                            | 7а. Доза активного ила в потоке возвратного активного ила   | 7а. Снизить расход возвратного активного ила  |
| 7б. Развитие filamentных микроорганизмов                                   | 7б. Микропирирование концентрации раствора кислорода в рабочих зонах аэротенка, pH опережения соотношения $\text{BPK}_{\text{полн}}/\text{N/P}$ | 7б. Увеличить концентрацию растворенного кислорода (см. гл. 1);<br>- скорректировать pH;<br>- скорректировать $\text{BPK}_{\text{полн}}/\text{N/P}$ ;<br>- дополнительные меры притягивания — см. гл. 1 |
| <b>8. «Мертвые» зоны в аэротенках</b>                                      |   |   |
| 8а. Вырывы и разрывы аэраторов   | 8а. Визуальный контроль аэраторов   | 8а. Замена аэраторов, установка воздушных фильтров на воздуховоде после воздушного потока   |
| 8б. Низкая интенсивность перемешивания иловой смеси                        | 8б. Сравнение значений дозы ила на поверхности и на дне аэротенков  | 8б. Увеличить интенсивность аэрации   |
| 8с. Задвижки на подводных стояках аэрационной системы плохо отрегулированы | 8с. Визуальный контроль герметичности перемешивания   | 8с. Отрегулировать задвижки на подводящих стояках аэрационной системы   |
| 8д. Количество азота в аэротенке не соответствует необходимому количеству  | 8д. Расчет необходимого количества аэротенков, проектирование в подводящих воздуховодах   | 8д. Добавить необходимое количество аэраторов и увеличить расход воздуха в аэротенки  |

\* Более детально причины всплывания и пенобразования и пути решения данной проблемы рассмотрены в гл. 1.

### 4.3. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод. Динамическая модель OxiD®

В настоящее время возросший интерес специалистов к вопросам моделирования сооружений очистки сточных вод объясняется тем, что проектирование, реализация и отладка новых технологических решений невозможны без тщательных предварительных технологических и инженерных расчетов.

Большинство используемых сегодня в мировой практике моделей для расчета канализационных очистных сооружений представляют собой статические модели, в основе которых лежат дифференциальные уравнения, описывающие рассматриваемые процессы в реакторах полного смешения или вытеснения. Уравнения при этом решаются традиционными методами дифференциальных исчислений. Статические модели описывают широкий круг вопросов, однако они не позволяют оценить реакцию сооружений на нестационарность поступающей нагрузки и, как следствие, определить конструктивные и технологические решения, позволяющие минимизировать флуктуации качественных показателей очищенной воды в условиях реальных колебаний входных загрязнений.

Опыт эксплуатации аэротенков, реализующих технологии удаления биогенных элементов, показывает, что данные сооружения более чувствительны к колебаниям поступающей нагрузки по сравнению с технологиями, рассчитанными только на окисление органических соединений. В результате задача как проектировщиков, так и служб эксплуатации состоит в принятии конструктивных, технических и технологических решений, стабильно обеспечивающих требуемый эффект очистки в реальных условиях колебаний поступающей нагрузки для рассматриваемых очистных сооружений. Задачи, связанные с колебаниями поступающих загрязнений, могут быть решены только с помощью динамических моделей, которые позволяют количественно оценить реакцию сооружений на любой вид нестационарности входных потоков. Использование динамических моделей позволяет рассчитать конструктивные, технические и технологические параметры сооружений, которые будут стабильно обеспечивать заданное качество очищенных вод при реальной динамике входных потоков.

Динамическая модель OxiD® [125—129] для расчета сооружений биологической очистки сточных вод, в том числе от азота и фосфора, разработанная автором, позволяет решать вышеперечисленные задачи. OxiD позволяет моделировать процессы нитрификации, денитрификации, биологического и химического удаления фосфора и окисления органических соединений. Модель дает возможность описывать (проектировать) сооружения любого гидродинамического профиля, то есть работать с произвольным количеством ячеек идеального смешения, которые представляют собой набор анаэробных, аноксидных и аэробных зон, соединенных в любой комбинации с произвольной конфигурацией рециклов.

Основным отличием динамической модели OxiD от существующих сегодня моделей является возможность проведения частотного анализа динамики качественного состава сточных вод, поступающих в аэротенки, по любому качественному параметру сточных вод  $S$  для расчета как конструктивных, так и технологических параметров работы сооружений, которые обеспечивают стабильное качество очистки для конкретных сточных вод. В результате анализа динамики качественных характеристик сточных вод определяются такие параметры, как математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, корреляционная функция, и, в результате, спектральная плотность рассматриваемых качественных характеристик сточных вод. Спектральная плотность  $\Phi(S)$  характеризует частотный состав процесса колебаний качественных характеристик сточных вод и имеет размерность квадрата исследуемой величины в рассматриваемом диапазоне частот  $((\text{мг/л})^2 \cdot \text{ч})$ .

Максимум спектральной плотности позволяет оценить диапазон частот, которые преобладают в спектре входных колебаний качественного состава сточных вод. Очевидно, что для обеспечения стабильного качества очистки аэротенки должны максимально «гасить» колебания рассматриваемых загрязнений как раз в диапазоне частот, соответствующих максимумам спектральной плотности. Использование метода динамического моделирования позволяет рассчитывать передаточную функцию, амплитудно- и фазово-частотные характеристики проектируемого (или существующего) аэротенка.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) показывает, во сколько раз сооружение снижает амплитуду колебаний загрязнений входящих стоков в зависимости от частоты этих колебаний. Чем ниже значение АЧХ в области частот, преобладающих в спектре входных колебаний качественного показателя сточной воды, тем стабильнее по данному параметру работают аэротенки.

Модель OxiD состоит из нескольких расчетных блоков. Первый блок модели позволяет количественно оценить динамику колебаний рассматриваемых концентраций  $S_i$  и определить диапазон частот, которые преобладают в спектре входных колебаний качественного состава рассматриваемых сточных вод, поступающих в аэротенки.

В модели используется математический аппарат случайных величин, с помощью которого определяются: корреляционная функция  $R(\tau)$ , математическое ожидание  $M(S_i)$ , дисперсия  $D(S_i)$ , спектральная плотность  $\Phi_S(\omega)$  и нормированная корреляционная  $\rho_S(\tau)$  функция рассматриваемого ряда значений концентраций загрязнений  $S_i$ .

Математическое ожидание  $M(S_i)$   $N$  дискретных значений концентраций рассматриваемого вещества  $S_i$  представляет собой сумму парных произведений всех возможных значений концентраций рассматриваемого загрязнителя  $S_{i,j}$  на соответствующие им вероятности  $p_{i,j}$ :

$$M(S_i) = \sum_{j=1}^N S_{i,j} p_{i,j}. \quad (4.16)$$

Анализируя данные непрерывного аналитического контроля качественных показателей сточных вод, для определения математического ожидания используют следующую формулу:

$$M(S_i) = \int_{j=1}^N S_{i,j} \varphi(S_i) dS_i, \quad (4.17)$$

где  $\varphi(S)$  — плотность распределения непрерывных значений концентраций рассматриваемых загрязнений.

Дисперсия рассматриваемых значений концентраций загрязнений характеризует меру разброса значений относительно их математического ожидания:

$$D(S) = \sum_{i=1}^N p(S_i) (S_i - M(S_i))^2. \quad (4.18)$$

Ввиду того, что дисперсия измеряется в квадратных единицах рассматриваемой величины —  $(\text{мг/л})^2$  — для определения меры разброса значений случайной величины используется среднее квадратическое отклонение  $\sigma(S)$ , которое определяется как корень квадратный из дисперсии, со знаком «плюс»:

$$\sigma(S) = \sqrt{D(S)}. \quad (4.19)$$

Использование для описания процесса колебаний качественных характеристик сточных вод только математического ожидания и дисперсии не позволяет достаточно полно описать динамику данного процесса. Каждый конкретный сток описывается своими, только ему присущими корреляционной  $R(\tau)$  и нормированной корреляционной  $\rho(\tau)$  функциями, характеризующими внутреннюю структуру процесса и определяющими степень взаимной связи двух значений концентраций рассматриваемого загрязнителя, измеренных в различные моменты времени.

Корреляционный анализ позволяет аналитически оценить степень связи между двумя значениями измеряемых параметров качества сточных вод. Если значения  $S_{i,j}$  и  $S_{i,j+\tau}$  связаны функциональной зависимостью  $S_{i,j+\tau} = f(S_{i,j})$ , то каждому значению  $S_{i,j}$  отвечает единственное значение  $S_{i,j+\tau}$ , которое можно вычислить, пользуясь выражением для функции  $f$ .

При случайном характере изменения качественных параметров сточных вод говорить о функциональной зависимости между  $S_{i,j}$  и  $S_{i,j+\tau}$ , как правило, не приходится. Действительно, независимая переменная  $S_{i,j}$  принимает не единственное значение, а целый спектр значений, причем случайным образом. Далее, каждому значению  $S_{i,j}$  отвечает некоторый спектр из числа возможных значений  $S_{i,j+\tau}$ , причем заранее невозможно сказать, какое именно значение эта переменная примет. В этом случае можно говорить лишь о корреляционной зависимости между значениями  $S_{i,j}$  и  $S_{i,j+\tau}$ , которая понимается в том смысле, что значение, которое принимает одна из переменных, ока-

зывает влияние на значение, которое принимает вторая из них, причем это влияние можно оценить лишь вероятностно:

$$R_{S_i}(\tau) = M [S_{i,j}(t)S_{i,j}(t+\tau)] \quad (4.20)$$

$$\rho_{S_i}(\tau) = \frac{R_{S_i}(\tau)}{R_{S_i}(0)} = \frac{M [S_{i,j}(t)S_{i,j}(t+\tau)]}{M [S_{i,j}(t)]} \quad (4.21)$$

Рассматривая значения качественных характеристик сточных вод за определенный промежуток времени как систему дискретных случайных величин, корреляционную функцию можно определить в виде предела средних значений:

$$R(\tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N S(t_i)S(t_i+\tau), \quad (4.22)$$

где  $N$  — число наблюдений.

Выражение (4.21), описывающее нормированную корреляционную функцию, представляет собой коэффициент корреляционной связи между сечениями функции, разделенными интервалом  $\tau$  по времени. Тогда корреляционную функцию можно представить в виде произведения коэффициента корреляции и дисперсии:

$$R(\tau) = R(0) \rho(\tau). \quad (4.23)$$

Из теории вероятностей известно, что нормированная корреляционная функция может быть описана аналитическими зависимостями и аппроксимирована теоретическими кривыми. В общем виде корреляционные функции имеют вид произведения экспоненты на косинус:

$$\rho(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau, \quad (4.24)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты корреляционной связи.

Данная зависимость указывает на то, что любой случайный процесс имеет элемент периодичности. Частотной характеристикой ряда значений концентраций сточных вод является коэффициент  $\beta$ , а  $\alpha$  характеризует как частоту, так и амплитуду колебания качественных характеристик сточных вод. Корреляционный анализ позволяет определить и среднюю длину волны колебания рассматриваемых загрязнений  $L_{\tau_i}$ :

$$L_{S_i}^{mid} = \frac{2\pi N_L \tau}{\arccos \frac{\rho(\tau)}{e^{-\alpha|\tau|}}}, \quad (4.25)$$

где  $N_L$  — количество проб в час, равное, в нашем случае, 1.

Более обобщенные данные по усредненной длине волны колебания качественных параметров сточных вод и частот их повторения дает спектральный анализ рассматриваемого процесса, который заключается в определении спектральной плотности через корреляционные функции в виде интеграла Фурье:

$$\Phi_{S_i}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{S_i}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (4.26)$$

где  $\Phi_{S_i}(\omega)$  — спектральная плотность процесса изменения концентраций качественных параметров  $S_i$  сточных вод.

Спектральная плотность несет в себе информацию о распределении по частотам общей энергии входных колебаний, указывает те частоты, которые преобладают и которые практически не встречаются в спектре входного возмущения. Из (4.23) и (4.24):

$$R_{S_i}(\tau) = R_{S_i}(0) e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta \tau. \quad (4.27)$$

Из (4.26) и (4.27):

$$\Phi_{S_i}(\omega) = R_{S_i}(0) \frac{2\alpha(\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2)}{\omega^4 + 2(\alpha^2 - \beta^2)\omega^2 + (\alpha^2 + \beta^2)^2}, \quad (4.28)$$

где  $\omega$  — частота процесса, рад/ч.

*Анализ динамики качественного состава сточных вод, поступающих на сооружения, позволяет определить диапазон частот, преобладающих для каждого из рассматриваемых показателей. Для обеспечения стабильного качества очистки сооружение должно быть спроектировано таким образом, чтобы максимально «гасить» поступающие колебания загрязнений именно в этом диапазоне преобладающих частот.*

Математический аппарат, заложенный в модель OxiD, позволяет рассчитывать спектральную плотность рассматриваемых концентраций загрязнений  $S$ , как в сточной воде  $\Phi_{S, infl}(\omega)$ , поступающей на очистку, так и в очищенной сточной воде  $\Phi_{S, eff}(\omega)$  в рассматриваемом диапазоне частот, и затем оценивать степень снижения амплитуды колебаний загрязнений данным сооружением.

Корень квадратный из отношения спектральной плотности концентраций загрязнений очищенного стока к спектральной плотности концентраций загрязнений сточных вод, поступающих на очистку, представляет собой амплитудно-частотную характеристику действующего сооружения  $A_S(\omega)$  по рассматриваемому параметру  $S$ .

$$A_S(\omega) = \sqrt{\frac{\Phi_{S, eff}(\omega)}{\Phi_{S, infl}(\omega)}} \quad (4.29)$$

Модель OxiD была использована, в том числе, при разработке технологических и технических решений реконструкции аэротенков старого блока Люберецких очистных сооружений под технологию биологического удаления азота и фосфора.

Первый блок модели OxiD был использован для частотного анализа качественного состава сточных вод, поступающих в аэротенки старого блока Люберецких очистных сооружений [26]. Динамика качественных показателей поступающих на биологическую очистку сточных вод старого блока Люберецких очистных сооружений по ХПК, аммонийному азоту и фосфору фосфатов представлена на рис. 4.22—4.24.

По формулам (4.16)—(4.29), заложенным в модель, были рассчитаны спектральные плотности рассматриваемых параметров сточных вод. Примеры расчетов спектральных плотностей концентраций по данным, представленным на рис. 4.22—4.24, представлены на рис. 4.25 и 4.26.

Из графиков видно, что колебания значений концентраций  $N-NH_4$  и  $P-PO_4$  сточной воды, поступающей на аэротенки ЛОСст, преобладают в области частот  $0...0,15$  и  $0...0,12$  1/ч соответственно. Для взвешенных веществ и ХПК диапазон преобладающих частот

колебаний составляет  $0...0,12$  и  $0...0,1$  1/ч соответственно. Преобладание столь малых частот в спектре входных колебаний объясняется отсутствием выраженной цикличности суточной динамики качественного состава сточных вод ЛОСст.

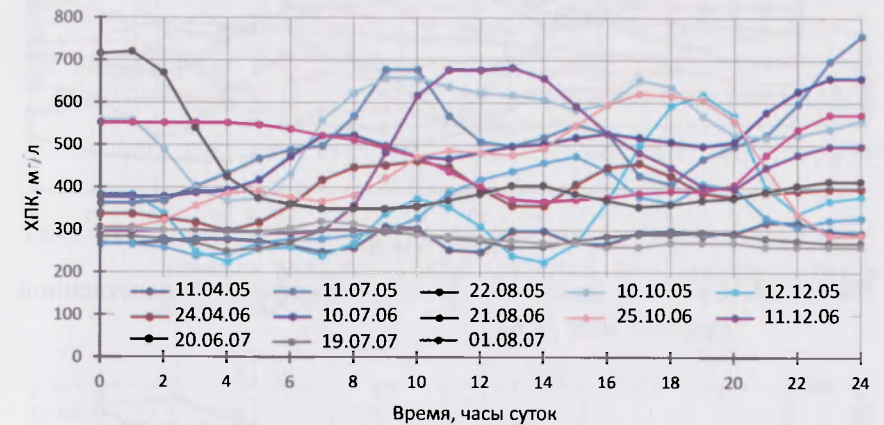


Рис. 4.22. Суточная динамика ХПК в осветленной сточной воде ЛОСст

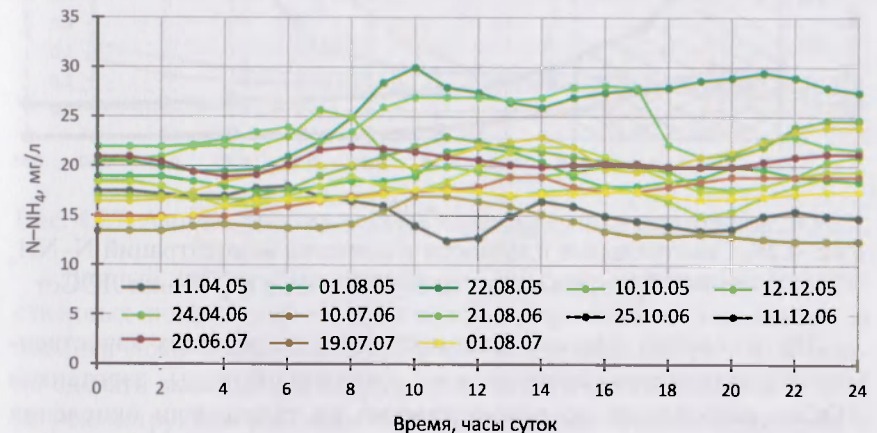
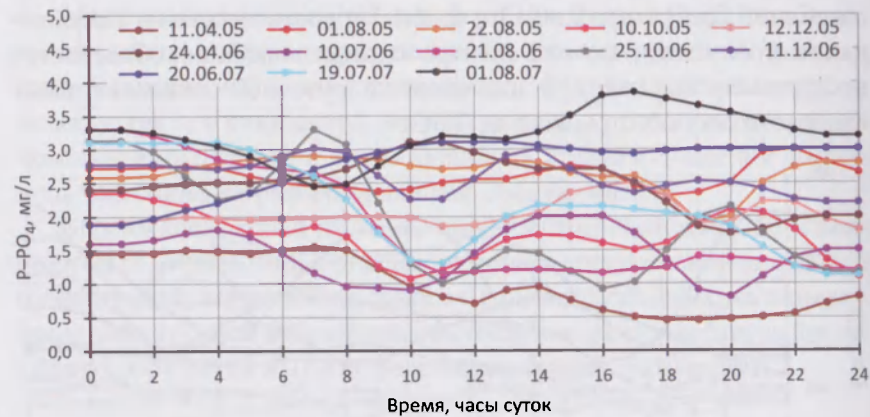
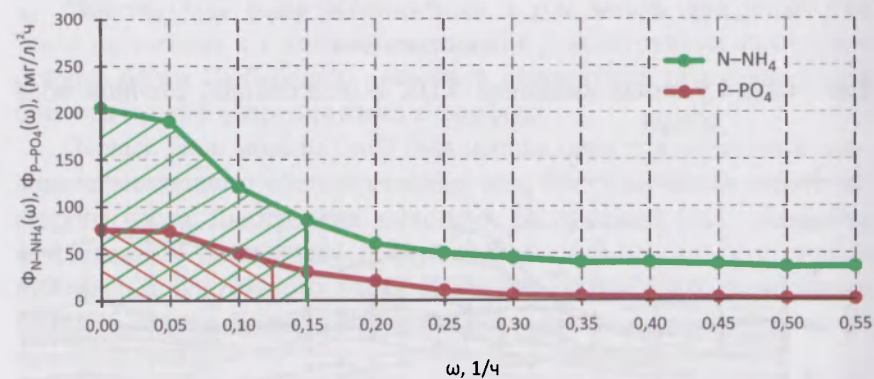


Рис. 4.23. Суточная динамика аммонийного азота в осветленной сточной воде ЛОСст

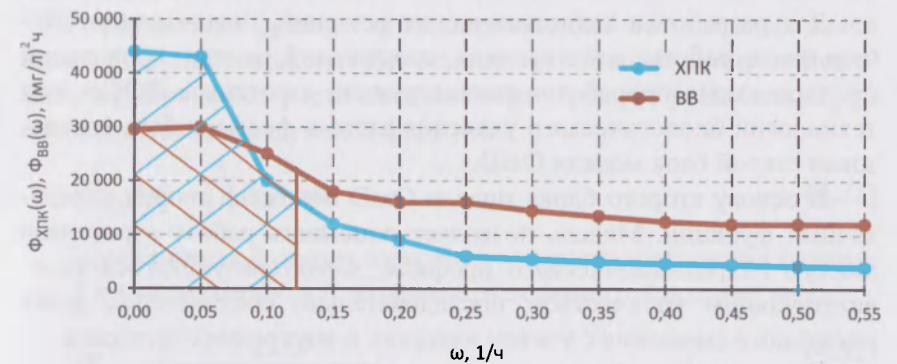


**Рис. 4.24.** Суточная динамика фосфора фосфатов в осветленной сточной воде ЛОСст

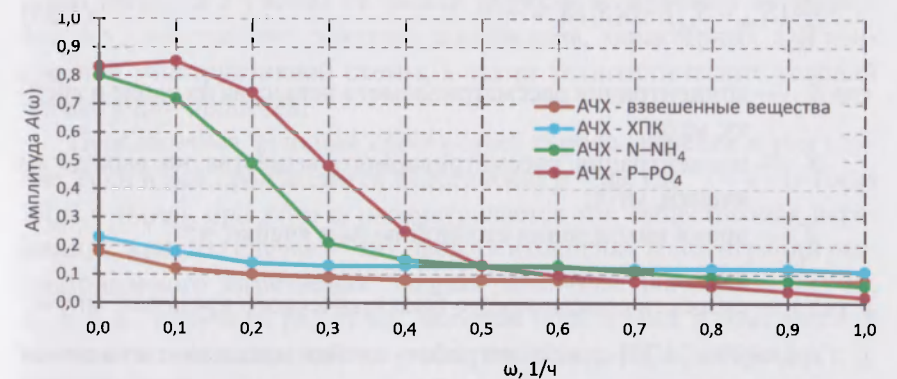


**Рис. 4.25.** Спектральные плотности изменения концентраций  $N-NH_4$  и  $P-PO_4$  сточных вод, поступающих в аэротенки ЛОСст

На основании анализа динамики соответствующих качественных характеристик биологически очищенной воды аэротенков ЛОСст, работавших до реконструкции по технологии окисления органических соединений, была рассчитана АЧХ для блока сооружений «аэротенки — вторичные отстойники» старого блока Люберецких очистных сооружений (рис. 4.27).



**Рис. 4.26.** Спектральные плотности изменения концентраций взвешенных веществ и ХПК сточных вод, поступающих в аэротенки ЛОСст



**Рис. 4.27.** Амплитудно-частотные характеристики аэротенков ЛОСст

Данный расчет был произведен по реальной динамике качественных показателей поступающей в аэротенки сточной воды и биологически очищенной воды в часовых пробах. Из рис. 4.27 можно сделать выводы, что сооружения биологической очистки ЛОСст до реконструкции работали стабильно по взвешенным веществам и ХПК. По фосфору фосфатов и аммонийному азоту данные сооружения работали нестабильно и допускали максимум проскоков как раз в области преобладающих частот.

Для разработки технологических решений, повышающих стабильность работы действующих сооружений, и при проведении предпроектных проработок реконструкции аэротенков ЛОСст под технологии биологического удаления азота и фосфора был использован второй блок модели OxiD.

В основу второго блока модели OxiD положена теория передаточных функций. Модель позволяет описывать работу аэротенков любого гидродинамического профиля, характеризующегося соответствующим количеством последовательно соединенных ячеек идеального смешения с учетом внешних и внутренних рециклов.

Для каждой ячейки идеального смешения составляется, исходя из уравнения материального баланса, дифференциальное уравнение, описывающее рассматриваемый биохимический процесс:

$$\frac{1}{T_h} (S_{i,0} - S_{i,t}) - \rho(S_i)X = \frac{dS_i}{dt}, \quad (4.30)$$

где  $S_{i,0}$  — концентрация рассматриваемого вещества на входе в ячейку, мг/л;

$S_{i,t}$  — концентрация рассматриваемого вещества на выходе из ячейки, мг/л;

$T_h$  — время нахождения сточной воды в ячейке, ч;

$X$  — доза активного ила, г/л;

$\rho(S_i)$  — скорость описываемого биохимического процесса, мг/г·ч.

Уравнение (4.30) описывает работу ячейки идеального смешения с учетом как внешних воздействий (правая часть уравнения), так и процессов, происходящих внутри объекта (левая часть уравнения).

В OxiD для описания биохимических процессов используется модель ASM2d.

Передаточная функция ячейки идеального смешения  $W_{S_i}(p)$  по рассматриваемому параметру  $S_i$ :

$$W_{S_i}(p) = \frac{1}{1 + T_h p + k_X T_h}, \quad (4.31)$$

где  $p$  — оператора Лапласа.

Передаточная функция  $m$  последовательно соединенных ячеек идеального смешения, которые описывают гидродинамический профиль аэротенка без учета внешних и внутренних рециклов,  $W_m(p)$  определяется по следующей формуле:

$$W_{S_i,m}(p) = \prod_{i=1}^m W_{S_i}(p). \quad (4.32)$$

Передаточная функция аэротенка по рассматриваемому параметру  $S_i$  с учетом рецикла  $R$  возвратного активного ила имеет вид:

$$W_{S_i,rec} = \frac{W_{S_i,m}(p)}{1 + R - R W_{S_i,m}(p)}. \quad (4.33)$$

Используя формулы (4.32) и (4.33), с помощью модели можно получать передаточные функции аэротенка любого гидродинамического профиля с учетом не только рецикла возвратного активного ила, но и внутренних рециклов сооружения, характерных для конкретной конструктивной схемы, а также технологических условий организации процесса.

Передаточная функция приобретает особое значение в том случае, если в ней производится подстановка  $p = j\omega$ , где  $j = \sqrt{-1}$ . Тогда  $W(p) = W(j\omega)$ , при этом  $\omega$  рассматривается как вещественная переменная, в нашем случае — как частота изменения концентраций рассматриваемого загрязнения. Задавая различные значения  $\omega$ :  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  и т. д., получаем ряд точек, которые определяют в комплексной плоскости положения концов векторов  $W(j\omega_1)$ ,  $W(j\omega_2)$ ,  $W(j\omega_3)$  и т. д. При непрерывном изменении  $\omega$  конец вектора  $W(j\omega)$  будет описывать некоторую кривую, которая называется годографом вектора  $W(j\omega)$  или амплитудно-фазовой характеристикой рассматриваемого сооружения, передаточная функция которого равна  $W(p)$ .

Амплитудно-фазовая характеристика сооружения  $W(j\omega)$  имеет физический смысл и характеризует поведение сооружения при действии периодического возмущающего воздействия. Вектор  $W(j\omega)$  характеризует установившееся движение при периодическом возмущении с частотой  $\omega$ . Величину вектора  $W(j\omega)$  можно вычислить для любой частоты, если известна передаточная функция сооружения,



при этом при конкретном значении частоты  $\omega$   $W(j\omega)$  представляет собой комплексное число. Выражение  $W(j\omega)$  можно представить в виде  $W(j\omega) = |A(\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$ . Модуль  $A$  и аргумент  $\varphi$  являются функциями частоты, график функции  $A(\omega)$  называют амплитудно-частотной характеристикой, а график функции  $\varphi(\omega)$  — фазово-частотной характеристикой.

*Передачная функция аэротенка, полученная из уравнения, описывающего его работу, позволяет получать теоретическую амплитудно-частотную характеристику сооружения.*

С одной стороны, мы, используя уравнение (4.29), подставляя в него спектральные плотности реальных рядов данных качественных характеристик очищенных вод и сточных вод, поступающих на очистку, получаем амплитудно-частотную характеристику реального работающего аэротенка. С другой стороны, составив дифференциальное уравнение с правой частью, описывающее данное сооружение, и решив его, мы получаем теоретическую АЧХ этого же сооружения, то есть амплитудно-частотную характеристику рассматриваемого сооружения при идеальных условиях эксплуатации. Сравнивая реальную и теоретическую амплитудно-частотные характеристики, с помощью модели OxiD можно расчетным путем определить проблемы, возникающие при эксплуатации сооружения, и найти наиболее приемлемые пути их решения.

Модель OxiD при использовании формул (4.32) и (4.33) позволяет получать передачные функции аэротенка любого гидродинамического профиля с учетом не только рецикла возвратного активного ила, но и внутренних рециклов сооружения, характерных для конкретной конструктивной схемы, а также технологических условий организации процесса. На основании передачной функции модель рассчитывает амплитудно-частотную характеристику проектируемых сооружений (АЧХ) —  $A(\omega)$ , которая показывает, во сколько раз снижается амплитуда колебаний качественных показателей очищенной воды по отношению к аналогичным показателям сточной воды, поступающей в сооружение, в зависимости от частоты их колебаний.

Таким образом, просчитывая различные варианты конструктивных и технологических решений организации процессов биологической очистки сточных вод в аэротенках, модель OxiD рассчитывает АЧХ проектируемых сооружений, что позволяет пользователю выбрать вариант, соответствующий требуемому эффекту очистки и заложенным в модель максимальным отклонениям качественных параметров очищенной воды от их среднего показателя.

Как было сказано выше, динамическая модель OxiD была использована при расчете различных схем реконструкции аэротенков Люберецких очистных сооружений и выборе оптимальных решений. В качестве примера рассмотрим одну из реализованных на Люберецких очистных сооружениях схем, рассчитанных с помощью разработанной автором данной книги модели OxiD®. Аэротенк старого блока Люберецких очистных сооружений (ЛОСст) — 4-коридорный аэротенк-вытеснитель, запроектированный в свое время под технологию удаления органических соединений и регенерацию возвратного активного ила. Необходимо было выбрать оптимальную схему его реконструкции под технологию биологического удаления азота и фосфора и провести расчет данного сооружения, в том числе определить максимальную производительность данного сооружения после реконструкции, рассчитать объемы анаэробной, аноксидной и аэробной зон, рассчитать расходы возвратного активного ила и расходы внутренних рециклов и т. д. Расчет аэротенков проводился на следующее качество очищенных вод по биогенным элементам:  $N-NH_4 = 0,4$  мг/л,  $N-NO_2 = 0,02$  мг/л,  $P-PO_4 = 0,2$  мг/л,  $N-NO_3 = 9,0$  мг/л. С учетом того, что сооружение должно обеспечивать заложенное в проект качество очищенной воды в разовых пробах, в расчетах были приняты следующие значения математических ожиданий:  $N-NH_4 = 0,3$  мг/л,  $P-PO_4 = 0,1$  мг/л,  $N-NO_3 = 8$  мг/л. Соответственно значения максимальных проскоков, заложенные в расчет, составляли 0,1, 0,1 и 1 мг/л. Таким образом, при заложенных в расчет средних значениях  $N-NH_4$ ,  $P-PO_4$ ,  $N-NO_3$  с учетом максимальных проскоков  $\Delta(S)$  расчетное качество очищенной воды не превышает проектных показателей качества очистки.

Из формулы

$$\Delta(S_i) = 3\sqrt{D_i(S_i)} \quad (4.34)$$

с учетом заданных пользователем значений  $\Delta(S)$  определяется требуемое значение дисперсии качества очищенной воды  $D_i(S_i)$  по рассматриваемому загрязнителю  $S_i$ .

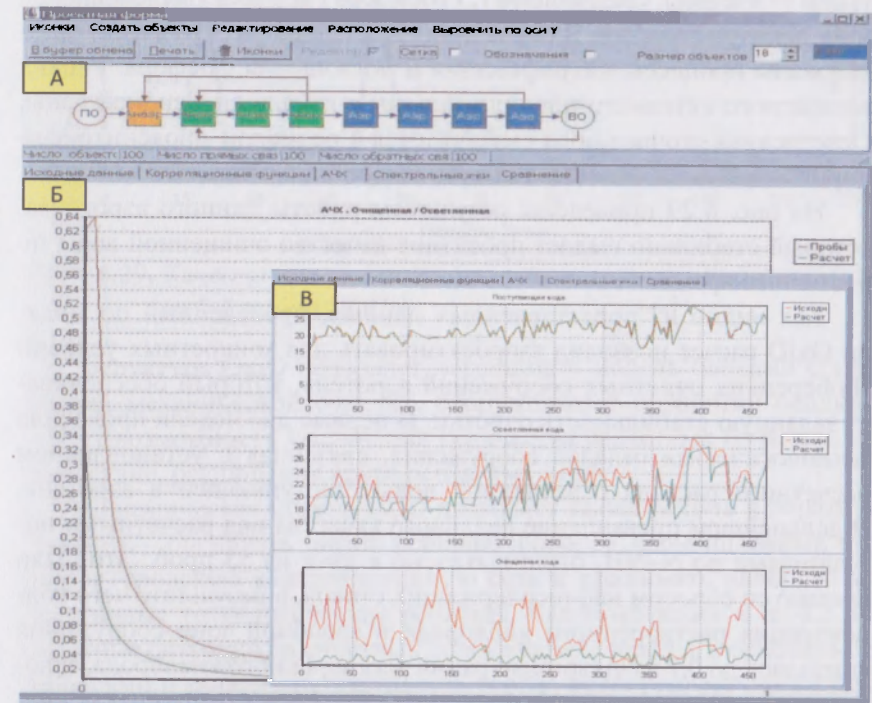
В ходе расчета реконструируемого аэротенка ЛОСст нами были рассчитаны значения дисперсий концентраций  $N-NH_4$ ,  $P-PO_4$  и  $N-NO_3$  очищенной воды, которые должно обеспечивать проектируемое сооружение. Было получено, что для обеспечения заложенных в расчет средних показателей качества очистки и максимальных проскоков значения дисперсий  $N-NH_4$ ,  $P-PO_4$  и  $N-NO_3$  очищенных вод должны соответствовать значениям:  $D_i(N-NH_4) = 0,06$  (мг/л)<sup>2</sup>,  $D(P-PO_4) = 0,06$  (мг/л)<sup>2</sup> и  $D_i(N-NO_3) = 1,6$  (мг/л)<sup>2</sup>.

Проведенный расчет показал, что для сточных вод ЛОСст, поступающих на биологическую очистку, и для заложенных нами значений средних показателей качественного состава очищенных вод и максимальных проскоков проектируемое сооружение должно иметь следующие значения АЧХ в области преобладающих частот изменения соответствующих качественных параметров стоков:  $A(\omega)_{N-NH_4} = 0,2 \dots 0,28$ ,  $A(\omega)_{N-NO_3} = 0,25 \dots 0,4$ ,  $A(\omega)_{P-PO_4} = 0,15 \dots 0,25$ .

Второй блок модели позволил по задаваемым конструктивным и технологическим параметрам проектируемого сооружения, динамике качественных показателей поступающей на очистку сточной воды рассчитывать амплитудно-частотные характеристики аэротенка  $A_c(\omega)$ . Просчитывая различные технологические схемы, изменяя в модели технологические режимы работы сооружения, мы получили расчетные значения амплитудно-частотных характеристик различных вариантов расчета  $A_c(\omega)$ . При сравнении значений амплитудно-частотных характеристик  $A_c(\omega)$  для различных вариантов расчета со значениями  $A(\omega)$  были выбраны такие конструктивные и технологические решения реализации процессов биологического удаления азота и фосфора, которые обеспечивают требуемое качество и стабильность очистки.

Так как реконструкция аэротенка под технологию биологического удаления азота и фосфора на ЛОСст проводилась на базе

существующих сооружений, то в расчет и были заложены их гидродинамические характеристики. Проведенные экспериментальные исследования по трассированию аэротенков ЛОСст изотопами I-131 показали, что два коридора этих сооружений соответствуют 16...20 ячейкам идеального смешения. Для описания скоростей биохимических процессов в модели OxiD используются уравнения, заложенные в модель ASM2d. Кинетические константы, применяемые в данной модели, были получены нами в ходе лабораторных исследований.



**Рис. 4.28.** Вывод на экран основных шагов расчета по модели OxiD: А — технологическая схема очистки, Б — сравнение реальной и расчетной амплитудно-частотной характеристик аэротенков, В — сравнение реального и расчетного выходного качества очищенной сточной воды

С помощью модели OxiD были просчитаны различные схемы реализации процессов биологического удаления азота и фосфора в реконструируемом аэротенке ЛОСст. На рис. 4.28 представлена выбранная нами схема, расчетные значения амплитудно-частотных характеристик которой удовлетворяют требуемым значениям ( $A_c(\omega)_{N-NH_4} = 0,15 \dots 0,2$ ,  $A_c(\omega)_{N-NO_3} = 0,22 \dots 0,32$ ,  $A_c(\omega)_{P-PO_4} = 0,12 \dots 0,18$ ) и которая была реализована на линии 2 старого блока Люберецких очистных сооружений. Первая половина 1-го коридора аэротенка выделена под анаэробную зону для организации процесса дефосфатации (4 ячейки). Следующие 1,5 коридора (12 ячеек) выделены под зону денитрификации. В последних двух коридорах (16 ячеек) организованы процессы нитрификации и поглощения фосфора. Рецикл возвратного активного ила организован в начало аноксидной зоны. Осветленная сточная вода смешивается с рециклом проденитрифицированной иловой смеси в начале анаэробной зоны.

На рис. 4.29 приведены результаты работы данного аэротенка, который стабильно выдает проектное качество очищенной воды по настоящее время.

Как видно из представленных данных, проведенный по модели OxiD расчет позволил запроектировать для конкретных условий Люберецких очистных сооружений аэротенк, который обеспечивает заданную стабильность очистки. В первые две недели проходила технологическая отладка сооружения, связанная с установлением расчетного расхода осветленной воды, поступающей в аэротенк. В дальнейшем превышение реального качества над расчетными показателями по  $N-NH_4$  было выявлено в двух из 53 проб. Это было связано со сбросом нефтесодержащих стоков, в результате чего концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне сооружения снизилась до 0,7 мг/л (концентрация растворенного кислорода, заложенная в расчет, составляет 2 мг/л). По фосфору фосфатов, как видно из представленных данных, сооружение работало в соответствии с заданным качеством.

Таким образом, применение динамического моделирования позволяет проектировать сооружения биологической очистки сточных вод под технологии биологического удаления азота и фосфора в

соответствии с заданными качественными характеристиками очищенной воды и реальной динамикой качественного состава поступающих сточных вод. Данные конструктивные и технологические решения были положены в основу реконструкции аэротенков ЛОСст и нового блока Курьяновских очистных сооружений [120].

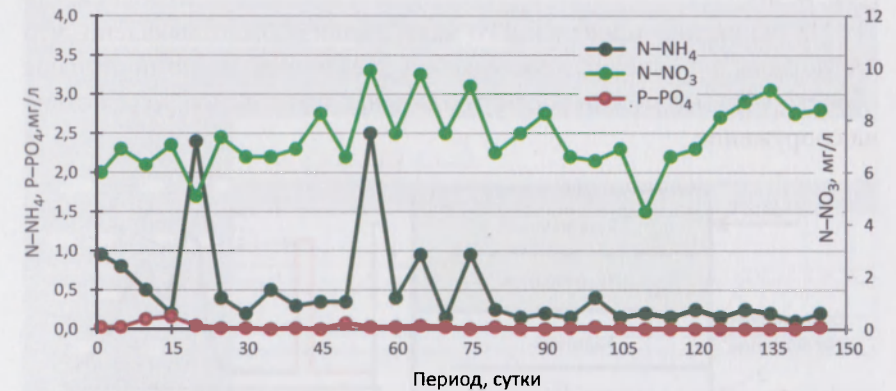


Рис. 4.29. Качество очищенной воды реконструированного аэротенка 2-й линии ЛОСст

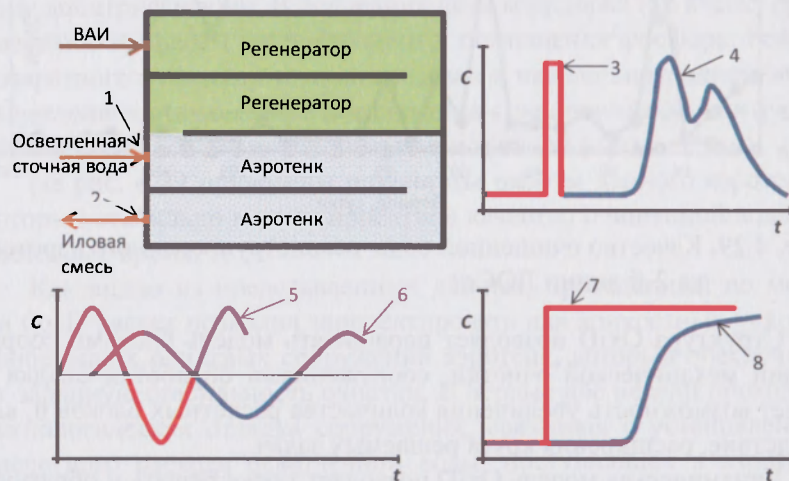
Структура OxiD позволяет наращивать модель блоками сооружений механической очистки, сооружениями обработки осадка и имеет возможность увеличения количества расчетных блоков и, как следствие, расширения круга решаемых задач.

Динамическая модель OxiD позволяет также решать и обратную задачу — оценивать риски залповых сбросов промышленных стоков в городскую канализационную сеть и принимать наиболее эффективные технологические решения. Как отмечалось в п. 4.2, нештатные ситуации на очистных сооружениях связаны, в основном, со сбросами в канализационную сеть города недостаточно очищенных производственных сточных вод. Несанкционированные сбросы нарушают работу аэротенков и сооружений обработки осадков. Динамическая модель OxiD рассчитывает оптимальные технологические решения, позволяющие минимизировать время последствия сброса неочищенных сточных вод. В динамической модели OxiD все сбросы

классифицируются по продолжительности воздействия на сооружение очистки сточных вод:

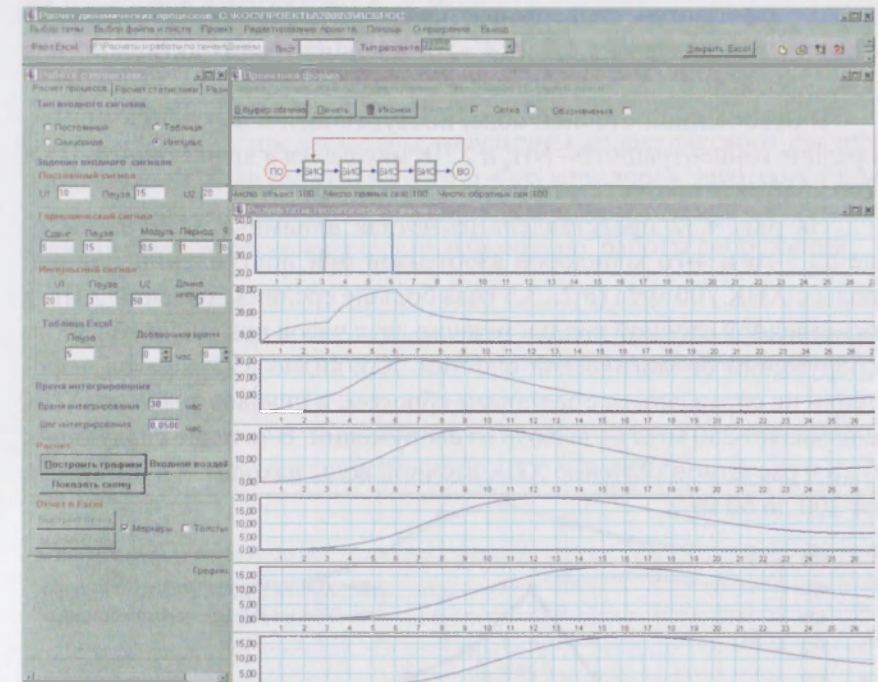
- 1) кратковременный сброс (импульсное воздействие);
  - 2) периодический сброс (гармоническое колебание);
  - 3) длительный сброс (ступенчатый возмущающий сигнал)
- (рис. 4.30).

На основании проведенного нами анализа было выявлено, что на Московские очистные сооружения преимущественно поступают сбросы, которые можно рассматривать как импульсное воздействие на сооружение.



**Рис. 4.30.** Типичные возмущающие воздействия и соответствующие им кривые отклика: 1 — точка поступления сброса; 2 — место определения отклика аэротенка на несанкционированный сброс; 3 — кратковременный сброс (возмущающий сигнал импульсной формы); 4 — профиль концентраций сброса, соответствующий сигналу импульсной формы; 5 — периодический сброс (возмущающий сигнал циклической формы); 6 — профиль концентраций сброса, соответствующий сигналу циклической формы; 7 — длительный сброс (возмущающий сигнал ступенчатой формы); 8 — профиль концентраций сброса, соответствующий сигналу ступенчатой формы

На рисунке 4.31 приведен пример моделирования работы 4-коридорных аэротенков-вытеснителей старого блока Курьяновских очистных сооружений (КОСст) с помощью динамической модели OxiD [128].



**Рис. 4.31.** Пример моделирования с помощью динамической модели OxiD

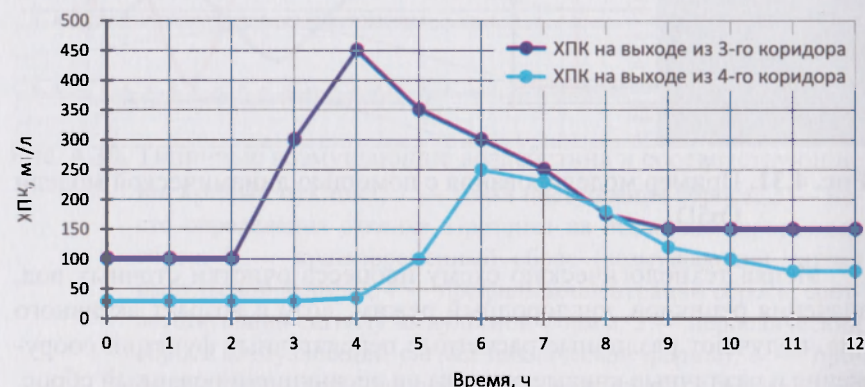
Меняя технологическую схему процесса очистки сточных вод, значения рециклов, кислородный режим, дозу и возраст активного ила, получают различные расчетные передаточные функции сооружения и различные кривые отклика на несанкционированный сброс. Подобранные оптимальные технологические условия в зависимости от экстремальной ситуации, обеспечивают или минимальный период сброса с пиковой концентрацией, значительно превышающей

согласованные нормативы, или длительное поступление неочищенных сточных вод, но с незначительным превышением нормативов.

В качестве примера моделирование экстремальной ситуации проводилось для аэротенков КОСст производительностью 1 млн м<sup>3</sup>/сут, работающих с 50%-й регенерацией. В третьих и четвертых коридорах аэротенков поддерживается концентрация растворенного кислорода в диапазоне 1,2...1,4 мг/л и концентрация активного ила 1,4...1,6 г/л.

В осветленной сточной воде, поступающей в аэротенки КОСст, средние концентрации N-NH<sub>4</sub> и ХПК находятся в диапазоне 20...25 и 200...350 мг/л соответственно.

На рис. 4.32 представлена расчетная динамика ХПК на выходе из 3-го и 4-го коридоров аэротенков при поступлении сточной воды с ХПК 700 мг/л (в 2...3,5 раза больше средних значений ХПК в осветленной сточной воде) в течение двух часов при текущей работе сооружений биологической очистки. Как видно из графиков, аэротенки не справляются с залповым сбросом, и пиковое значение ХПК составляет 250 мг/л на выходе из сооружений. В течение следующих 6...8 ч расчетное значение ХПК сточной воды находится в интервале от 200 до 60 мг/л.

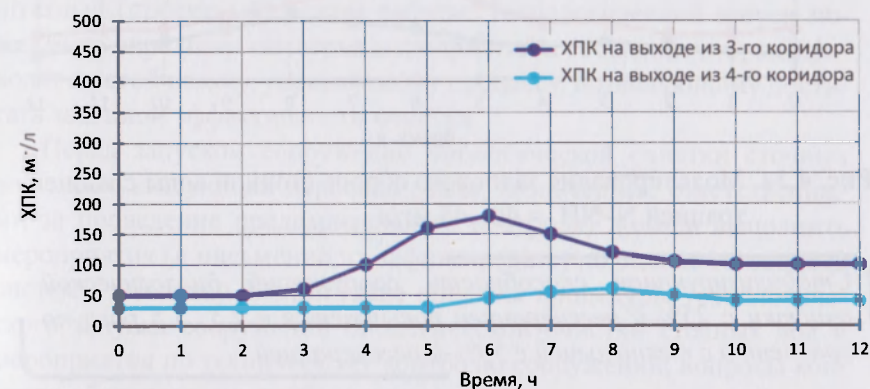


**Рис. 4.32.** Текущее значение ХПК на выходе из 3-го и 4-го коридоров аэротенка при 50%-й регенерации, концентрации растворенного кислорода 1,2...1,4 мг/л и дозе ила 1,4...1,6 г/л

При моделировании изменений кислородного режима в аэротенках, дозы ила и процента регенерации были найдены оптимальные технологические воздействия для конкретной экстремальной ситуации:

- переход на технологию очистки с 25%-й регенерацией;
- поддержание концентрации растворенного кислорода в середине коридоров аэротенков 1,8...2 мг/л;
- доза иловой смеси 1,8...2 г/л;
- увеличение значения рецикла возвратного активного ила в 1,3...1,5 раз.

На рис. 4.33 представлены результаты теоретического расчета динамики ХПК на выходе из 3-го и 4-го коридоров аэротенков при поступлении сточной воды с ХПК = 700 мг/л в течение двух часов при внесенных технологических изменениях работы сооружений.



**Рис. 4.33.** Текущее значение ХПК на выходе из 3-го и 4-го коридоров аэротенка при 25%-й регенерации, концентрации растворенного кислорода 1,8...2 мг/л и дозе ила 1,8...2 г/л

Максимальное расчетное значение ХПК на выходе из аэротенков составляет 65 мг/л. В течение следующих 2...4 ч качество очищенной сточной воды стабилизируется и достигает ХПК = 40 мг/л.

Аналогичные результаты были получены при моделировании поступления аммонийного азота с концентрацией 40...45 мг/л (период 2 ч), превышающей среднее значение N-NH<sub>4</sub> в поступающей сточной

Глава 4. Расчеты сооружений биоочистки сточных вод. Проблемы эксплуатации. Примеры решения

воде в 1,5...2 раза. При работе аэротенков с 50%-й регенерацией сооружения не справляются с залповым сбросом, и в течение 3 ч поступает сточная вода с пиковой концентрацией  $N-NH_4$  15...18 мг/л (рис. 4.34). При изменении кислородного режима и технологической схемы на 25%-ю регенерацию удается минимизировать пиковую концентрацию сбрасываемых неочищенных сточных вод до 10 мг/л.

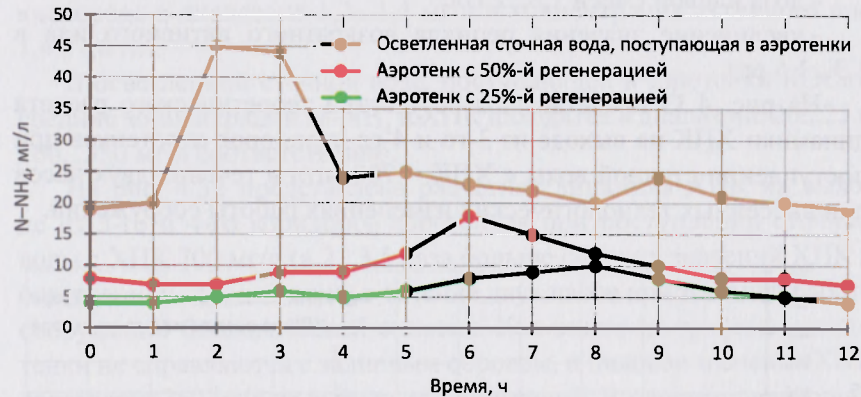


Рис. 4.34. Моделирование залпового сброса сточной воды с концентрацией  $N-NH_4 = 40...45$  мг/л

*Стабилизирующая способность сооружений биологической очистки с 25%-й регенерацией повышается в 2,5...3,5 раза по сравнению с технологией с 50%-й регенерацией.*

Применение модели OxID позволяет просчитывать реальные аварийные ситуации для сооружений биологической очистки сточных вод и экономить время принятия технологических решений для минимизации последствий сброса. По динамической модели OxID можно рассчитать концентрацию загрязняющих веществ (ХПК,  $N-NH_4$ , взвешенных веществ) в сточной воде как на выходе из аэротенка, так и в любой точке сооружения. При моделировании по OxID учитываются все конструктивные и технологические параметры аэротенков, продолжительность воздействия на сооружения и концентрация сброса.

## Глава 5. ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

### 5.1. Технологический запуск сооружений биологической очистки сточных вод

Запуск системы биологической очистки сточных вод представляет собой процесс, во время которого все сооружения и оборудование начинают функционировать и происходит вывод системы на штатный (проектный) режим работы. Технологический запуск может быть определен как серия мероприятий и событий, которые приводят к устойчивому, управляемому процессу, позволяющему достигать заданной эффективности очистки.

Перед запуском сооружений биологической очистки сточных вод эксплуатирующий персонал (лица, назначенные ответственными за проведение предварительного контроля) должен выполнить мероприятия (и письменно их зафиксировать) по оценке готовности системы к запуску. В этой главе описаны процедуры технологического запуска сооружений биологической очистки сточных вод и мероприятия по техническому контролю сооружений; вопросы контроля оборудования, трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры не рассматриваются. В данной книге также не прописывается процедура всего комплекса пуско-наладочных работ.

#### 5.1.1. Подготовка к технологическому запуску сооружений

Грамотный технологический запуск сооружений биологической очистки сточных вод является ключевым моментом их дальнейшей успешной эксплуатации и позволяет свести к минимуму период их вывода на проектные производительность и эффективность работы. Технологический запуск очистных сооружений является процедурой индивидуальной для каждого конкретного объекта,

которая должна быть прописана и подготовлена заранее исходя из следующих условий:

- качественные и количественные параметры сточных вод, поступающих на биологическую очистку на момент запуска сооружений;
- количество одновременно вводимых в эксплуатацию аэротенков и вторичных отстойников;
- технологические и технические решения, заложенные в запускаемые сооружения;
- возможность (или невозможность) подачи активного ила с уже действующих аэротенков (на рассматриваемых очистных сооружениях, но работающих по другой схеме, или завозимого с соседних очистных сооружений).

Процедура запуска конкретных очистных сооружений может быть прописана во Временном технологическом регламенте работы рассматриваемых сооружений или являться отдельным документом.

В этой главе рассмотрены общие вопросы технологического запуска очистных сооружений, который производится после проведения гидравлических испытаний и проверки всех сооружений, оборудования, трубопроводов, устройств и механизмов, то есть после пуско-наладочных работ на технической воде. В условиях поэтапной реконструкции существующих очистных сооружений, а также строительства новых сооружений, находящихся в разумной близости от уже существующих, запуск, чаще всего, производится с активным илом с действующих сооружений («затравочным» активным илом). В случае отсутствия возможности использования «затравочного» активного ила его приходится культивировать непосредственно на запускаемом объекте. Эта процедура рассмотрена ниже.

Основная задача технологического запуска сооружений биологической очистки сточных вод — культивирование как можно в более короткие сроки биомассы микроорганизмов активного ила для конкретных условий эксплуатации. Под конкретными условиями эксплуатации понимаются текущие качественные и количественные характеристики сточных вод, конструктивные и технологические решения реализации процесса биологической очистки. Технологический запуск сооружений биологической очистки сточных вод состоит из двух этапов.

Задачами 1-го этапа технологического запуска очистных сооружений являются:

- достижение значения дозы активного ила, которое позволяет обеспечить, в первую очередь, эффективное аэробное окисление органических соединений;
- образование хлопков активного ила с хорошими седиментационными свойствами и сведение к минимуму количества мелких не осаждаемых во вторичных отстойниках хлопков активного ила.

*Для эффективного технологического запуска очистных сооружений в течение 1-го этапа необходимо поддерживать определенные значения аэробного возраста  $\theta_{a, start-up}$  и дозы активного ила  $X_{start-up}$ , которые могут существенно отличаться от проектных значений. Это отличие сохраняется только для 1-го этапа технологического запуска сооружений.*

В табл. 5.1 приведены рекомендуемые нами технологические параметры эксплуатации аэротенков (биологических реакторов) для 1-го этапа технологического запуска. Рекомендованные значения приведены для сточных вод диапазона температур 13...36 °С.

Доза активного ила в начальный момент технологического запуска очистных сооружений  $X_{0, start-up}$  должна рассчитываться исходя из текущих качественных и количественных показателей поступающих на очистку сточных вод, решений, заложенных в Проект, и с учетом рекомендованной в табл. 5.1 дозы активного ила  $X_{start-up}$ :

$$X_{0, start-up} = X_{start-up} \frac{Q_{d, act} S_{S, act}}{Q_{d, design} S_{S, design}}, \quad (5.1)$$

где  $X_{0, start-up}$  — доза активного ила в аэротенке в начальный момент времени 1-го этапа технологического запуска очистных сооружений, г/л;

$X_{start-up}$  — рекомендуемая доза активного ила в аэротенке в течение 1-го этапа технологического запуска очистных сооружений, г/л (см. табл. 5.1);

- $Q_{d, act}$  — текущий расход поступающих сточных вод в запускаемый аэротенк, м<sup>3</sup>/сут;  
 $Q_{d, design}$  — проектный расход сточных вод, поступающих в запускаемый аэротенк, м<sup>3</sup>/сут;  
 $S_{S, act}$  — текущее значение БПК<sub>5</sub> в среднесуточной пробе сточных вод, поступающих в запускаемый аэротенк, мг/л;  
 $S_{S, design}$  — проектное значение БПК<sub>5</sub> в сточных водах, поступающих в запускаемый аэротенк, мг/л.

В случае невозможности получения данных о качественном составе сточных вод, которые будут поступать в запускаемые аэротенки, в формуле (5.1) значение  $S_{S, act}$  принимают как планируемое (ожидаемое).

Таблица 5.1. Параметры эксплуатации аэротенков в период 1-го этапа запуска очистных сооружений

| Технология  | Аэробный возраст активного ила $\theta_{a, start-up}$ , сут                     | Эффективность снижения БПК <sub>5</sub> , % | Доза активного ила $X_{start-up}$ , г/л |
|---|---|---|---|
| <b>Аэротенки-вытеснители</b>  |   |   |   |
| Окисление органических соединений   | 5...10  | 85...90                                     | 1,5...3,0                               |
| - Окисление органических соединений, нитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация, удаление фосфора | 10...15*<br>(значение общего возраста активного ила не должно превышать 25 сут) | 90...95                                     | 1,5...2,0                               |
| <b>Аэротенки-смесители</b>  |   |   |   |
| Окисление органических соединений   | 5...10  | 85...90                                     | 2,5...5,0                               |
| - Окисление органических соединений, нитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация, удаление фосфора | 10...15*<br>(значение общего возраста активного ила не должно превышать 25 сут) | 90...95                                     | 2,0...4,0                               |

Окончание табл. 5.1

| Технология  | Аэробный возраст активного ила $\theta_{a, start-up}$ , сут                     | Эффективность снижения БПК <sub>5</sub> , % | Доза активного ила $X_{start-up}$ , г/л |
|---|---|---|---|
| <b>Аэротенки с рассредоточенной подачей сточной воды с постоянной аэрацией</b>  |   |   |   |
| Окисление органических соединений   | 5...10  | 85...90                                     | 2,0...4,0                               |
| - Окисление органических соединений, нитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация, удаление фосфора | 10...15*<br>(значение общего возраста активного ила не должно превышать 25 сут) | 90...95                                     | 2,0...3,0                               |
| <b>Аэротенки-вытеснители, -смесители и с рассредоточенной подачей сточной воды, работающие в режиме продленной аэрации</b>  |   |   |   |
| - Окисление органических соединений, нитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация, удаление фосфора | 15...25*<br>(общий возраст активного ила не должен превышать 35 сут)            | До 95                                       | 3,0...5,0                               |
| <b>Высоконагружаемые аэротенки-вытеснители, -смесители и с рассредоточенной подачей сточной воды</b>  |   |   |   |
| Окисление органических соединений   | 5...10  | 75...85                                     | 4,0...6,0                               |
| - Окисление органических соединений, нитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация;<br>- окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация, удаление фосфора | 10...15*<br>(значение общего возраста активного ила не должно превышать 25 сут) | 85...90                                     | 3,0...5,0                               |

\* Максимальные значения аэробного возраста активного ила из рекомендованного диапазона значений принимают для сточных вод с температурой ниже 18 °С.

Количество сухого вещества активного ила, которое следует подать в аэротенк для обеспечения требуемой в начальный момент дозы активного ила, определяется следующим образом:

$$M_{sl,0} = X_{0, start-up} V_{aer} \quad (5.2)$$



где  $M_{1,0}$  — количество сухого вещества активного ила, которое необходимо подать в запускаемый аэротенк к моменту технологического запуска сооружения, кг;

$V_{aer}$  — объем запускаемого аэротенка (или суммарный объем запускаемых аэротенков), м<sup>3</sup>.

Для определения объема активного ила  $V_{sl,0}$ , м<sup>3</sup>, который требуется подать в запускаемый аэротенк (аэротенки) с уже действующих аэротенков данных очистных сооружений или завезти с других очистных сооружений, необходимо знать дозу активного ила в сооружениях  $X_{exter}$ , откуда планируется подавать (завозить) активный ил:

$$V_{sl,0} = \frac{M_{sl,0}}{X_{exter}} \quad (5.3)$$

Следует обратить внимание, что, как правило, для увеличения массовой концентрации завозимого активного ила  $X_{exter}$  и уменьшения затрат на его перевозку отбирают, по возможности, активный ил из сооружений с его максимальной концентрацией (из регенераторов или каналов возвратного активного ила) [7].

Для определения минимального количества подаваемого (завозимого) активного ила в запускаемые сооружения значение  $X_{start-up}$  в формуле (5.1) следует принимать как минимальное из диапазона, данного в табл. 5.1, т. е.  $X_{start-up,min}$ .

Как видно из формулы (5.1), для определения начальной дозы активного ила, помимо значения  $X_{start-up}$ , определяемого из табл. 5.1, необходимо знать текущие значения БПК<sub>5</sub> и ХПК в поступающих на биологическую очистку сточных водах (в среднесуточной пробе) и текущие расходы сточных вод, поступающих в сооружение. При запуске новых очистных сооружений при невозможности получения реальных данных по качественному составу сточных вод, как было сказано выше, возможно использовать в формуле (5.1) ожидаемые показатели значений  $S_{S,act}$ . В этом случае при расхождении ожидаемых и реальных значений БПК<sub>5</sub> количество завезенного активного ила может существенно отличаться от требуемого (рассчитанного по формуле (5.1)), что приведет к необеспечению рабочего режима культивирования микроорганизмов активного ила, соответствующих

конкретным сточным водам, и, как следствие, к увеличению периода 1-го этапа технологического запуска очистных сооружений и возникновению целого спектра проблем, которые мешают успешному культивированию микроорганизмов активного ила.

Для успешного проведения 1-го этапа технологического запуска нами настоятельно рекомендуется изыскать возможность определения качественного состава сточных вод, которые будут подаваться на запускаемые сооружения. Для возможности статистической обработки данных минимальное количество проб должно быть 10 (при невозможности отбора проб в выходные дни) и 14 (при возможности отбора проб в выходные дни).

*Увеличение массива данных приводит к повышению точности результатов статистической обработки.*

Помимо значений БПК<sub>5</sub> и ХПК, в данных пробах следует определять следующие параметры: N-NH<sub>4</sub>, ТКН (при аккредитации лаборатории на выполнение данного анализа), P-PO<sub>4</sub> и TP (при аккредитации лаборатории на выполнение данного анализа).

На рис. 5.1—5.8 представлены примеры данных количественного и качественного состава сточных вод, поступающих на биологическую очистку.



Рис. 5.1. Значения суточных расходов поступающих сточных вод

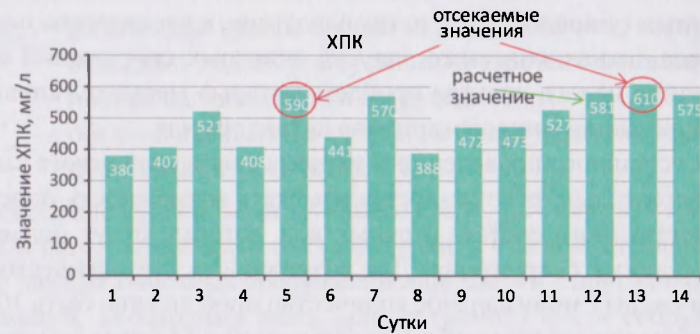


Рис. 5.2. Значения ХПК в среднесуточных пробах поступающих сточных вод



Рис. 5.3. Значения БПК<sub>5</sub> в среднесуточных пробах поступающих сточных вод



Рис. 5.4. Концентрация ТKN в среднесуточных пробах поступающих сточных вод



Рис. 5.5. Концентрация N-NH<sub>4</sub> в среднесуточных пробах поступающих сточных вод



Рис. 5.6. Концентрация TP в среднесуточных пробах поступающих сточных вод



Рис. 5.7. Концентрация P-PO<sub>4</sub> в среднесуточных пробах поступающих сточных вод

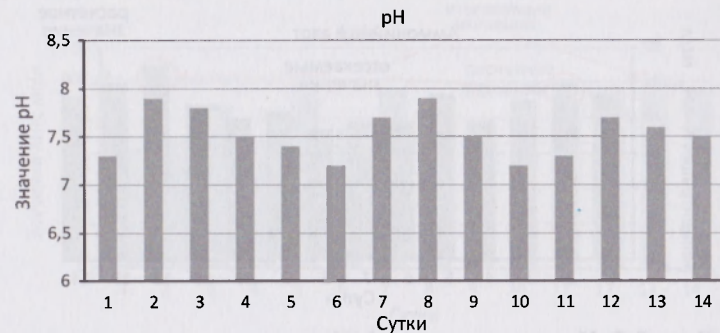


Рис. 5.8. Значение pH в среднесуточных пробах поступающих сточных вод

Для расчета по формуле (5.1) минимальной дозы активного ила в начальный момент времени при запуске аэротенка значения текущих расходов и значения БПК<sub>5</sub> сточных вод, поступающих на биологическую очистку, берут из данных соответствующих показателей за рассматриваемое количество суток (рис. 5.1 и 5.3). В данном случае при обработке массива количественных и качественных данных поступающих сточных вод предлагается отсекают 15 % данных с максимальными значениями, а для оставшегося массива данных (85 %) выбирать максимальное значение для расчета.

Рассмотрим в качестве примера определение максимального значения суточного расхода сточных вод, поступающих на очистку, по данным, приведенным на рис. 5.1.

У нас имеется 14 значений расходов, которые принимаем за 100 %. Определяем количество данных, составляющих 15 %:

$$14 \text{ значений} = 100 \%;$$

$$X \text{ значений} = 15 \%.$$

Тогда из полученной пропорции получаем:

$$X = \frac{14 \cdot 15 \%}{100 \%} = 2,1 \text{ значений.}$$

При обработке данных, приведенных на рис. 5.1, два максимальных значения (которые составляют 15 %) отсекаются, и из остальных

го массива выбирается максимальное значение, которое и подставляют в формулу (5.1). Два максимальных значения, которые отсекаются, это значения 92 и 90 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Следовательно, из остальных 12 значений максимальным является 88 тыс. м<sup>3</sup>/сут, которое и подставляется в формулу (5.1). При обработке большого массива данных предлагается использовать математический аппарат случайных величин. В частности, предлагается воспользоваться возможностями пакета программ Excel (функция PRCENTILE).

Аналогично проводится обработка данных для значений БПК<sub>5</sub>: отсекаются два максимальных значения — 225 и 210 мг/л, и расчетное значение, подставляемое в формулу (5.1), составляет 208 мг/л.

Как было показано в предыдущих главах, для эффективного роста микроорганизмов активного ила необходима достаточная обеспеченность их биогенными элементами, в первую очередь азотом и фосфором, то есть максимальные значения отношений БПК<sub>полн</sub>/N/P в сточных водах, поступающих на биологическую очистку, должны быть 100/5/1, или БПК<sub>полн</sub>/N = 100/5 = 20 и БПК<sub>полн</sub>/P = 100/1 = 100. При недостатке биогенных элементов, то есть когда значение БПК<sub>полн</sub>/N более 20, а значение БПК<sub>полн</sub>/P более 100, скорость роста микроорганизмов в лучшем случае будет очень низкой. В большинстве же случаев при недостатке биогенных элементов или скорость роста будет нулевой, или будет наблюдаться уменьшение количества биомассы в системе и культивирования необходимого сообщества бактерий происходить не будет. Необходимо отметить, что мы предлагаем определять в течение 10...14 дней значения БПК<sub>5</sub> (а не БПК<sub>полн</sub>) в сточных водах, поступающих на биологическую очистку. Для анализа достаточности биогенных элементов в сточных водах, подаваемых на биологическую очистку, соотношения БПК<sub>полн</sub>/N/P в данном случае следует пересчитать в БПК<sub>5</sub>/N/P. При невозможности определения БПК<sub>полн</sub> и, соответственно, отношения БПК<sub>полн</sub> и БПК<sub>5</sub> для конкретных сточных вод предлагается для городских сточных вод принимать следующие значения БПК<sub>полн</sub>/БПК<sub>5</sub>:

- 1,25...1,3 для сточных вод, поступающих в аэротенки без осветления в первичных отстойниках;

- 1,35...1,40 для сточных вод после отстаивания в первичных отстойниках.

Тогда при  $\text{БПК}_{\text{полн}}/\text{БПК}_5 = 1,35$  должны соблюдаться соотношения  $\text{БПК}_5/\text{N}/\text{P} = 100/6,75/1,35$ . То есть значения отношений должны быть не более  $\text{БПК}_5/\text{N} = 100/6,75 = 14,8$  и  $\text{БПК}_5/\text{P} = 100/1,35 = 74$ .

Согласно полученным лабораторным данным, приведенным на рис. 5.2, 5.4 и 5.6, определяем отношения  $\text{БПК}_5$  к общему азоту по Кьельдалю и общему фосфору (рис. 5.9 и 5.10).

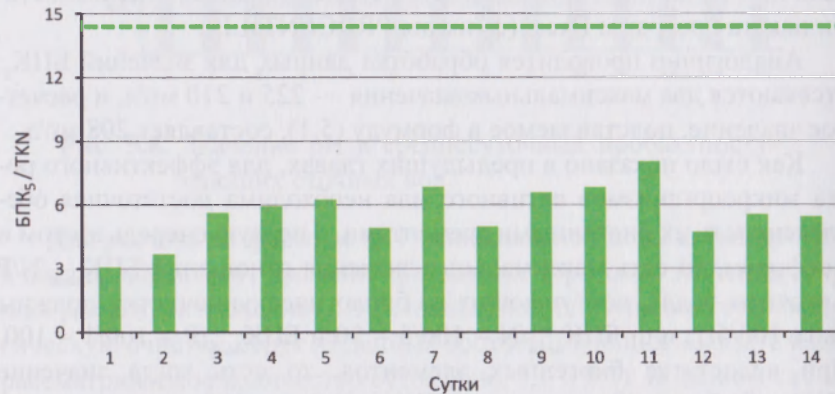


Рис. 5.9. Отношение значений  $\text{БПК}_5$  к концентрации ТKN на основании данных рис. 5.3 и 5.4

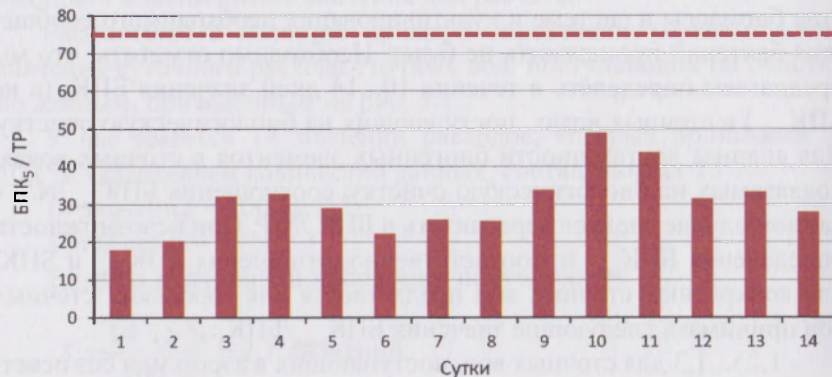


Рис. 5.10. Отношение значений  $\text{БПК}_5$  к концентрации TP на основании данных рис. 5.3 и 5.6

Как видно из рис. 5.9 и 5.10, в рассматриваемом нами случае отношение  $\text{БПК}_5$  к концентрации ТKN составляет от 3 до 8, что существенно ниже предельного максимального значения 14,8, а отношение  $\text{БПК}_5$  к концентрации общего фосфора — от 18 до 48, что также удовлетворяет требованию к отношению  $\text{БПК}_5/\text{TP}$ . Таким образом, в данном случае количество биогенных элементов в поступающих сточных водах достаточно, и дополнительное дозирование азота и фосфора не требуется [130].

Как было показано в главах 1—4, если в поступающих на биологическую очистку сточных водах значения pH выходят из диапазона 6,5...8,5, необходимо установить систему pH-регулирувания. Анализ значений pH в рассматриваемых сточных водах, поступающих на биологическую очистку (см. рис. 5.8), показывает, что в данном случае система pH-регулирувания не требуется.

Уравнения (5.1)—(5.3) используются для расчета технологических параметров запуска одного аэротенка. В общем случае при запуске сразу нескольких аэротенков условия, прописанные в табл. 5.1, и расчетную начальную дозу активного ила, рассчитываемую по уравнению (5.1), рекомендуется обеспечивать не сразу во всех запускаемых аэротенках, а только в одном или нескольких сооружениях. Это позволит обеспечить в них условия для максимально быстрого культивирования необходимой биомассы активного ила. В случае, когда нет возможности постепенного наращивания расхода сточных вод, поступающих на запускаемые сооружения, следует производить перераспределение потоков и создавать оптимальные условия культивирования биомассы только в одном или двух аэротенках (в любом случае не более 25 % от общего количества запускаемых аэротенков) [103]. Это делается для того, чтобы иметь возможность обеспечить рассмотренные выше условия 1-го этапа технологического запуска сооружений. Для обеспечения необходимого для 1-го этапа запуска сооружений значения аэробного возраста активного ила это значение необходимо обеспечить для всех сооружений, имеющих общую иловую систему. Рассмотрим примеры расчетов, которые необходимо провести перед технологическим запуском сооружений биологической очистки сточных вод.

**Пример 13.** Определить минимальную дозу активного ила в начальный момент технологического запуска  $X_{0, start-up, min}$  одного аэротенка-вытеснителя, реализующего технологию окисления органических соединений, нитри-денитрификации и химического удаления фосфора.

Исходные данные:

- проектные данные:

характеристики сточных вод, поступающих на биологическую очистку:

суточный расход сточных вод, подаваемый на рассматриваемый аэротенк, 6000 м<sup>3</sup>/сут;

БПК<sub>полн</sub> = 320 мг/л;

концентрация общего азота 34,0 мг/л;

концентрация общего фосфора 10,0 мг/л;

доза активного ила в аэротенках 3,2 г/л;

- фактические текущие характеристики сточных вод:

суточный расход сточных вод 2000 м<sup>3</sup>/сут;

БПК<sub>5</sub> = 150 мг/л;

БПК<sub>полн</sub>/БПК<sub>5</sub> = 1,32;

концентрация общего азота 22,0 мг/л;

концентрация общего фосфора 5,0 мг/л.

Из табл. 5.1 определяем минимальную дозу активного ила на период 1-го этапа технологического запуска  $X_{start-up}$  для аэротенков-вытеснителей, работающих по технологии окисления органических соединений, нитри-денитрификации и химического удаления фосфора. Как видно из таблицы, минимальное значение  $X_{start-up, min}$  составляет 1,5 г/л.

Определяем проектное значение БПК<sub>5</sub> исходя из проектного значения БПК<sub>полн</sub> сточных вод, поступающих на биологическую очистку, с учетом текущих данных сточных вод — БПК<sub>полн</sub>/БПК<sub>5</sub> = 1,32:

$$\text{БПК}_5 = \text{БПК}_{\text{полн}} / 1,32 = 320 / 1,32 = 242 \text{ мг/л.}$$

Далее, из уравнения (5.1), с учетом проектных и фактических текущих данных сточных вод, поступающих на биологическую

очистку, определяем минимальную дозу активного ила в начальный момент технологического запуска  $X_{0, start-up, min}$ :

$$X_{0, start-up, min} = X_{start-up, min} \frac{Q_{d, act}}{Q_{d, design}} \frac{S_{S, act}}{S_{S, design}} = 1,5 \frac{2000}{6000} \frac{150}{242} = 0,31 \text{ г/л.}$$

Для определения количества активного ила, которое требуется завезти с действующих очистных сооружений, необходимо знать дозу активного ила в сооружениях, откуда будет забираться активный ил,  $X_{exter}$ .

**Пример 14.** Определить объем активного ила  $V_{1,0}$  завозимого с соседних очистных сооружений для обеспечения минимально требуемой дозы активного ила в начальный момент технологического запуска  $X_{0, start-up, min}$

Исходные данные:

объем запускаемого аэротенка 4000 м<sup>3</sup>;

доза активного ила в регенераторах очистных сооружений, откуда планируется забирать активный ил для запуска рассматриваемого аэротенка,  $X_{exter} = 10$  г/л;

минимальную дозу активного ила в начальный момент технологического запуска  $X_{0, start-up, min}$  принять из Примера 13.

Количество сухого вещества активного ила  $M_{sl,0}$ , которое следует подать в начальный момент времени в запускаемый аэротенк, определяется из формулы (5.2):

$$M_{sl,0} = X_{0, start-up, min} V_{aer} = 0,31 \cdot 4000 = 1240 \text{ кг.}$$

Объем активного ила  $V_{1,0}$ , который требуется подать в запускаемый аэротенк (завезти с других очистных сооружений), определяется по формуле (5.3):

$$V_{1,0} = \frac{M_{sl,0}}{X_{exter}} = \frac{1240}{10} = 124 \text{ м}^3.$$

### 5.1.2. Процедура технологического запуска сооружений

Запуск сооружений биологической очистки, как было сказано выше, или производится с помощью уже сформированной («затравочной») биомассы, завозимой с действующих сооружений, или предполагает развитие биомассы из микроорганизмов поступающей сточной воды при невозможности заселения сооружений сформированным активным илом. Применение «затравочного» активного ила обеспечивает более надежный и предсказуемый технологический запуск очистных сооружений по сравнению с развитием собственной биомассы без «затравочного» ила. К тому же период вывода сооружений на проектный режим работы при использовании «затравочного» активного ила в несколько раз меньше.

**Подготовка к запуску сооружений биологической очистки при использовании «затравочного» активного ила:**

1. Зоны с переменной и/или пульсирующей аэрацией должны быть переведены в режим постоянной аэрации на период 1-го этапа технологического запуска сооружений.

2. Концентрация растворенного кислорода во всех аэробных зонах должна быть не менее 2 мг/л.

3. Перемешивание как в аэробных, так и в анаэробных зонах не должно допускать образования застойных зон и зон осаждения ила на дно аэротенков.

4. При запуске сооружений с помощью «затравочного» активного ила максимальный расход сточных вод, поступающих в запускаемые сооружения в начальный момент запуска, должен составлять не более 30 % от проектного значения. Дальнейшее наращивание расхода должно происходить по 10 % от проектного значения каждые 2...3 дня.

**Подготовка к запуску сооружений биологической очистки без использования «затравочного» активного ила (на микроорганизмах, поступающих со сточными водами):**

1. Сточные воды должны поступать напрямую в сооружения биологической очистки, минуя первичные отстойники («байпасом»).

2. Зоны с переменной и/или пульсирующей аэрацией должны быть переведены в режим постоянной аэрации на период 1-го этапа технологического запуска сооружений.

3. Концентрация растворенного кислорода во всех аэробных зонах должна быть не менее 2 мг/л.

4. Сточные воды, по возможности, должны подаваться в запускаемые аэротенки периодически: после заполнения аэротенка подача сточных вод в него прекращается на 7 ч, в течение которых продолжается аэрация. Все насосы внутренних рециклов при этом включены. Затем аэрация отключается, и происходит отстаивание в течение одного часа. После этого открываются входные и выходные шибера аэротенка, и в него поступает новая порция сточной воды, которая вытесняет проаэрированную и осветленную воду. Время подачи новой порции сточной воды  $t_{a,2}$ , ч, рассчитывается исходя из подаваемого расхода и объема аэротенка:

$$t_{fil} = \frac{V_{aer}}{Q_{start-up}} 24, \quad (5.4)$$

где  $V_{aer}$  — объем аэротенка, м<sup>3</sup>;

$Q_{start-up}$  — текущий расход сточных вод, подаваемых в аэротенк, м<sup>3</sup>/сут.

5. По достижении дозы активного ила в запускаемых сооружениях, равной минимальной расчетной (полученной по формуле (5.1)), сооружения следует переводить в проточный режим работы с включением в схему работы первичных отстойников (при их наличии).

6. При запуске сооружений без «затравочного» активного ила расход подаваемой сточной воды изначально может соответствовать проектному.

Избыточный активный ил следует начинать выводить при превышении дозой активного ила максимального значения из диапазона, рекомендуемого в период запуска сооружений биологической очистки и указанного табл. 5.1, или при превышении значения общего возраста активного ила, указанного в табл. 5.1.

Расчет количества выводимого избыточного ила  $Q_{w,exc}$ , м<sup>3</sup>/сут, следует проводить исходя из рекомендуемых в табл. 5.1 значений аэробных возрастов активного ила для конкретного типа сооружения  $\theta_{a,start-up}$ , текущей дозы активного ила и текущей дозы отводимого (избыточного) активного ила  $X_{w,exc}$ :

$$\mathcal{L}_{was} = \frac{X_{start-up} V_{aerob}}{\theta_{a,start-up} X_{was}} \quad (5.5)$$

Исходя из описанных выше процедур при запуске сооружений биологической очистки необходимо выполнить следующие действия:

**Запуск с помощью «затравочного» активного ила:**

1. Заполнить аэротенки сточной водой таким образом, чтобы уровень воды превышал уровень аэраторов на 0,2...0,3 м.
2. Включить аэрацию, при этом расход воздуха должен составлять не более 15...20 % от проектного значения.
3. Заполнить аэротенки сточной водой, увеличивая параллельно расход воздуха в сооружение.
4. При заполнении аэротенка на 2/3 от значения рабочего уровня жидкости включить в работу мешалки.
5. Загрузить в аэротенки «затравочный» активный ил в количестве, рассчитанном по формулам (5.1)—(5.3).
6. Включить сооружения в проточный режим работы, обеспечив в начальный момент времени расход сточной воды не более 30 % от проектного значения и увеличивая его каждые 2...3 дня на 10 %. Включить насосы возвратного активного ила и насосы всех внутренних рециклов.
7. Включить зоны с переменной и/или пульсирующей аэрацией в режим постоянной аэрации.
8. Отрегулировать и ежедневно корректировать расход воздуха в аэротенки таким образом, чтобы концентрация растворенного кислорода во всех аэробных зонах была не менее 2,0 мг/л.

**Запуск без «затравочного» активного ила:**

1. Заполнить аэротенки сточной водой таким образом, чтобы уровень воды превышал уровень аэраторов на 0,2...0,3 м. При использовании керамических аэраторов до включения подачи воздуха в аэротенки сооружения следует заполнить технической водой.
2. Включить аэрацию, при этом расход воздуха должен составлять не более 15...20 % от проектного значения.
3. Выключить из схемы первичные отстойники и организовать подачу неосветленной сточной воды в аэротенки.

4. Заполнить аэротенки сточной водой, увеличивая параллельно расход воздуха в сооружение. Включить зоны с переменной и/или пульсирующей аэрацией в режим постоянной аэрации.
  5. При заполнении аэротенка на 2/3 от значения рабочего уровня жидкости включить в работу мешалки.
  6. Заполнить сооружения до рабочего уровня, прекратить подачу сточной воды в запускаемые сооружения на 7 ч, закрыть входной и выходной шиберы аэротенков, подачу воздуха не выключать.
  7. Выключить подачу воздуха на 1 ч.
  8. Открыть входной и выходной шиберы аэротенков и заполнить аэротенки очередной порцией сточной воды. Время заполнения аэротенка рассчитывается по формуле (5.4).
  9. Закрыть входной и выходной шиберы аэротенков.
  10. Включить подачу воздуха в аэротенки.
  11. По достижении дозы активного ила, равной минимальной расчетной, перевести сооружения в проточный режим работы.
  12. Включить в работу первичные отстойники (при их наличии).
  13. Включить сооружения в проточный режим работы.
  14. Включить насосы возвратного активного ила и насосы всех внутренних рециклов.
  15. Отрегулировать и ежедневно корректировать расход воздуха в аэротенки таким образом, чтобы концентрация растворенного кислорода во всех аэробных зонах была не менее 2,0 мг/л.
- 1-й этап технологического запуска сооружений биологической очистки завершается при условии, что эффективность окисления органических соединений соответствует значениям, приведенным в табл. 5.1, а концентрация взвешенных веществ в очищенной воде, выходящей из вторичных отстойников, не превышает 15 мг/л (если в проекте вторичные отстойники рассчитываются на концентрацию взвешенных веществ на выходе из вторичных отстойников менее 15 мг/л) или соответствует проектному значению, если в проект заложены концентрации очищенной воды после вторичных отстойников более 15 мг/л.
- В ходе 2-го этапа технологического запуска сооружений биологической очистки сточных вод их переводят в режим эксплуатации,

предусмотренный Проектом. Успешным итогом технологического запуска является достижение проектного качества очищенной воды при эксплуатации сооружений в соответствии с проектными показателями качественного и количественного состава поступающих на очистку сточных вод.

### 5.1.3. Технологический контроль сооружений в период их запуска

Оперативный контроль качественных и количественных показателей поступающих и очищенных сточных вод, а также технологического режима работы аэротенков является основным условием успешного запуска сооружений биологической очистки и достижения проектного качества их работы в минимальные сроки.

Технологические параметры работы сооружений биологической очистки рекомендуется вести по следующим показателям (табл. 5.2).

В табл. 5.3 приведены показатели поступающих на биологическую очистку сточных вод и очищенных вод, которые рекомендуется нами определять в ходе запуска сооружений.

**Таблица 5.2.** Показатели контроля аэротенков при запуске сооружений

| Показатели  | Ед. изм.           | Периодичность выполнения                                   |
|---|--------------------|--|
| Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне    | мг/л               | Ежедневно  |
| Доза активного ила на выходе из аэротенка               | г/л                | Ежедневно  |
| <i>F/M</i>  | —                  | Ежедневно (в день поступления данных по БПК <sub>5</sub> ) |
| Иловый индекс   | см <sup>3</sup> /г | Ежедневно  |
| Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне* | мг/л               | Ежедневно  |
| Общий возраст активного ила                             | сут                | Ежедневно  |
| Аэробный возраст активного ила                          | сут                | Ежедневно  |
| Время пребывания сточной воды в аэротенке               | ч                  | Ежедневно  |

\* Данные показатели в очищенной воде начинают снимать на 2-м этапе запуска сооружений.

**Таблица 5.3.** Показатели контроля поступающих и очищенных сточных вод при запуске сооружений

| Показатели                          | Ед. изм.            | Периодичность выполнения       |                   |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------|
|                                     |                     | Поступающая сточная вода       | Очищенная вода    |
| Суточный расход сточных вод         | м <sup>3</sup> /сут | Ежедневно, за предыдущие сутки | —                 |
| Динамика часовых расходов           | м <sup>3</sup> /ч   | Ежедневно, за предыдущие сутки | —                 |
| pH                                  | —                   | Ежедневно                      | Ежедневно         |
| Температура                         | °С                  | Ежедневно                      | —                 |
| Взвешенные вещества                 | мг/л                | Ежедневно                      | Ежедневно         |
| XПК                                 | мг/л                | Ежедневно                      | Ежедневно         |
| БПК <sub>5</sub>                    | мг/л                | Ежедневно                      | Ежедневно         |
| БПК <sub>полн</sub>                 | мг/л                | 1 раз в 10 дней                | 1 раз в 10 дней** |
| Аммонийный азот N-NH <sub>4</sub>   | мг/л                | Ежедневно                      | Ежедневно**       |
| Нитратный азот N-NO <sub>3</sub>    | мг/л                | Ежедневно*                     | Ежедневно**       |
| Нитритный азот N-NO <sub>2</sub>    | мг/л                | Ежедневно*                     | Ежедневно**       |
| Общий азот TN*                      | мг/л                | —                              | 1 раз в 10 дней** |
| Общий азот по Кьельдалю TKN         | мг/л                | 1 раз в 10 дней                | —                 |
| Фосфор фосфатов P-PO <sub>4</sub>   | мг/л                | Ежедневно                      | Ежедневно**       |
| Нефтепродукты                       | мг/л                | Ежедневно                      | 2 раза в неделю** |
| Щелочность (как CaCO <sub>3</sub> ) | мг/л                | Ежедневно                      | 2 раза в неделю** |
| Специфические вещества*             | мг/л                | 2 раза в неделю                | 2 раза в неделю** |
| Металлы                             | мг/л                | 2 раза в неделю                | 2 раза в неделю** |

\* Для сточных вод промышленных предприятий.

\*\* Данные показатели в очищенной воде начинают снимать на 2-м этапе запуска сооружений.

### 5.1.4. Проблемы, возникающие при запуске очистных сооружений, и их решения

В период технологического запуска очистных сооружений происходят процессы культивирования и адаптации микроорганизмов активного ила к конкретным сточным водам и технологическим и конструктивным решениям запускаемого сооружения. В этот момент возможно развитие процессов, негативно сказывающихся на качестве очищенной воды.



Как было описано выше, задачей 1-го этапа запуска сооружений является достижение эффективного окисления органических соединений. На рис. 5.11 приведена динамика значений ХПК очищенных вод в ходе 1-го этапа запуска сооружений биологической очистки производственных и городских сточных вод. Следует отметить, что в обоих случаях запуск сооружений производился с помощью «затравочного» активного ила с городских очистных сооружений, работающих по технологии только окисления органических соединений. На запускаемых очистных сооружениях как в случае очистки производственных стоков, так и в случае очистки городских сточных вод реализованы технологии окисления органических соединений, нитри-денитрификации (схемы с предвключенной денитрификацией) и химического удаления фосфора (реагент в обоих случаях — хлорид железа  $FeCl_3$ ). Значения ХПК производственных сточных вод, поступающих на биологическую очистку, составляли 330...620 мг/л в период вывода сооружений в проектный режим работы. ХПК городских сточных вод, поступающих в аэротенки, составляло 350...510 мг/л. Значения рН, отношения БПК<sub>полн</sub> к азоту и фосфору для обоих типов сточных вод укладывались в диапазоны требований, предъявляемых к реализации биологической очистки.



Рис. 5.11. Динамика ХПК в очищенной воде очистных сооружений, запущенных с помощью «затравочного» активного ила

Как видно из рис. 5.11, для достижения удовлетворительных результатов по окислению органических соединений городским очистным сооружениям потребовалась всего неделя, сооружения же биологической очистки производственных сточных вод вышли на стабильный режим удаления органических соединений только на 25-е сутки. Следует еще раз подчеркнуть, что и те, и другие сооружения были запущены с помощью «затравочного» активного ила, доставленного с других очистных сооружений. Очевидно, что городские сточные воды более близки друг к другу по составу, чем и объясняется более короткий срок адаптации и культивирования микроорганизмов активного ила на запускаемых городских очистных сооружениях. Кроме того, в производственных сточных водах более вероятно наличие токсичных для микроорганизмов активного ила веществ, а также трудноокисляемых органических соединений, что уменьшает скорости роста бактерий.

В период адаптации микроорганизмов ила в запускаемых сооружениях, при недостаточной еще эффективности очистки по органическим соединениям и взвешенным веществам, в качестве временных мер по снижению негативного влияния на водоемы сточных вод, очищенных недостаточно, предлагается дозирование солей алюминия, железа, полимерных коагулянтов. Дозирование реагентов позволяет добиться повышения эффективности осветления очищенной воды во вторичных отстойниках и, как следствие, снижения БПК<sub>10/10</sub> очищенной воды. Применяемые реагенты должны подаваться непосредственно в аэротенки или в поток возвратного активного ила.

**Пенообразование** является достаточно частым явлением при запуске сооружений биологической очистки. Как правило, наблюдается развитие белой пены. Белая волнообразная пена образуется при наличии в сточной воде синтетических моющих средств и других поверхностно-активных веществ. В этих условиях при запуске очистных сооружений при низкой дозе активного ила белая пена накапливается на поверхности аэротенков и легко разносится ветром на прилегающую территорию. Эта ситуация продолжается недолго, до

момента накопления достаточного количества биомассы в системе. В данном случае рекомендуется уменьшить расход воздуха, подаваемого в аэротенки, при этом концентрация растворенного кислорода в аэробных зонах должна быть не менее 2,0 мг/л. При достижении в аэротенках дозы активного ила 1,5...2,0 г/л процесс образования белой пены останавливается и затем начинает идти на убыль. Через 2...3 недели белая пена, при отсутствии других факторов ее развития (в первую очередь таких, как повышенные концентрации СПАВ в поступающей сточной воде), исчезает.

Процесс **вспухания активного ила** при запуске сооружений биологической очистки развивается из-за повышенной нагрузки по органическим соединениям на активный ил в момент недостаточной его концентрации. Для предотвращения развития данного процесса при использовании «затравочного» активного ила его доза должна быть не менее значения, рассчитанного по формуле (5.1). При запуске сооружений без «затравочного» ила данный процесс зачастую происходит, и к этому просто нужно быть готовым. Как было показано в гл. 1, вспухание ила характеризуется его низкой способностью к осадению и уплотнению. В результате активный ил вымывается из системы с очищенной водой из вторичных отстойников. Детально вопросы вспухания активного ила описаны в п. 1.2.2. Развитие процессов вспухания при запуске сооружений связано, помимо высокой нагрузки на ил (высокого значения  $F/M$ ), с низким значением рН, низкой концентрацией растворенного кислорода, недостатком биогенных элементов в поступающей сточной воде, залповыми поступлениями высококонцентрированных и токсичных сточных вод. При устранении данных причин и увеличении возраста активного ила проблема вспухания активного ила будет решена.

Если при запуске очистных сооружений концентрация растворенного кислорода 2,0 мг/л не достигается, это может говорить о **недостаточной производительности аэрационной системы** как о чисто технической проблеме. В этом случае необходимо проверить работоспособность и заявленную производителем эффективность аэрационной системы и при необходимости добавить недостающее оборудование. С другой стороны, если в сооружениях реализуется

технология нитри-денитрификации, то при определенных соотношениях БПК<sub>полн</sub> и азота в поступающих сточных водах при низкой эффективности процесса нитрификации и, соответственно, отсутствии процесса денитрификации расчетного количества воздуха, заложенного в производительность аэрационных машин, просто не хватает для обеспечения требуемого кислородного режима. В этом случае наиболее низкие концентрации растворенного кислорода будут наблюдаться в начале 2-го этапа запуска сооружений, когда начинает развиваться процесс нитрификации, однако количества образуемых нитратов еще недостаточно для эффективного ведения процесса денитрификации. В этом случае необходимо увеличить расход воздуха до максимально возможного, рассмотрев вопрос использования резервного оборудования на данный период.

При **низких значениях рН** в систему добавляют известь и решают в дальнейшем вопрос об установке системы регулирования рН.

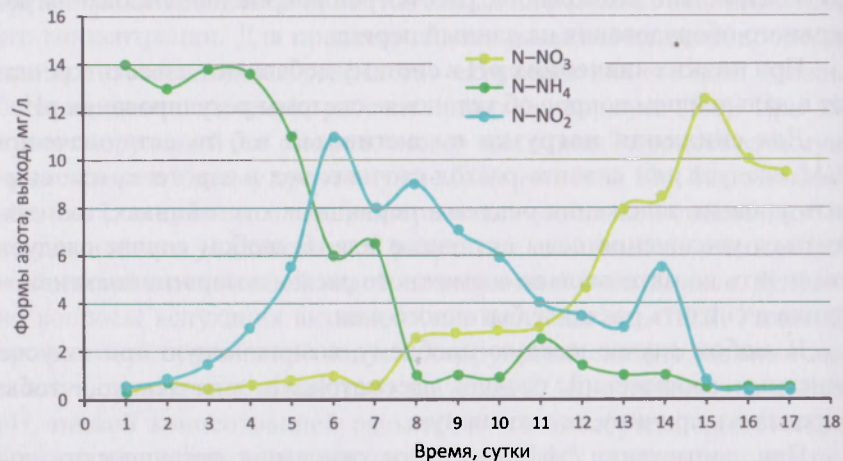
Для **снижения нагрузки на активный ил**, то есть значения  $F/M$ , следует или снизить расход сточных вод в аэротенк, или снизить уровень заложения осадка в первичных отстойниках, или дождаться увеличения дозы активного ила. В любом случае следует увеличить до максимально возможного расход возвратного активного ила и снизить расход избыточного ила.

В любом случае каждую проблему, возникающую при запуске очистных сооружений, следует рассматривать комплексно, чтобы определить причину, ее вызвавшую.

При достижении эффективности окисления органических соединений 75...95 % (в зависимости от реализуемой технологии, см. табл. 5.1), требуемой дозы активного ила (см. табл. 5.1), хорошо сформированного хлопка активного ила и рабочих седиментационных характеристик активного ила (иловый индекс не более 140 см<sup>3</sup>/г) переходят, как было сказано выше, ко 2-му этапу технологического запуска очистных сооружений. К концу 1-го этапа технологического запуска расход сточных вод должен быть равен проектному значению.

Первой задачей 2-го этапа технологического запуска является достижение требуемой эффективности процесса нитрификации. Аэротенки требуется перевести в проектный режим работы.

При достижении проектного значения аэробного возраста активного ила и при соблюдении кислородного режима аэротенков через 7...10 сут наблюдается снижение концентрации аммонийного азота в очищенной воде. При этом при развитии процессов нитрификации и снижении в очищенной воде концентрации аммонийного азота наблюдается увеличение концентрации нитритов, которая может достигать 5,0...7,0 мг/л. Аккумуляция нитритов в этом случае — закономерный процесс, который связан с шокowymi нагрузками на активный ил по аммонийному азоту на начальном этапе эксплуатации сооружения до выхода в устойчивый режим с нитрификацией (рис. 5.12) [131].

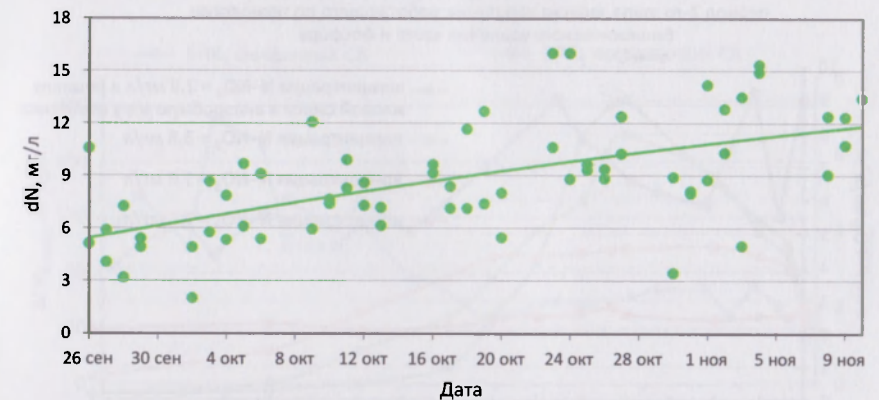


**Рис. 5.12.** Содержание различных форм азота в очищенной воде аэротенка при развитии процессов нитрификации и денитрификации в ходе 2-го этапа технологического запуска аэротенка

*Увеличение концентрации нитритов в очищенной воде на начальном этапе выхода сооружений в режим нитрификации — закономерное явление, и дополнительных действий от эксплуатационного персонала не требуется.*

При поддержании проектного режима работы аэротенков концентрация нитритов в очищенной воде начинается уменьшаться через 3...5 сут после того, как концентрация аммонийного азота в очищенной воде достигает значения менее 1 мг/л. Проектное качество по  $N-NO_2$  в очищенной воде достигается, при соблюдении проектного режима работы сооружения, через 10...12 сут после начала снижения нитритов в очищенной воде.

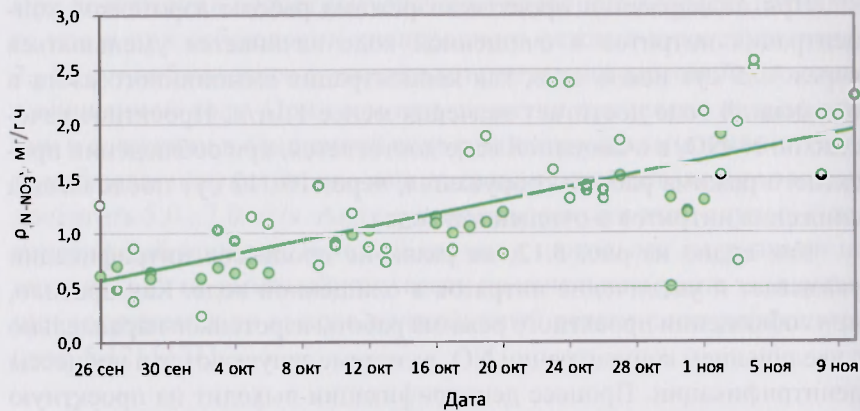
Как видно из рис. 5.12, на развитие процессов нитрификации указывает и увеличение нитратов в очищенной воде. Как правило, при соблюдении проектного режима работы аэротенков параллельно с увеличением концентрации  $NO_3$  в системе запускаются и процессы денитрификации. Процесс денитрификации выходит на проектную эффективность в течение 7...10 сут и достигает максимального значения через 12...14 сут. На рис. 5.13 приведена типовая динамика количества восстановленных нитратов  $dN$  в ходе развития процесса денитрификации при запуске аэротенков.



**Рис. 5.13.** Динамика количества восстановленных нитратов  $dN$  в ходе развития процесса денитрификации при запуске аэротенков (после развития процессов нитрификации)

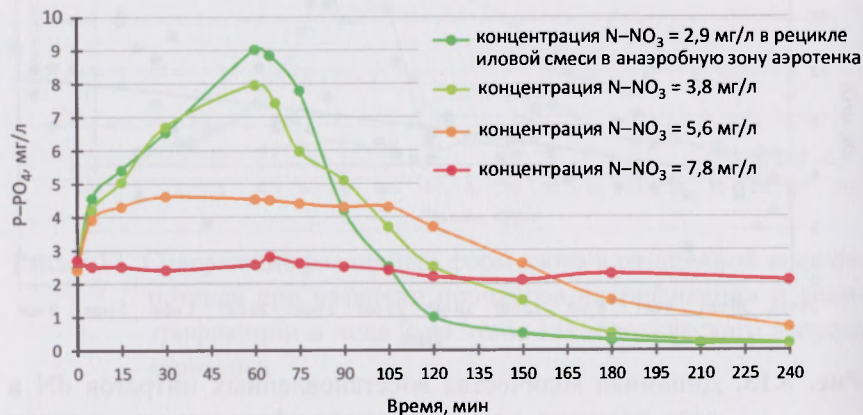
На рис. 5.14 представлена динамика увеличения скоростей денитрификации при запуске данного процесса.

Глава 5. Эффективная эксплуатация сооружений биоочистки сточных вод



**Рис. 5.14.** Динамика скоростей денитрификации при запуске аэротенков (после развития процесса нитрификации)

Кинетика высвобождения-поглощения фосфора для аэротенка в период 2-го этапа запуска аэротенка, работающего по технологии биологического удаления азота и фосфора

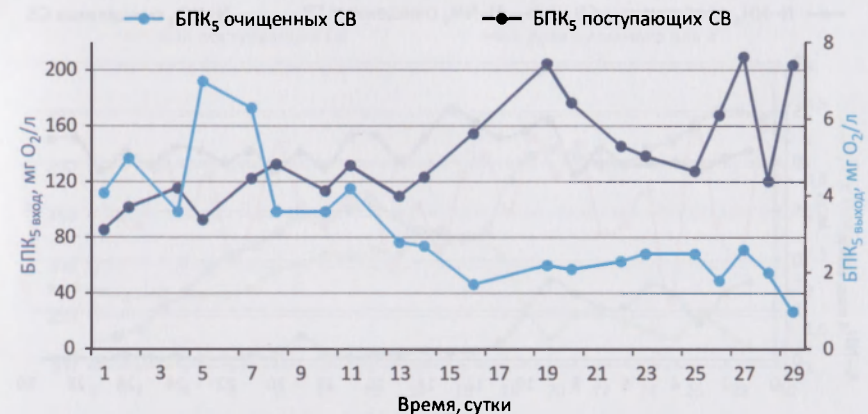


**Рис. 5.15.** Динамика эффективности процесса биологического удаления фосфора в зависимости от динамики концентрации азота нитратов в рецикле иловой смеси в анаэробную зону аэротенка

5.1. Технологический запуск сооружений биологической очистки сточных вод

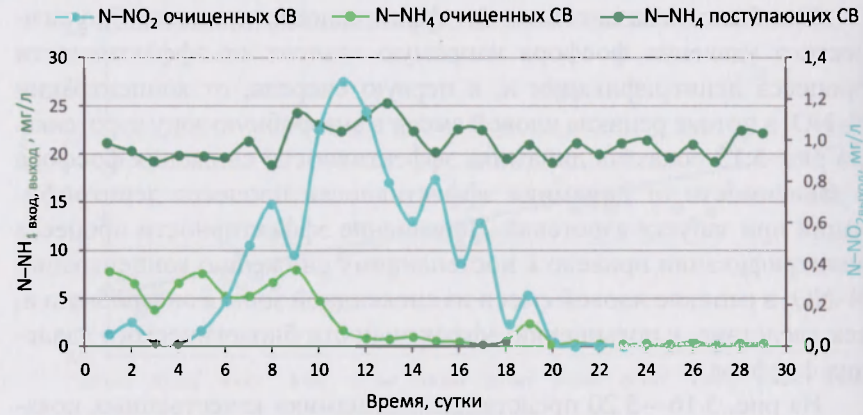
Как было показано в гл. 3, эффективность процесса биологического удаления фосфора напрямую зависит от эффективности процесса денитрификации и, в первую очередь, от концентрации  $N-NO_3$  в потоке рецикла иловой смеси в анаэробную зону аэротенка. На рис. 5.15 показана динамика эффективности снижения фосфора в зависимости от динамики эффективности процесса денитрификации при запуске аэротенка. Повышение эффективности процесса денитрификации привело к постепенному снижению концентрации  $N-NO_3$  в рецикле иловой смеси из аноксидной зоны в анаэробную и, как следствие, к повышению эффективности биологического удаления фосфора.

На рис. 5.16—5.20 представлены динамики качественных показателей очищенной воды в ходе 2-го этапа технологического запуска сооружений. В данном примере приведены данные аэротенка, работающего по технологии биологического удаления азота и фосфора по схеме УСТ.

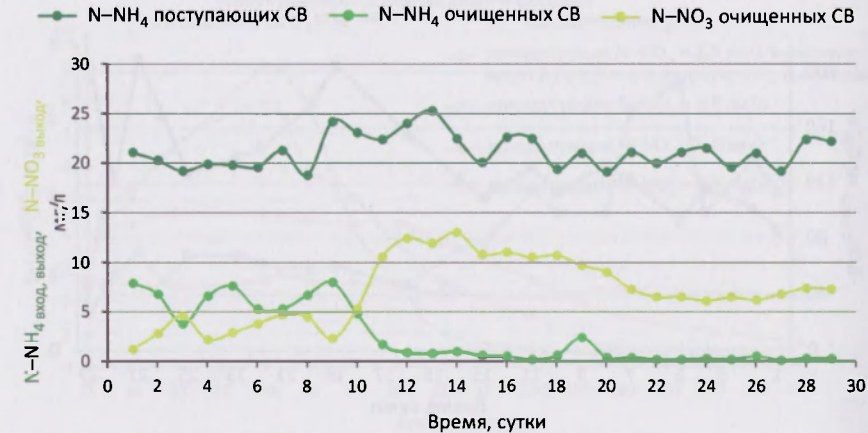


**Рис. 5.16.** Динамика значений  $BPK_5$  очищенной воды ( $BPK_5$ , выход) в ходе 2-го этапа технологического запуска аэротенка, работающего по технологии биологического удаления азота и фосфора по схеме УСТ

Глава 5. Эффективная эксплуатация сооружений биочистки сточных вод

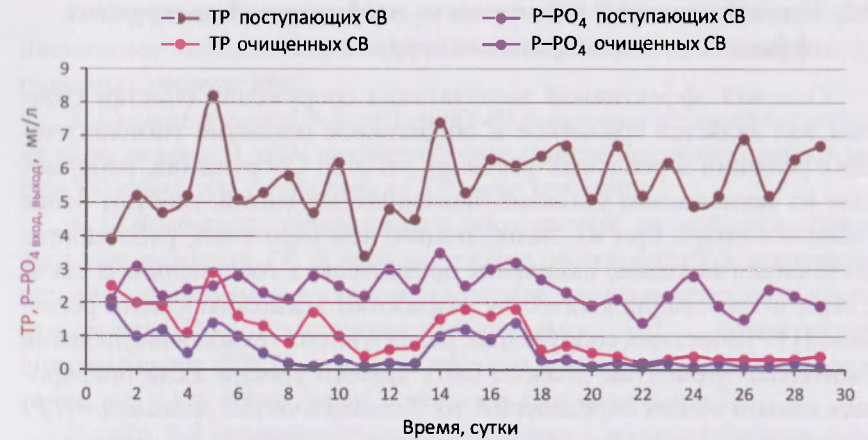


**Рис. 5.17.** Динамика концентраций  $N-NH_4$  и  $N-NO_2$  в очищенной воде в ходе 2-го этапа технологического запуска аэротенка, работающего по технологии биологического удаления азота и фосфора по схеме УСТ



**Рис. 5.18.** Динамика концентраций  $N-NO_3$  в очищенной воде в ходе 2-го этапа технологического запуска аэротенка, работающего по технологии биологического удаления азота и фосфора по схеме УСТ

5.1. Технологический запуск сооружений биологической очистки сточных вод



**Рис. 5.19.** Динамика концентраций общего фосфора и фосфора фосфатов в очищенной воде в ходе 2-го этапа технологического запуска аэротенка, работающего по технологии биологического удаления азота и фосфора по схеме УСТ



**Рис. 5.20.** Динамика дозы активного ила в ходе 2-го этапа технологического запуска аэротенка, работающего по технологии биологического удаления азота и фосфора по схеме УСТ

## 5.2. Технологический регламент — необходимый инструмент эффективной эксплуатации сооружений

Основой эффективной эксплуатации сооружений очистки сточных вод является грамотное и оперативное принятие технологических решений в реальных условиях работы. Сооружения, работающие по технологиям удаления биогенных элементов, требуют более гибкого подхода при их эксплуатации, чем аэротенки, работающие по технологии только окисления органических соединений. В связи с этим и требования к качеству разработки Технологического регламента (ТР) очистных сооружений, реализующих технологии удаления биогенных элементов, должны быть другого уровня. Если оперировать языком общих определений, то: *Технологический регламент (ТР) является основным документом, согласно которому осуществляют мероприятия по очистке сточных вод и обработке осадка на канализационных очистных сооружениях. Назначением Технологического регламента является обеспечение эффективной, надежной и экономичной работы сооружений и оборудования, снижение негативного воздействия на окружающую среду за счет уменьшения нагрузки по загрязняющим веществам, поступающим с очищенными сточными водами, и снижение объемов образующегося осадка. Технологический регламент устанавливает единые требования к контролю и управлению производством на очистных сооружениях.*

В ТР должны быть не только прописаны фактические очистные сооружения и даны базисное описание процессов, перечень оборудования и реагентов, эксплуатационные расходные характеристики и пр., но и определены действия технологов в нештатных и аварийных ситуациях. ТР должен быть, по сути, подробной инструкцией эксплуатации конкретных очистных сооружений с детальным описанием технологических режимов их работы в различных условиях.

В состав Технологического регламента должны входить следующие разделы:

1. *Назначение и область применения ТР.* В данном разделе прописывается назначение конкретного ТР, состав сооружений, которые охватывает данный документ, должностные лица, для которых данный ТР предназначен, и их ответственность за выполнение требований ТР.

2. *Порядок и обоснование пересмотра ТР.* В данном разделе прописывается порядок пересмотра и срок действия ТР конкретных очистных сооружений.

3. *Система учета действующих Регламентов и своевременного их пересмотра.* В этом разделе прописывается процедура регистрации ТР, процессы согласования ТР и его хранения.

4. *Сокращения, определения и обозначения, являющиеся обязательным разделом ТР.* В данном разделе прописываются все сокращения, используемые в данном документе, включая текстовую часть (например, ТР — Технологический регламент, НД — нормативная документация, ЕСКД — единая система конструкторской документации и т. д.), а также схемы и чертежи, прилагаемые к ТР.

В табл. 5.4 приведен пример обозначения технологических сооружений и оборудования, а в табл. 5.5 — пример обозначения технологических потоков.

Таблица 5.4. Пример обозначения некоторых технологических сооружений

| Буквенно-цифровое обозначение | Наименование сооружения (оборудования)                            |
|-------------------------------|---|
| ПК                            | Приемная камера   |
| Р                             | Решетки   |
| ПСК                           | Песколовки  |
| ПО                            | Первичные отстойники  |
| ВО                            | Вторичные отстойники  |
| А                             | Аэротенки   |
| УИ                            | Уплотнители избыточного активного ила (илоуплотнители)            |
| ФД                            | Фильтры доочистки   |
| НС                            | Насосные станции  |
| НС-ОС                         | Насосная станция первичного осадка (осадка первичных отстойников) |
| ЦФ                            | Центрифуги  |
| ВД                            | Воздуходувки  |
| ПСП                           | Песковые площадки   |
| АС                            | Аэробный стабилизатор   |

**Таблица 5.5.** Пример обозначения некоторых технологических потоков

| Буквенно-цифровое обозначение | Наименование потока                          |
|-------------------------------|--|
| СВ                            | Сточная вода — общее обозначение             |
| СВ1                           | Поступающая сточная вода                     |
| СВ2                           | Сточная вода после решеток                   |
| СВ3                           | Сточная вода после песколовков               |
| СВ4                           | Осветленная вода после первичных отстойников |
| СВ5                           | Очищенная вода после вторичных отстойников   |
| СВ6                           | Сливная вода с уплотнителей активного ила    |
| СВ7                           | Вода с песковых площадок                     |
| ОР                            | Отбросы с решеток                            |
| АИ                            | Активный ил — общее обозначение              |
| АИ1                           | Иловая смесь после аэротенков                |
| АИ2                           | Возвратный активный ил                       |
| АИ3                           | Избыточный активный ил                       |
| Вз                            | Воздух                                       |
| ПП                            | Песковая пульпа                              |

5. *Описание работы сооружений.* Описание работы включает в себя общую характеристику сооружений, перечень технологических материалов и реагентов, которые применяются в ходе очистки сточных вод и обработки осадков, критерии выбора технологических режимов эксплуатации, характеристику поступающих сточных вод, описание технологии всех этапов очистки и обработки осадка и параметры всех выходящих потоков (очищенной воды и осадков).

6. *Принципиальная схема очистных сооружений.* В данном разделе описывается схема очистных сооружений и прописывается движение всех потоков. Ниже приведен пример описания принципиальной схемы очистных сооружений.

**Пример 15.** Описание принципиальной схемы очистных сооружений.

Сточная вода (СВ1) поступает на решетки (Р). Извлеченные решетками отбросы (ОР) вывозятся автотранспортом на

полигоны ТБО. Сточная вода после решеток (СВ2) поступает на горизонтальные песколовки (ПСК). Песок из песколовков в виде пульпы (ПП) перекачивается на песковые площадки (ПСП). Песок (П) с песковых площадок (ПСП) вывозится на полигоны ТБО. Вода с песковых площадок (СВ7) перекачивается в приемную камеру (ПК). Сточная вода после песколовков (СВ3), расход которой измеряется на лотках Паршалля, подается в радиальные первичные отстойники  $D = 40$  м (ПО). Осадок из первичных отстойников (ОС) насосами, установленными в насосной станции первичного осадка (НС-ОС), перекачивается на центрифуги ЦФ. Осветленная вода (СВ4) после первичных отстойников (ПО) поступает в аэротенки (А-1, -2, -3, -4); туда же подается возвратный активный ил (АИ2) и воздух (Вз). Иловая смесь (АИ1) с аэротенков (А-1, -2, -3, -4) подается во вторичные радиальные отстойники  $D = 40$  м (ВО). Очищенная вода (СВ5) из отстойников (ВО) направляется на фильтры доочистки (ФД) и сбрасывается в водоприемник. Возвратный активный ил (АИ2) из вторичных отстойников (ВО) поступает в аэротенки (А-1, -2, -3, -4), а избыточный активный ил (АИ3) направляется в илоуплотнители  $D = 8$  м (УИ). Сливная вода (СВ6) от илоуплотнителей (УИ) вместе с возвратным активным илом (АИ2) возвращается в аэротенки (А-1, -2, -3, -4).

В данном разделе Технологического регламента приводится также спецификация технологических сооружений обработки сточной воды и осадков (табл. 5.6).

7. *Контроль технологического процесса.* Контроль технологического процесса на очистных сооружениях ведется на основании данных лабораторного контроля, проводимого химико-бактериологической лабораторией (ХБЛ), и приборного контроля. В данном разделе приводят точки отбора проб, способ отбора проб и контролируемый поток (объект). Примеры описания некоторых точек отбора проб и приборного контроля приведены в табл. 5.7 и 5.8.

Таблица 5.6. Пример спецификации некоторых технологических сооружений обработки сточных вод и осадков

| Позиция по схеме | Наименование сооружения                      | Кол-во | Материал               | Технические характеристики   | Общий рабочий объем, м <sup>3</sup> |
|------------------|--|--------|------------------------|--|-------------------------------------|
| ПК               | Приемная камера                              | 1      | Монолитный железобетон | Камера открытая подзатопленная. В камеру поступает сточная вода по ж/б водоводу $D = 1000$ от ГНС  | 150 (стропильный объем)             |
| Р                | Механизированная решетка                     | 3      | —                      | Решетки механизированные, тип ..., ширина 500 мм, общая высота 1930 мм, ширина прозора 6 мм  | —                                   |
| П                | Горизонтальные песколовки                    | 2      | Монолитный железобетон | Песколовки горизонтального типа. Производительностью ... м <sup>3</sup> /ч каждая. Система удаленная песка — гидравлическая с скребковым механизмом. Габариты: м. $12 \times 4 \times 1,5$ , $V = 72$ м <sup>3</sup>   | 144                                 |
| РПО              | Распределительная чаша первичных отстойников | 1      | Монолитный железобетон | На распределительной чаше имеются 8 кранов и ручные щитовые затворы  | —                                   |
| ПО               | Первичные отстойники $D = 40$                | 4      | Монолитный железобетон | Отстойники радиального типа с бортом или илоскребами, полуножной доской и жироборным бункером. Гидравлическая глубина 2,7 м; гидравлический объем 2308 м <sup>3</sup> ; производительность 25 тыс. м <sup>3</sup> /сут | 9232                                |

|     |  |   |   |  |       |
|-----|--|---|---|--|-------|
| ПСП | Песковые площадки  | 2 | —   | Открытый земляной бассейн. $S = 1100$ м <sup>2</sup>   | —     |
| А   | Аerotенки-высечители, четыре-коридорные открытые, прямоугольные резервуары | 4 | Ж/б, промежуточные перегородки из сборного ж/б                | Подача воздуха осуществляется через систему воздухопроводов к аэрационным системам. Тип аэраторов — дисковые $L = 60$ м, $B = 32$ м, $H = 4,5$ м, ширина коридора 8 м, объем 8640 м <sup>3</sup> | 34560 |
| ВО  | Вторичные отстойники $D = 40$ м  | 4 | Цилиндрические резервуары из монолитного ж/б                  | Тип отстойников радиальной, удлиненные ила — илососами. Гидравлическая глубина 3,3 м, объем 4145 м <sup>3</sup>  | 16380 |
| ГМЗ | Главное машинное здание  | 1 | Кирпичное здание общей площадью 800 м <sup>2</sup>            | —  | —     |
|     | Установлены: турбовоздуховки   | 3 | —   | Воздуховки типа ..., производительностью 740 м <sup>3</sup> /мин, установочная мощность ... кВт  | —     |
| УИ  | Илоуплотнители   | 2 | Цилиндрические резервуары радиального типа из монолитного ж/б | $D = 8$ м, площадь водного зеркала 50 м <sup>2</sup> , объем 261 м <sup>3</sup>  | 522   |
| НС  | Насосная станция   | 1 | Кирпичное здание  | —  | —     |



Далее в этом разделе прописывается порядок контроля технологических процессов очистки сточных вод с указанием для каждого контролируемого параметра средств измерения, типа прибора, диапазона измерения, погрешности, оборудования, места и периодичности контроля, нормативного документа (методики) и исполнителя измерения.

В разделе 7 также прописывается порядок входного контроля реагентов и затем нормативные требования к качеству очищенных вод с указанием нормативного документа, определяющего качественные характеристики для каждого параметра, срок действия данного документа и методика определения данного показателя.

**Таблица 5.7.** Пример описания некоторых точек отбора проб сточной воды и осадков

| Способ отбора | Контролируемый поток (объект)                | Место отбора проб   |
|---------------|--|---|
| А/п*          | Поступающая сточная вода                     | Приемная камера ПК  |
| А/п           | Осветленная вода после первичных отстойников | Камера № 2  |
| А/п           | Очищенная вода                               | Камера № 3  |
| Ручной        | Осадок из первичных отстойников              | Пробоотборный кран на насосной станции первичного осадка  |
| Ручной        | Активный ил                                  | Резервуар активного ила на насосной станции активного ила |
| Ручной        | Стушенный активный ил                        | Лоток сбора активного ила                                 |
| Ручной        | Обезвоженный осадок с центрифуг              | Из камер выгрузки   |

\* А/п — автоматический пробоотборник.

8. *Принципиальная схема управления очистными сооружениями.*  
 В данном разделе описывается схема принятия управленческих решений, компетенция и ответственность должностных лиц за принятие управленческих решений, порядок согласований принятых решений, а также данные о характере получаемой информации, периодичности передачи информации, подразделениях, получающих информацию, и т. д.

**Таблица 5.8.** Примеры описания приборного контроля очистных сооружений

| Контролируемый параметр   | Количество точек контроля | Тип прибора* | Год внедрения                        |
|---|---------------------------|--------------|--------------------------------------|
| 1. Расход поступающей воды:<br>лотки Паршала  | 1                         |              | 1998                                 |
| 2. Расход воздуха:<br>на аэротенки<br>на вспомогательные нужды ГМЗ  | 4<br>1                    |              | 2006<br>2009                         |
| 3. Расход осадка:<br>расход осадка первичных отстойников (первичного осадка)<br>расход уплотненного активного ила<br>расход избыточного активного ила   | 1<br>1<br>1               |              | 2007<br>2008<br>2009                 |
| 4. Уровень поступающей сточной воды:<br>уровень в приемной камере<br>уровень в канале механизированных решеток  | 1<br>1                    |              | 2009<br>2008                         |
| 5. Уровень осадков:<br>уровень осадка в насосной станции первичного осадка  | 1                         |              | 2008                                 |
| 6. Концентрация взвешенных веществ в воде:<br>в поступающей сточной воде на лотках Паршала<br>в осветленной воде после первичных отстойников<br>в иловой смеси аэротенков<br>в биологически очищенной воде<br>в очищенной воде после фильтров доочистки | 1<br>1<br>1<br>1<br>1     |              | 2008<br>2009<br>2010<br>2010<br>2010 |
| 7. Концентрация растворенного кислорода:<br>в аэротенках  | 4                         |              | 2009                                 |
| 8. Расход возвратного активного ила:<br>расход возвратного активного ила аэротенков № 1—4   | 4                         |              | 2004                                 |

\* Здесь марки приборов не приводятся, но при составлении ТР спецификация всех приборов и оборудования указывается в обязательном порядке.

9. *Схема материального баланса.* Материальный баланс представляет собой вещественное выражение закона сохранения массы вещества, согласно которому во всякой замкнутой системе масса веществ, вступающих в реакцию, равна массе веществ, образующихся в результате реакции. Материальный баланс составляют по уравнению основной реакции с учетом параллельных и побочных реакций. Анализ материального баланса позволяет получить информацию, на основании которой представляется возможным видеть ситуацию в целом и принимать решения исходя из общего анализа работы очистных сооружений. Уравнение материального баланса для любого вещества, участвующего в тех или иных превращениях в рассматриваемой системе, имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Масса} \\ \text{поступающего} \\ \text{в систему} \\ \text{вещества} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Масса} \\ \text{выходящего} \\ \text{из системы} \\ \text{вещества} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Масса} \\ \text{накапливаемого} \\ \text{в системе} \\ \text{вещества} \end{array} \right\} \quad (5.6)$$

Если в результате химических или биохимических преобразований одно вещество не переходит в другое, то материальный баланс системы по этому веществу может быть представлен следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Количество} \\ \text{поступающего} \\ \text{в систему} \\ \text{вещества } x \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Количество} \\ \text{выходящего} \\ \text{из системы} \\ \text{вещества } x \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Количество} \\ \text{накапливаемого} \\ \text{в системе} \\ \text{вещества } x \end{array} \right\} \quad (5.7)$$

Если при составлении материального баланса используются характеристики массового расхода, то закон сохранения массы принимает вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Массовый} \\ \text{расход} \\ \text{в систему} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Массовый} \\ \text{расход} \\ \text{из системы} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Скорость} \\ \text{накопления массы} \\ \text{вещества в системе} \end{array} \right\} \quad (5.8)$$

В аналитическом виде данное уравнение записывается следующим образом:

$$QS_0 - QS = V\rho(S), \quad (5.9)$$

где  $Q$  — расход потока, поступающего в рассматриваемое сооружение или группу сооружений;

$S_0$  — качественная характеристика потока, поступающего в сооружение или группу сооружений, по рассматриваемому веществу;

$S$  — качественная характеристика потока, выходящего из сооружения или группы сооружений, по рассматриваемому веществу;

$V$  — объем сооружения (системы);

$\rho(S)$  — скорость накопления рассматриваемого вещества в системе.

В тех случаях, когда накопление массы вещества не наблюдается, система находится в устойчивом состоянии. При составлении материального баланса по веществам, которые могут образовываться или разрушаться в процессе химических или биохимических реакций, уравнения материального баланса будут иметь дополнительные слагаемые:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Скорость} \\ \text{поступления} \\ \text{вещества } x \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Скорость} \\ \text{удаления} \\ \text{вещества } x \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{Скорость} \\ \text{образования} \\ \text{вещества } x \\ \text{в ходе реакции} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Скорость} \\ \text{разрушения} \\ \text{вещества } x \\ \text{в ходе реакции} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Скорость} \\ \text{накопления} \\ \text{вещества } x \\ \text{в системе} \end{array} \right\} \quad (5.10)$$

При составлении материального баланса системы за определенный промежуток времени уравнение будет иметь вид:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Поступление} \\ \text{вещества } x \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Удаление} \\ \text{вещества } x \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{Количество} \\ \text{вещества } x, \\ \text{образованного} \\ \text{в ходе реакции} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Количество} \\ \text{вещества } x, \\ \text{разрушенного} \\ \text{в ходе реакции} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Прирост} \\ \text{количества} \\ \text{вещества} \\ \text{в системе} \end{array} \right\} \quad (5.11)$$

Если система находится в устойчивом состоянии, то правый член уравнения равен нулю.

При анализе системы, в которой протекают одна или более реакций, следует записать уравнение для каждой реакции, а также рассчитать массу каждого реагента и продуктов их взаимодействия по уравнению реакции. Проведение анализа работы сооружений по материальному балансу позволяет прогнозировать:

- количество и массу отбросов с решеток;
- количество песка с песколовков;
- качество осветленной воды для проведения расчета нагрузки на аэротенки и управления возрастом ила;
- качество и количество осадка первичных отстойников для расчета нагрузки на сооружения обработки осадков;
- требуемое количество воздуха на аэрацию аэротенков;
- расчетный возраст ила для прогноза эффективности биологических процессов;
- окислительную и нитрификационную мощность сооружения для расчета качества очищенной воды и предельной нагрузки, которую может выдержать сооружение;
- требуемый рецикл возвратного активного ила при заданной концентрации, определяемой эффективностью работы вторичных отстойников;
- качество биологически очищенной воды;
- массу (по сухому и беззольному веществу) и расход уплотненного избыточного активного ила для прогнозирования нагрузки на сооружения обработки осадков;
- расход сливной воды с илоуплотнителей;
- расчетную дозу флокулянта для сооружений обезвоживания осадка, количество и массу сухого вещества обезвоженного осадка.

10. *Технологический анализ работы очистных сооружений.*

В данном разделе предоставляются производственные показатели работы очистных сооружений, такие как:

А. Расход поступающей воды:

- годовой расход, тыс. м<sup>3</sup>/год;
- среднемесячный расход, м<sup>3</sup>/мес;
- среднесуточный расход за год, м<sup>3</sup>/сут;
- среднесуточный расход за месяц максимального притока, м<sup>3</sup>/сут;
- максимальный часовой расход за сутки максимального притока, м<sup>3</sup>/ч;
- средний часовой расход за год, м<sup>3</sup>/ч.

Б. Качество поступающей воды и очищенной воды по основным показателям:

- рН;
- температура, °С;
- ХПК, мг/л;
- взвешенные вещества, мг/л;
- БПК<sub>5</sub>, мг/л;
- БПК<sub>полн</sub>, мг/л;
- плотный остаток, мг/л;
- СПАВ, мг/л;
- фенолы, мг/л;
- аммонийный азот, мг/л;
- нитритный азот, мг/л;
- нитратный азот, мг/л;
- фосфор фосфатов, мг/л.

В. Индивидуальные показатели поступающей и очищенной воды:

- хлориды, мг/л;
- сульфаты, мг/л;
- сероводород и сульфиды, мг/л;
- железо, мг/л;
- марганец, мг/л;
- алюминий, мг/л;
- кальций, мг/л;
- цинк, мг/л;
- никель, мг/л;
- медь, мг/л;
- кадмий, мг/л;
- хром 3+, мг/л;
- свинец, мг/л;
- стронций, мг/л;
- ртуть, мг/л;
- кремний, мг/л;
- и т. д.

Г. Бактериологические показатели поступающей и очищенной воды:

- общие колиформные бактерии, КОЕ/100 мл;
- термотолерантные колиформные бактерии, КОЕ/100 мл;

общее микробное число (определение прямым счетом), 1000 КОЕ/мл;

общее число сапрофитных бактерий (определение посевом на МПА), 1000 КОЕ/мл;

колифаги, БОЕ/100 мл.

Д. Поступающая нагрузка по основным показателям:

ХПК, кг/сут;

взвешенные вещества, кг/сут;

БПК<sub>5</sub>, кг/сут;

БПК<sub>полн</sub>, кг/сут;

аммонийный азот, кг/сут;

фосфор фосфатов, кг/сут;

дополнительно — по индивидуальным показателям.

Поступающая нагрузка по рассматриваемым загрязнениям  $M(S)$ , кг/сут, определяется (см. формулу (4.1)) как произведение концентрации рассматриваемого загрязнения  $S_i$  и суточного расхода сточных вод  $Q_{sr}$

Е. Эффективность очистки по основным показателям. Расчет эффективности снижения качественных параметров сточных вод производится как для канализационных очистных сооружений в целом, так и для отдельных сооружений по формуле (4.9).

11. *Принятие технологических решений.* Одним из основополагающих разделов ТР является раздел «Принятие технологических решений». В этом разделе описываются как штатные ситуации работы очистных сооружений, так и нештатные и аварийные ситуации, и действия эксплуатационных служб. В Регламенте должны быть прописаны отклонения от нормального рабочего режима работы конкретных очистных сооружений, которые возможны в процессе эксплуатации, и действия эксплуатационных служб для их устранения и быстрого выхода сооружений на рабочий режим. В отдельной таблице должны быть прописаны для каждого сооружения (и основного оборудования) возможные неполадки, причины и действия служб эксплуатации по их устранению. Кроме того, в Регламенте прописываются возможные нарушения технологического режима и способы их устранения.

### 5.3. Мероприятия по повышению технологической и энергетической эффективности канализационных очистных сооружений

Для разработки мероприятий по повышению технологической и энергетической эффективности работы действующих очистных сооружений необходимо, прежде всего, проведение их комплексного обследования (технологического аудита).

#### 5.3.1. Технологический аудит сооружений очистки сточных вод

Комплексный технологический аудит канализационных очистных сооружений представляет собой оценку их технологического состояния с помощью определенных критериев, в результате чего определяются стратегия и тактика разработки и реализации мероприятий, направленных на повышение эффективности работы очистных сооружений.

Технологический аудит включает в себя экспертную оценку существующих технологических решений как действующих, так и проектируемых очистных сооружений, и разработку рекомендаций, необходимых для повышения их технологической и энергетической эффективности.

Целью технологического аудита, проводимого на очистных сооружениях, является получение объективных данных о техническом состоянии и уровне технологических решений рассматриваемых сооружений, оценка соответствия их эксплуатационных режимов Технологическим регламентам, определение предела эффективности работы сооружений, определение текущей их эффективности, разработка мероприятий достижения очистными сооружениями предела их технологической эффективности и разработка мероприятий по снижению эксплуатационных затрат.

Заказчиками технологического аудита и потенциальными потребителями его результатов являются:

1. Акционеры, финансовое и техническое руководство предприятия. Результаты технологического аудита позволяют руководящему составу предприятия принимать экономически обоснованные технологические и технические решения, достижимые в реально обозримом

время с достоверными результатами, в том числе по стратегическому развитию предприятия и его производственной инфраструктуры. Результаты профессионального независимого технологического аудита очистных сооружений позволяют найти компромисс между капитальными затратами и эксплуатационными издержками (включая административные и штрафные) как на текущий момент, так и на перспективное развитие сооружений.

2. Руководство эксплуатационной службы очистных сооружений. Результаты проведенного технологического аудита позволяют рассчитать предел технологической эффективности работы существующих очистных сооружений, оценить (и сравнить с предельной) фактическую эффективность очистных сооружений и определить мероприятия по достижению в конкретных условиях существующих сооружений предела их технологической эффективности. Сочетание опыта технологов и инженеров очистных сооружений с опытом независимых специалистов, проводящих технологический аудит, использование необходимого диагностического оборудования и корректных методик оценки эффективности технологического процесса позволят обеспечить работу сооружений на пределе их эффективности, а также разработать технологические, технические и конструктивные решения по повышению этого предела.

Схема организации работ по проведению Технологического аудита состоит из следующих этапов:

1. Заинтересованная сторона (Заказчик) ставит задачу в виде технического задания, например:

а) оценить принципиальную возможность повышения качества очищенной воды без дополнительных капитальных затрат на существующих очистных сооружениях и в случае, если это возможно, разработать мероприятия по повышению технологической эффективности работы очистных сооружений;

б) оценить возможность увеличения производительности существующих очистных сооружений без снижения качества очистки и, при наличии такой возможности, разработать технологические, технические и конструктивные решения этой задачи;

в) оценить возможность снижения эксплуатационных затрат очистных сооружений без снижения эффективности очистки и разработать технологические, технические и конструктивные решения этой задачи;

г) провести технологический аудит предлагаемых Заказчику третьей стороной технологических (предпроектных, проектных) решений на реконструкцию или новое строительство очистных сооружений;

д) оценить технологические и технические возможности имеющихся сооружений и оборудования для обеспечения требуемого качества очищенной воды. Разработать технологические, технические, конструктивные решения, спецификацию необходимого основного оборудования, то есть оценить размер инвестиций, этапы инвестирования и сроки реализации для обеспечения требуемых количественных и качественных параметров очищенных вод;

е) определить приоритеты реконструкции очистных сооружений для принятия экономически обоснованных решений при различных вариантах поэтапного развития сооружений;

ж) определить в реализации технологических процессов и организации производства зоны нерационального использования оборудования, реагентов, электроэнергии и т. д.

Результаты технологического аудита позволяют дать ответ на следующие вопросы:

а) соответствуют ли технологические, технические и конструктивные решения, используемые на рассматриваемых очистных сооружениях, интересам и планам Заказчика;

б) как наиболее эффективно использовать имеющиеся ресурсы;

в) как изменение тех или иных технологических, технических и конструктивных решений позволит повысить эффективность работы очистных сооружений и оптимизировать эксплуатационные затраты;

г) определение этапов модернизации (или реконструкции) очистных сооружений.

2. Выполнение работы начинается с ознакомления с очистными сооружениями: схемой, чертежами, проектными и фактическими данными по качественному и количественному составу как

поступающих сточных вод, так и очищенных; проектными и реальными параметрами реализации технологических процессов на всех этапах очистки сточных вод и обработки осадка, затем идет сравнение проектных и текущих фактических данных. Проводится оценка требований к оборудованию, технологиям, конструктивным и техническим параметрам, которые могут обеспечить достижение поставленных Заказчиком целей.

3. Анализ полученных результатов проведенного технологического аудита и составление аудиторского отчета, который включает в себя:

- а) краткое описание поставленной задачи и определение целей технологического аудита;
- б) информацию о сооружениях и реализованных в них технологических процессах;
- в) описание существующих очистных сооружений и базовых проектных решений (если аудиту подвергается проект реконструкции очистных сооружений или проект нового строительства);
- г) анализ работы очистных сооружений, технических и/или технологических аварийных и/или нештатных ситуаций, анализ причины работы сооружений с параметрами, не соответствующими проектным данным, описание новых факторов, влияющих на эффективность очистки, появившихся в процессе эксплуатации и не учтенных в Проекте;
- д) анализ информации, проведение расчетов;
- е) рекомендации по реализации технологических и технических решений, позволяющих достичь предела эффективности действующих сооружений или обеспечить требуемое качество очищенной воды (в зависимости от целей, поставленных Заказчиком);
- ж) предложения по долгосрочной программе инвестиций и/или мероприятий, направленных на достижение цели, стоящей перед Заказчиком;
- з) экспертная оценка необходимости проведения масштабной реконструкции очистных сооружений для достижения поставленной цели.

Результаты технологического аудита позволяют Заказчику составить долгосрочную Программу работ в соответствии с имеющи-

мися и перспективными ресурсами и задачами, ранжированными по приоритету выполнения, на основании которой Заказчиком составляются текущие планы инвестиций, закупок оборудования, работ своих подразделений и мероприятий по повышению эффективности работы очистных сооружений.

### 5.3.2. Примеры отчета о проведении Технологического аудита сооружений очистки сточных вод

Пример отчета по Технологическому аудиту представлен ниже и состоит из следующих разделов:

1. *Введение. Объект технологического обследования.* В этом разделе приводится общая схема очистных сооружений и дается описание сооружений и потоков с количественными и качественными характеристиками.

**Пример 1. Краткое описание схемы очистных сооружений.** Сточные воды поступают на очистные сооружения... в приемную камеру ПК, и далее сточная вода подается на решетки... с прозором ...мм. В настоящее время одна решетка из четырех заменена на решетку... с прозором ...мм. После решеток сточная вода поступает в 3 горизонтальные песколовки производительностью ...тыс. м<sup>3</sup>/сут каждая с гидроэлеваторным удалением песка со скребковым механизмом. Песчаная пульпа подается на песковые площадки, откуда песок вывозится на полигон... После песколовки сточная вода поступает на 4 первичных радиальных отстойника диаметром 40 м каждый. Первичный осадок через насосную станцию осадка подается на сооружения обезвоживания осадка — в центрифуги марки... в количестве трех единиц... и т. д.

2. *Методы исследования.* В этом разделе даются регламентные требования к реализации процессов очистки сточных вод и обработки осадка на очистных сооружениях, к качеству очищенных вод и обработанному осадку. Здесь же проводится сравнение соответствия текущих технологических режимов работы сооружений регламентным требованиям. В табл. 5.9 приведен пример сравнения регламентных и текущих режимов работы сооружений только по расходу поступающих сточных вод.

**Пример 2.**

**Таблица 5.9.** Сравнение регламентных и текущих режимов работы сооружений (по расходу поступающих сточных вод)

| Параметр  | Регламентное значение | Текущее значение | Отклонение          |  |
|---|-----------------------|------------------|---------------------|--|
|   |                       |                  | Характер отклонения | Влияние на процесс   |
| <b>Решетки</b>  |                       |                  |                     |  |
| 1. Максимальный часовой расход поступающих сточных вод, м <sup>3</sup> /ч | 1770                  | 2124             | Аварийный           | Проскок грубодисперсных примесей на песколовки и в первичные отстойники  |
| <b>Песколовки</b>   |                       |                  |                     |  |
| 2. Максимальный часовой расход поступающих сточных вод, м <sup>3</sup> /ч | 1770                  | 2124             | Аварийный           | Вынос фракций песка, превышающих значения, заложенные в Проект, и увеличение содержания песка в осадке первичных отстойников. Содержание песка в осадке первичных отстойников в рассматриваемых сооружениях составляет 18 %, что превышает регламентное значение содержания песка в осадке первичных отстойников в 1,8 раза                    |
| <b>Первичные отстойники</b>   |                       |                  |                     |  |
| 3. Максимальный часовой расход поступающих сточных вод, м <sup>3</sup> /ч | 1770                  | 2124             | Аварийный           | Снижение эффективности осветления сточной воды с 55 % (по взвешенным веществам), заложенных в Проект и Регламент, до 47 %, увеличение прироста активного ила в аэротенках на 23 мг/л по сравнению с проектным и регламентным значениями, увеличение энергозатрат на биологическую очистку составило 22 % по сравнению с регламентным значением |

**Окончание табл. 5.9**

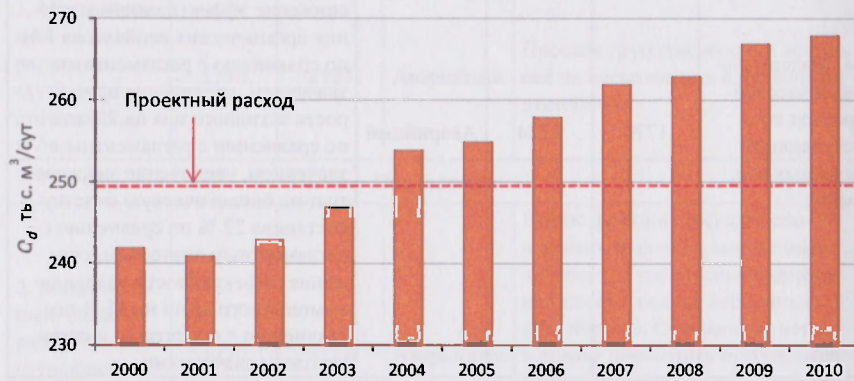
| Параметр  | Регламентное значение | Текущее значение | Отклонение          |   |
|---|-----------------------|------------------|---------------------|---|
|   |                       |                  | Характер отклонения | Влияние на процесс  |
| <b>Аэротенки</b>  |                       |                  |                     |   |
| 4. Максимальный часовой расход поступающих сточных вод, м <sup>3</sup> /ч | 1770                  | 2124             | Аварийный           | Снижение концентрации растворенного кислорода в аэротенке до 0,8 мг/л (при регламентном значении концентрации 2,2 мг/л), снижение эффективности удаления органических веществ на 5 % по сравнению с регламентным значением, увеличение прироста активного ила на 23 мг/л по сравнению с регламентным значением, увеличение энергозатрат на биологическую очистку составило 22 % по сравнению с регламентным значением, снижение эффективности удаления аммонийного азота на 45 % по сравнению с проектным и регламентным значениями |
| <b>Вторичные отстойники</b>   |                       |                  |                     |   |
| 5. Максимальный часовой расход поступающих сточных вод, м <sup>3</sup> /ч | 1770                  | 2124             | Аварийный           | Концентрация взвешенных веществ в очищенной воде превышает регламентное значение на 3 мг/л  |

При проведении Технологического аудита сравнение проводят по всем показателям работы всех сооружений, указанных в Технологическом регламенте.

3. *Определение соответствия режимов эксплуатации очистных сооружений и качества очищенных вод и обработанных осадков Технологическому регламенту.* В этом разделе проводится детальный анализ работы всех сооружений, описываются причины

несоответствия текущих и регламентных значений количественных и качественных характеристик потоков воды и осадков, а также режимов эксплуатации сооружений.

**Пример 3. Анализ работы решеток очистных сооружений.** Анализ динамики расхода сточных вод, поступающих на очистные сооружения... (рис. 5.21), показывает увеличение расхода за рассматриваемый промежуток времени с 242 000 до 268 000 м<sup>3</sup>/сут (по среднесуточному расходу), т. е. на 11 %. При этом превышение проектного расхода составило 7 % по среднесуточному расходу.



**Рис. 5.21.** Динамика среднесуточного расхода поступающей сточной воды по годам

В 2009 г. была проведена замена одной из 4-х решеток типа... с прозором 10 мм на решетку марки... с прозором 6 мм. Относительная продолжительность ремонта за период 2000—2010 гг. колеблется от 4,4 до 8,9 % по времени (табл. 5.10), за исключением 2009 г., когда проводились работы по замене одной решетки и относительная продолжительность ремонта составила 14,2 %.

Общее количество отбросов, улавливаемых на решетках на поступающей сточной воде, с 2000 по 2008 гг. оставалось практически постоянным. В 2009 г. за счет продолжительного ремонта по замене решетки количество задержанных отбросов (10 720 м<sup>3</sup>/год) снизилось на 10 % по сравнению со средним значением за предыдущие годы (11 929 м<sup>3</sup>/год). После замены в 2009 г. одной из 4-х решеток

прозором 10 мм на новую решетку с прозором 6 мм количество улавливаемых отбросов увеличилось на 23 % по сравнению со средним значением за 2000—2008 гг. (рис. 5.22).

**Таблица 5.10.** Параметры работы решеток на поступающей воде за 2000—2010 гг.

| Год  | Кол-во решеток марки... (новых) | Кол-во решеток марки... (старых) | Кол-во часов |         | Относит. продолжительность ремонта, % | Решеток в работе, ед. | СВ, тыс. м <sup>3</sup> /год | Кол-во отбросов            |                           |
|------|---------------------------------|----------------------------------|--------------|---------|---------------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
|      |                                 |                                  | работы       | ремонта |                                       |                       |                              | всего, м <sup>3</sup> /год | на 1000 м <sup>3</sup> СВ |
| 2000 | 0                               | 4                                | 33 590       | 1546    | 4,4                                   | 3,8                   | 88 572                       | 12 400                     | 0,14                      |
| 2001 | 0                               | 4                                | 33 218       | 1822    | 5,2                                   | 3,8                   | 87 965                       | 12 315                     | 0,14                      |
| 2002 | 0                               | 4                                | 33 358       | 1682    | 4,8                                   | 3,8                   | 88 695                       | 12 417                     | 0,14                      |
| 2003 | 0                               | 4                                | 32 797       | 2243    | 6,4                                   | 3,7                   | 90 155                       | 11 720                     | 0,13                      |
| 2004 | 0                               | 4                                | 33 625       | 1510    | 4,3                                   | 3,8                   | 92 710                       | 12 085                     | 0,13                      |
| 2005 | 0                               | 4                                | 33 463       | 1577    | 4,5                                   | 3,8                   | 93 075                       | 12 100                     | 0,13                      |
| 2006 | 0                               | 4                                | 33 043       | 1997    | 5,7                                   | 3,8                   | 94 170                       | 11 300                     | 0,12                      |
| 2007 | 0                               | 4                                | 31 921       | 3119    | 8,9                                   | 3,6                   | 95 630                       | 11 476                     | 0,12                      |
| 2008 | 0                               | 4                                | 32 852       | 2284    | 6,5                                   | 3,7                   | 95 995                       | 11 551                     | 0,12                      |
| 2009 | 1                               | 3                                | 30 064       | 4976    | 14,2                                  | 3,4                   | 97 455                       | 10 720                     | 0,11                      |
| 2010 | 1                               | 3                                | 33 358       | 1682    | 4,8                                   | 3,8                   | 97 820                       | 14 673                     | 0,15                      |



**Рис. 5.22.** Абсолютные объемы задерживаемых на решетках отбросов за период 2000—2010 гг.



Для сравнительной оценки работы решеток важной характеристикой является удельное количество отбросов — объем отбросов, собираемый решетками с 1 тыс. м<sup>3</sup> сточной воды (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Удельный объем отбросов, задерживаемых с 1000 м<sup>3</sup> поступающей сточной воды

Проведенный расчет показывает, что удельный объем отбросов, задерживаемых решетками, составляет 0,15 м<sup>3</sup>/1000 м<sup>3</sup> для решеток с прозором 10 мм и 0,18 м<sup>3</sup>/1000 м<sup>3</sup> для решеток с прозором 6 мм. Фактически удельная эффективность задержания отбросов решетками ниже расчетной (предела эффективности задержания отбросов для данного типа решеток) на 8...20 %. Объясняется это, как показали обследования сооружений, проскоком части отборов между решетками и стеной канала, где эти решетки установлены. Установка новой решетки позволила увеличить количество задерживаемого мусора на очистных сооружениях как за счет уменьшения прозора самой решетки, так и за счет устранения проскока мусора в обход решеток в канале, где установлена новая решетка.

Снижение удельного объема отбросов с 1 тыс. м<sup>3</sup> на очистных сооружениях до момента установки новой решетки объясняется пропорциональным увеличением гидравлической нагрузки на решетки. При рассмотрении удельного объема удержанных отбросов с 1 тыс. м<sup>3</sup> сточной воды в зависимости от гидравлической нагрузки очевидна тенденция уменьшения эффективности задержания отбросов с ростом расхода сточных вод (рис. 5.24).

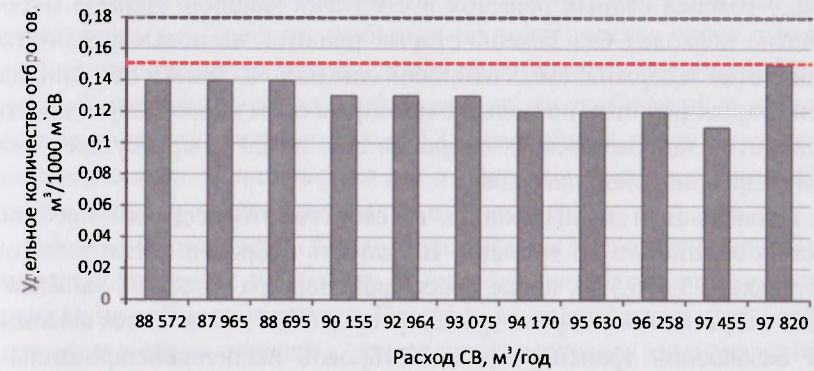


Рис. 5.24. Зависимость эффективности удержания отбросов на решетках от годового расхода поступающих сточных вод

Анализ работы решеток показывает, что данные сооружения не работают на пределе своей эффективности, что связано с двумя основными причинами:

- 1) наличием щелей между рамами решеток и стенками каналов, через которые проскакивает крупный мусор. Эти щели образовались из-за неправильной установки решеток при их монтаже;
- 2) решетки работают с гидравлической перегрузкой, что приводит к проскокам отбросов через прозоры решеток.

Установка новой решетки с прозором 6 мм позволила увеличить общее количество задерживаемых на очистных сооружениях отбросов на 23 %. Результаты приведенного расчета материального баланса показали, что эффективность задержания отбросов новой решеткой совпадает с пределом ее эффективности.

4. *Рекомендации по итогам Технологического аудита.* В этом разделе выдаются рекомендации в соответствии с задачами и целями проведения конкретного Технологического аудита.

**Пример 4. Рекомендации по мероприятиям для повышения эффективности работы блока решеток механической очистки.** Для повышения эффективности задержания отбросов на решетках очистных сооружений рекомендуется, в первую очередь, провести ремонт каналов решеток механической очистки и устранить щели

между рамами старых решеток и стенками каналов. Данное мероприятие позволит без замены старых решеток на новые увеличить количество задерживаемых отбросов еще на 7 %. Замена оставшихся трех старых решеток на новые с прозором 6 мм позволит увеличить количество задерживаемых отбросов еще на 20 % при существующей гидравлической нагрузке.

Проведенный анализ показал, что свойства отбросов решеток остаются постоянными во времени. Влажность отбросов после решеток составляет 75...76,5 %, после пресс-транспортера — 68...71 %. Влажность отбросов после пресс-транспортеров 68...71 % является высокой для безопасной транспортировки отбросов неспециализированным транспортом. Второй проблемой вывоза отбросов, кроме влажности, является инфекционная опасность необработанных отбросов.

В качестве первоочередной меры для уменьшения объемов, влажности и массы вывозимых отбросов с целью сокращения затрат на вывоз предлагается использование компакторов для мокрых отходов с обеззараживанием.

#### 5. Заключение. Выводы Технологического аудита.

**Пример 5. Заключение по Технологическому аудиту проекта и фактической реализации аэротенков и вторичных отстойников очистных сооружений.** Проведенный Технологический аудит позволяет констатировать следующее:

1. *Проектное качество* очищенных вод по всем трем формам азота (аммонийного, нитратного и нитритного) *не соответствует Техническому заданию* (ТЗ) на данный Проект. В ТЗ требования к качеству очищенных сточных вод соответствуют ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения 1-й категории. Концентрация аммонийного азота очищенной воды, заложенная в Проект, составляет 4,0 мг/л, в то время как в ТЗ требование к концентрации аммония составляет 0,5 мг/л (0,39 мг/л по аммонийному азоту); качество очищенной воды в Проекте по нитритному азоту и нитратному азоту вообще не зафиксировано, в то время как в ТЗ требования к концентрациям данных параметров в очищенной воде соответствуют требованиям к ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения, то есть 0,02 и 9,1 мг/л соответственно.

2. Для обеспечения требований к качеству очищенных вод, предусмотренных в Проекте, требуется технологическая схема с реализацией процессов только окисления органических соединений и неполной нитрификации, для обеспечения же требований к качеству очищенных вод, заложенных в ТЗ, *необходима реализация схемы нитрификации, денитрификации и удаления фосфора* (биологического, биолого-химического или химического).

3. *Схема реализации* биологической очистки, описанная в Пояснительной записке к Проекту, и *технологическая схема*, представленная на рабочих чертежах Проекта, *не совпадают* между собой, при этом в обоих случаях в схемах предусмотрены зоны анаэробные (усреднитель — анаэробный реактор), аноксидные (денитрификатор) и аэробные (аэротенк-нитрификатор и биореактор доочистки). Это говорит о том, что авторами Проекта предусматривалась реализация не только процессов окисления органических соединений, но и удаления в сточных водах соединений азота и фосфора. Однако обе схемы (в Пояснительной записке к Проекту и на рабочих чертежах Проекта), помимо несоответствия друг другу, содержат *принципиальные ошибки*, что делает невозможным в обоих случаях проведение процесса денитрификации, то есть снижения азота нитратов, образующегося в ходе процесса нитрификации.

4. *Технологические и технические решения*, предложенные в Проекте для реактора доочистки, не позволяют обеспечить проектную эффективность снижения концентрации органических соединений и взвешенных веществ.

5. *Технологическая схема биологической очистки*, заложенная в Проект, *принципиально не позволяет достичь качества* очищенной воды, соответствующего качеству, указанному в ТЗ, то есть обеспечить качество очищенной воды на уровне ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения; т. е. технологическая схема ошибочна и требует изменений потоков и рециклов и оптимизации технических решений в существующих реакторах.

6. *Объемы сооружений существенно занижены*. Даже при оптимизации самой технологической схемы объемов биологических реакторов недостаточно, для обеспечения требуемого в ТЗ качества

очищенной воды при проектном качестве поступающей воды объем нитрификатора должен быть больше проектного в 2,1 раза.

7. В настоящее время фактические значения расходов поступающих сточных вод на очистные сооружения в 3,3...4,3 раза меньше проектных, что позволяет обеспечить достаточно стабильную нитрификацию: расчетные значения аммонийного азота составляют 0,4 мг/л, фактические — 0,5...3,0 мг/л. При этом превышение реальных значений аммонийного азота над расчетными объясняется не процессами в аэротенке (нитрификаторе), а процессом аммонификации, который развивается во вторичных отстойниках при отмирании ила, удаление которого при существующих решениях вторичных отстойников невозможно вести удовлетворительно.

8. Для реализации процессов *биологического удаления фосфора*, помимо изменения технологической схемы реализации процессов биологической очистки, необходимо полностью исключить попадание растворенного кислорода в усреднитель — анаэробный реактор и денитрификатор. Предложенное как в Пояснительной записке, так и в рабочем чертеже *решение организации рециклов с помощью эрлифтов является недопустимым*.

9. *Вторичные отстойники*, заложенные в Проект, не позволяют обеспечить требуемое качество очищенной воды по взвешенным веществам (и, соответственно, по БПК<sub>полн</sub>) на проектную производительность в связи с *ошибками как в расчете размеров сооружений, так и в конструктивных решениях систем сбора и удаления осевшего ила*. Для проектной производительности сооружений площадь поверхности вторичных отстойников должна быть в 1,7 раза больше существующей. Система сбора и утилизации ила не позволяет удалять осевший активный ил со всей площади дна отстойника, что ведет к появлению «мертвых» зон и *процессу аммонификации*.

10. *Вследствие ошибок, допущенных в ходе проектирования*, биологическая очистка на существующих сооружениях происходит только в аэротенке (нитрификаторе), то есть существующие очистные сооружения, реализованные по Проекту, позволяют реализовать только процессы окисления органических соединений и частичную нитрификацию. Усреднитель работает только на усреднение поступающих

сточных вод, и биологические процессы (денитрификация) в нем не идут, так же как и в денитрификаторе. То есть процессы денитрификации в данном сооружении в результате реализации проектной схемы идти в принципе не могут, что и подтверждается сравнением расчетных и фактических концентраций нитратного азота. *В настоящее время денитрификатор является просто транзитным объемом*.

11. Неэффективность систем сбора и отвода ила приводит к всплыванию мелких флоккул ила и, как следствие, к периодическим залповым выносам повышенных концентраций взвешенных веществ. Этот факт подтверждается широким диапазоном колебаний концентрации взвешенных веществ в очищенной воде. С учетом того, что взвешенные вещества, отводимые с очищенными водами из вторичных отстойников, в большинстве своем представлены органической фракцией, колебания концентраций взвешенных веществ приводят и к нестабильности качества по БПК.

12. В результате того, что *проектное решение не дает возможности удалять фосфор биологически*, а система химического удаления фосфора не подключена, фосфор потребляется только прирастающими микроорганизмами, что недостаточно для достижения требуемого качества очищенной воды по фосфору фосфатов.

13. Для обеспечения требований к качеству очищенных сточных вод на очистных сооружениях необходимо реализовать процессы полной нитрификации (снижение не только аммонийного азота, но и азота нитритов), денитрификации и биолого-химического удаления фосфора, что требует полного изменения технологической схемы сооружений при использовании существующих объемов.

14. Заниженные в Проекте объемы сооружений и существенное превышение фактических концентраций сточных вод, поступающих на очистные сооружения, приводят к необходимости не только изменения технологической схемы сооружений, но и *реализации методов повышения окислительной мощности сооружений для обеспечения качества очищенной воды на уровне ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения для существующих качественных характеристик поступающих сточных вод и проектных расходов*, достижение которых планируется в ближайшие 2 года.

15. *Применение методов повышения окислительной мощности сооружений и изменение технологической схемы работы сооружений позволит обеспечить качество очищенной воды (при существующем качестве поступающих сточных вод) на уровне ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения для проектного и перспективного расходов.*

16. В существующих условиях, когда *текущий расход* в разы меньше проектного, для обеспечения требуемого в ТЗ качества очищенной воды предлагается изменить технологическую схему сооружений биологической очистки с *минимальными капитальными затратами* — то есть изменить технологическую схему в *существующих объемах сооружений* без использования методов повышения окислительной мощности сооружений, а также реализовать технологические, технические и конструктивные решения, направленные на нормализацию работы вторичных отстойников.

17. Для возможности обеспечения качества очищенной воды на уровне ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения *для проектной и перспективной производительности* очистных сооружений необходимо полное изменение как технологической схемы реализации биологической очистки, так и реализации технологических и технических решений, направленных на *увеличение окислительной мощности сооружений*.

### 5.3.3. Разработка мероприятий по повышению энергетической эффективности канализационных очистных сооружений

Энергопотребление является одной из основных статей расходов на эксплуатацию канализационных очистных сооружений. Энергопотребление на очистку сточных вод варьирует в широких пределах и зависит от качества поступающих сточных вод, от требуемого качества очищенной воды, от реализуемой технологии очистки, используемого оборудования, уровня и алгоритмов АСУ, уровня эксплуатации очистных сооружений. Для большинства городских канализационных очистных сооружений с учетом перечисленных условий диапазон энергозатрат на очистку 1 м<sup>3</sup> составляет 0,15...0,5 кВт·ч. Внедрение современных технологий использования сточных вод и

осадков в качестве источника энергии на канализационных очистных сооружениях позволяет минимизировать отрицательный баланс потребления-выработки электроэнергии.

Задача грамотного управления канализационными очистными сооружениями — синхронизировать стратегию планирования капитальных затрат для развития производственной базы и адекватное повышение качества очищенных вод до требуемых нормативов с уменьшением эксплуатационных затрат до экономически обоснованного уровня. Эффективное управление сооружениями основывается на экономической сбалансированности целей и задач технологической и энергетической служб эксплуатации.

В табл. 5.11 приведено сравнение целей технологических и энергетических служб с точки зрения обеспечения эффективной работы очистных сооружений, нахождение экономически обоснованного компромисса между ними позволяет достигать требуемого качества очищенной воды при минимальных энергозатратах.

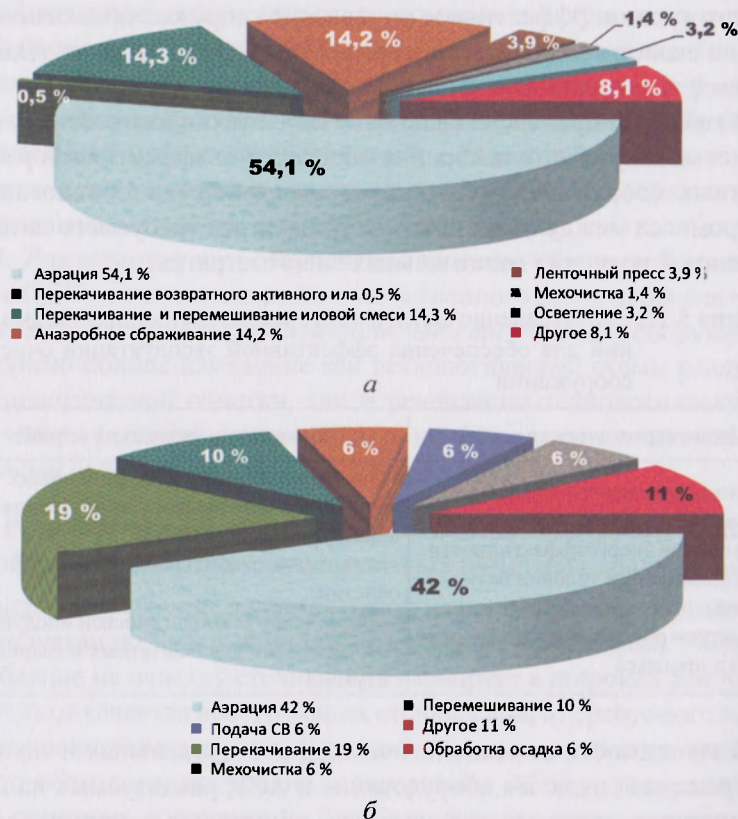
**Таблица 5.11.** Сопоставление целей и задач производственных подразделений для обеспечения эффективной эксплуатации очистных сооружений

| Цели энергетических служб  | Цели технологических служб   |
|--|--|
| Оптимизация энергопотребления:<br>- снижение потерь электроэнергии;<br>- повышение энергоэффективности оборудования при условии безусловного соблюдения требуемых параметров обеспечения технологического процесса | - Снижение количества загрязняющих веществ в очищенных водах до уровня действующих нормативов;<br>- повышение стабильности процессов очистки;<br>- обеспечение технологической «подушки безопасности» для нештатных и аварийных ситуаций |

В зависимости от технологических, конструктивных и технических решений, включая оборудование и АСУ, реализуемых на канализационных очистных сооружениях, применяют различные мероприятия для повышения энергетической эффективности.

С учетом того, что основными потребителями электроэнергии на очистных сооружениях являются аэрационная система

(воздуходувные машины) и перекачивающие насосы, это оборудование в первую очередь требует пристального внимания с точки зрения разработки мероприятий по оптимизации энергопотребления. При этом не следует забывать и о других значимых потребителях электроэнергии, таких как перемешивающее оборудование, сооружения и оборудование обработки осадка, системы дозирования и подачи реагентов (рис. 5.25).



**Рис. 5.25.** Типичное распределение энергопотребления на городских канализационных очистных сооружениях (а — [132], б — [133])

**Таблица 5.12.** Обобщенные технические решения повышения энергоэффективности канализационных очистных сооружений

| Технология, стратегия повышения энергоэффективности  | Описание   | Срок окупаемости, год   |
|--|--|-------------------------|
| Электродвигатели с высоким КПД   | Электродвигатели насосов, воздуходувных машин, мешалок с низкими внутренними потерями  | Зависит от оборудования |
| Электропривод с частотным регулированием (частотно-регулируемый привод — ЧРП, Variable Frequency Drive, VFD) | Электронный регулятор частоты вращения ротора электродвигателя в зависимости от требуемой нагрузки позволяет избежать постоянной работы двигателя на полной мощности   | От 0,5 до 5             |
| Насосы с высоким КПД   | Насосы с низким коэффициентом внутреннего трения и низкими потерями напора   | Зависит от оборудования |
| Воздуходувные машины с регулированием расхода подаваемого воздуха  | Регулирование подачи воздуха позволяет обеспечивать требуемый в текущий момент расход воздуха и избегать его перерасход и, как следствие, перерасход электроэнергии  | Менее 3                 |
| Высокоэффективные воздуходувные машины   | Воздуходувные машины с низкими внутренними потерями  | Зависит от оборудования |
| Контроль концентрации растворенного кислорода  | Поддержание заданной концентрации растворенного кислорода в значимой точке регулированием расхода подаваемого воздуха  | 2...3                   |
| Система контроля и обработки информации (SCADA)  | Система сбора данных, диспетчерского контроля и обработки информации позволяет осуществлять операторский контроль за технологическими процессами в реальном времени, обеспечивая выполнение требований ко всем потокам | 1...7                   |
| Мелкопузырчатые высокоэффективные аэраторы   | Производят мелкие воздушные пузырьки, что повышает эффективность процесса переноса кислорода в аэрируемых зонах  | 1...7                   |
| Использование энергетического потенциала сточных вод — рекуперация тепла сточных вод                         | Избыточное тепло сточных вод передается нагреваемому объекту   | Менее 2                 |
| Механическое перемешивание в аэротенках  | Использование механического перемешивания там, где это возможно. На механическое перемешивание потребляется меньше энергии, чем на перемешивание с помощью воздуха   | 1...3                   |
| Эффективная обработка осадка с точки зрения энергозатрат   | Шнековые прессы, гравитационные ленточные сгустители и т. д.   | Зависит от оборудования |

На рис. 5.25 приведено типичное распределение потребления электроэнергии различным оборудованием канализационных очистных сооружений. На представленных рисунках видно, что наибольшая доля потребляемой электроэнергии приходится на аэрацию, то есть на реализацию аэробных биохимических процессов в сооружениях биологической очистки. На некоторых очистных сооружениях доля энергопотребления на аэрацию может составлять до 80 % от общих энергозатрат. Существенная разница в потреблении электроэнергии на обработку осадка — 18,1 % на рис. 5.25, а (3,9 % + 14,2 % = 18,1 %) и 6 % на рис. 5.25, б — объясняется применением в первом случае энергоемкой технологии анаэробного сбраживания осадков. Из рисунков очевидно достаточно высокое потребление электроэнергии на перекачивание иловой смеси и возвратного активного ила. С учетом данных примеров, представляющих собой типичное распределение энергопотребления на очистных сооружениях, понятно, что при разработке стратегии снижения энергопотребления в первую очередь необходимо рассматривать проведение энергоэффективных мероприятий на сооружениях, являющихся основными потребителями электроэнергии.

В [134] приведены наиболее распространенные решения, позволяющие оптимизировать энергопотребление на канализационных очистных сооружениях (табл. 5.12).

**Аэрация.** Как было показано выше, наиболее весомым потребителем электроэнергии на канализационных очистных сооружениях являются воздуходувные машины. Рассмотрим примеры снижения расхода воздуха, подаваемого на биологическую очистку. Для оценки влияния различных факторов на требуемое количество воздуха для реализации окислительных процессов в аэротенке рассмотрим формулы, описывающие эти зависимости.

Расход воздуха, требуемый на реализацию процессов окисления органических соединений и нитрификацию, определяется следующим образом:

1. Количество кислорода, требуемое на процессы окисления органических соединений и нитрификацию,  $q_{O_2}$ , мг  $O_2$ /л:

$$q_{O_2} = q_{O_2L} + q_{O_2, NH_4}, \quad (5.12)$$

где  $q_{O_2L}$  — требуемое количество кислорода на окисление органических соединений, мг  $O_2$ /л;

$q_{O_2, NH_4}$  — требуемое количество кислорода на реализацию процесса нитрификации, мг  $O_2$ /л.

Количество кислорода, требуемое только на окисление органических соединений, определяется по следующей формуле:

$$q_{O_2L} = 1,1(SS_{infl} - SS_{eff, req}) - SS_{deni}, \quad (5.13)$$

где  $SS_{infl}$  — значение БПК<sub>полн</sub> в сточных водах, поступающих на биологическую очистку, мг/л;

$SS_{eff, req}$  — требуемое значение БПК<sub>полн</sub> в очищенных водах, мг/л;

$SS_{deni}$  — количество органических соединений (в БПК<sub>полн</sub>), которое потребляется на реализацию процесса денитрификации в рассматриваемом сооружении, мг/л:

$$SS_{deni} = 2,86(TKN_{infl} - TN_{req} - N_{was}), \quad (5.14)$$

где  $TKN_{infl}$  — концентрация общего азота по Кьельдалю в сточной воде, поступающей на биологическую очистку (см. гл. 2), мг/л;

$TN_{req}$  — требуемая концентрация общего азота в очищенной воде (см. гл. 2), мг/л;

$N_{was}$  — концентрация азота, потребляемая на прирост биомассы активного ила, мг/л, рассчитываемая, в данном случае, с учетом того, что количество азота в приросшей биомассе составляет 8 % (по массе).

Количество кислорода, требуемое на реализацию процесса нитрификации  $q_{O_2, NH_4}$ , мг  $O_2$ /л:

$$q_{O_2, NH_4} = 4,57 (TKN_{infl} - N - NH_{4, req} - N_{was}), \quad (5.15)$$

где  $N - NH_{4, req}$  — требуемая концентрация аммонийного азота в очищенной воде, мг/л.

Подставляя  $q_{O_2L}$  и  $q_{O_2, NH_4}$ , рассчитанные по формулам (5.13) и (5.15), в формулу (5.12), получаем требуемое количество кислорода

на процессы окисления органических соединений и нитрификацию  $q_o$ , мг  $O_2$ /л, в рассматриваемом сооружении.

2. Массовый расход кислорода, требуемый на реализацию рассматриваемых процессов — окисления органических соединений и нитрификацию —  $Q_o$ , кг/ч, рассчитывается как:

$$Q_o = \frac{q_o Q_h}{1000}, \quad (5.16)$$

где  $Q_h$  — расход сточных вод, поступающих на биологическую очистку, м<sup>3</sup>/ч.

3. Пересчет общего количества кислорода, требуемого на реализацию процессов окисления, определенного по формуле (5.16), в расход воздуха  $q_{air}$ , м<sup>3</sup>/ч:

$$q_{air} = \frac{Q_o}{0,21 \cdot 1,43}, \quad (5.17)$$

где 0,21 — содержание кислорода в воздухе (по объему);

1,43 — плотность кислорода (при нормальных условиях), кг/м<sup>3</sup>.

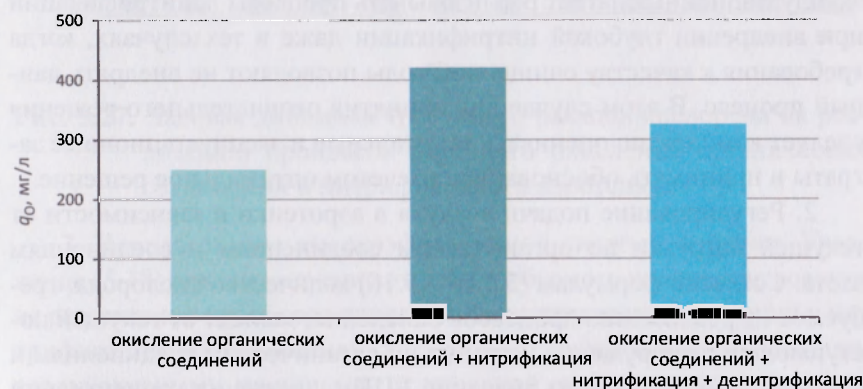
4. Расчет требуемого количества воздуха на реализацию процессов окисления органических соединений и нитрификацию в сооружениях, которое следует подать в аэротенки воздуходувными машинами, производится с учетом реальной эффективности переноса кислорода (АОТЕ) аэрационной системы (см. гл. 1):

$$Q_{air} = \frac{q_{air}}{АОТЕ} 100 \%. \quad (5.18)$$

Анализ формул (5.12)—(5.18) позволяет выявить основные факторы, влияющие на требуемый расход воздуха, и определить мероприятия по снижению энергопотребления на аэрацию:

1. Реализация процесса денитрификации в аэротенках в случае проведения в сооружениях процесса нитрификации. Согласно формуле (5.12) количество требуемого кислорода на окислительные процессы (окисление органических соединений и нитрификацию) зависит от количества кислорода, потребляемого на оба этих процесса. На рис. 5.26 показано расчетное требуемое количество кислорода только на процессы окисления органических соединений, на

процессы окисления органических соединений и нитрификацию без реализации процесса денитрификации и на процессы окисления органических соединений и нитрификацию с реализацией процесса денитрификации. Расчет был проведен для следующих качественных показателей сточной и очищенной воды: сточная вода, поступающая на биологическую очистку: БПК<sub>полн</sub> = 230 мг/л; ТKN = 40 мг/л; очищенная вода: БПК<sub>полн</sub> = 3 мг/л; N-NH<sub>4</sub> = 0,39 мг/л; N-NO<sub>3</sub> = 9,1 мг/л (при расчете требуемого количества кислорода на реализацию биохимических процессов с денитрификацией).



**Рис. 5.26.** Требуемое количество кислорода на реализацию биохимических процессов в аэротенках

Как видно из рис. 5.26, внедрение на очистных сооружениях технологии глубокой нитрификации дополнительно к окислению органических соединений приводит к увеличению требуемого количества кислорода. В рассмотренном примере увеличение требуемого количества кислорода составило 68 %. Безусловно, данный показатель будет меняться в зависимости от качественных показателей поступающей сточной воды и требований к качеству очищенной воды, но, в любом случае, внедрение процесса глубокой нитрификации в аэротенках дополнительно к процессам окисления органических соединений требует увеличения подачи кислорода в 1,5...2,5 раза (для городских сточных вод). Реализация процесса денитрификации позволила

снизить требуемое количество кислорода на аэробное окисление органических соединений и глубокую нитрификацию на 23 % (для рассматриваемого примера) по сравнению с требуемым количеством кислорода на аэробное окисление органических соединений и глубокую нитрификацию без внедрения процесса денитрификации. Применение процесса денитрификации при реализации процессов аэробного окисления органических соединений и глубокой нитрификации позволяет снизить потребность в кислороде на 20...30 % (для городских сточных вод). Нами рекомендуется для снижения эксплуатационных затрат реализовывать процессы денитрификации при внедрении глубокой нитрификации даже в тех случаях, когда требования к качеству очищенной воды позволяют не внедрять данный процесс. В этом случае для принятия окончательного решения следует комплексно оценивать капитальные и эксплуатационные затраты и принимать обоснованное расчетом оптимальное решение.

2. Регулирование подачи воздуха в аэротенки в зависимости от текущей нагрузки по органическим соединениям и соединениям азота. Согласно формулам (5.12)—(5.16) количество кислорода, требуемое на реализацию процессов окисления, зависит от текущей поступающей в сооружение нагрузки по органическим соединениям и азоту, то есть от текущих значений БПК<sub>.....</sub>, текущих концентраций ТKN и расхода сточных вод. На рис. 5.27 представлена динамика требуемого расхода кислорода  $Q_o$ , кг/ч, на аэробное окисление органических соединений и глубокую нитрификацию с учетом часовой динамики качественного состава сточных вод и поступающего в сооружение расхода. Расчет выполнен с учетом реальной динамики качественного и количественного состава сточных вод, поступающих на биологическую очистку.

Как видно из графика, при среднем требуемом значении  $Q_o = 110$  кг  $O_2$ /ч при отсутствии системы регулирования подачи воздуха в аэротенки для обеспечения требуемого кислородного режима в любой текущий момент времени требуется подавать количество кислорода, соответствующее максимальной потребности  $Q_o = 156$  кг  $O_2$ /ч. В этом случае перерасход требуемого количества кислорода и, следовательно, электроэнергии составит за сутки 1104 кг  $O_2$ , или 42 %.

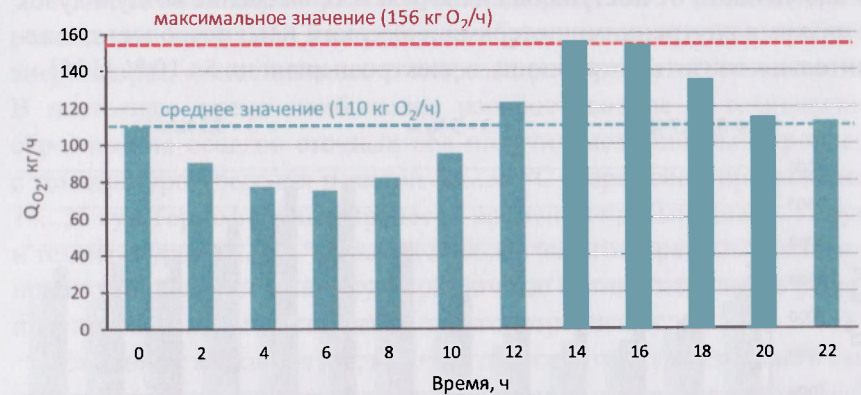


Рис. 5.27. Часовая динамика требуемого расхода кислорода на реализацию процессов аэробного окисления органических соединений и нитрификацию в аэротенках

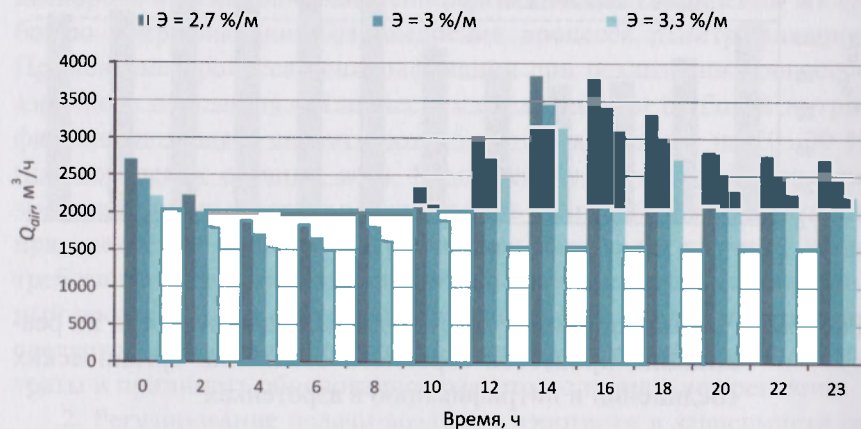
3. Использование высокоэффективной системы аэрации. Уравнение (5.18) показывает зависимость требуемого количества воздуха на реализацию процессов окисления органических соединений и нитрификацию в сооружениях  $Q_{air}$ , которое следует подать в аэротенки воздуходувными машинами, от реальной эффективности переноса кислорода (АОТЕ). В гл. 1 вопросы эффективности аэрационных систем были рассмотрены детально, на рис. 5.28 приведены расчетные данные требуемого расхода воздуха (для приведенной на рис. 5.27 динамики потребности в кислороде) для аэрационных систем, имеющих различную АОТЕ.

Из приведенного на рис. 5.28 результата расчетов требуемого расхода воздуха на аэробное окисление органических соединений и глубокую нитрификацию видно, что разница в 0,3 %/м дает (при глубине заложения аэраторов  $h = 5,0$  м) разницу в требуемом расходе воздуха около 10 %.

Кроме рассмотренных выше мероприятий, позволяющих снизить требуемую производительность воздуходувных машин и обеспечить возможность регулирования, то есть подачи в аэробные зоны количества воздуха, которое необходимо в конкретный момент времени



в зависимости от поступающей нагрузки, применение воздуховуков с низкими внутренними потерями и высоким КПД позволяет дополнительно снизить потребность в электроэнергии на 5...10 % [135].



**Рис. 5.28.** Зависимость требуемого расхода воздуха для обеспечения необходимого количества кислорода на биохимические процессы от АОТЭ

**Перекачивающее насосное оборудование.** На рис. 5.25 показан значительный вклад в энергопотребление на очистных сооружениях перекачивающего оборудования. Для снижения энергопотребления данным видом оборудования следует еще при проектировании новых очистных сооружений (или, при наличии возможностей, в ходе реконструкции имеющихся) максимально использовать самотечный режим движения потоков. Этот подход позволит снизить требуемую производительность насосного оборудования на очистных сооружениях в целом. Более высокие капитальные затраты при рассмотрении различных вариантов должны быть рассмотрены в свете более низкого энергопотребления за период рассматриваемого жизненного цикла предприятия. Автоматизация работы насосных станций позволяет оптимизировать работу комплекса перекачивающего оборудования, в том числе с точки зрения энергопотребления.

**Сооружения обработки осадков.** На рис. 5.25, а показано, что реализация процессов анаэробного сбраживания осадков требует энергозатрат, сопоставимых с энергозатратами на перекачивание. В настоящее время наибольшее распространение в технологии сбраживания осадков сточных вод получил мезофильный процесс с температурой ведения реакций 33...35 °С и временем пребывания 14...25 сут. Термофильный процесс с временем пребывания 7...12 сут и температурой 53...55 °С является более энергозатратным, поэтому при его реализации используют различные оптимизационные решения, направленные на снижение энергопотребления.

Основные мероприятия, которые позволяют оптимизировать как технологическую эффективность реализации процессов анаэробного сбраживания осадков, так и эксплуатационные затраты [136]:

- сокращение продолжительности сбраживания осадков при достижении заданной степени распада, что позволяет уменьшить объемы сооружений, а следовательно, и капитальные, и эксплуатационные затраты;
- повышение количества биогаза, выделяющегося в процессе брожения, с целью дополнительного получения энергии;
- увеличение содержания метана в биогазе.

Использование данных технологических решений позволяет снизить энергопотребление на анаэробное сбраживание осадков сточных вод более чем на 20 %.

На московских очистных сооружениях проведен ряд мероприятий, направленных на снижение энергопотребления в целом. В [137] отмечается, что весь образующийся осадок на очистных сооружениях подвергается сбраживанию в метантенках при температуре около 53 °С, в результате чего вырабатывается биогаз, содержащий около 65 % метана. Основными целями проводимой на очистных сооружениях Мосводоканала реконструкции сооружений обработки осадка являлись:

- увеличение глубины сбраживания осадка;
- снижение общего количества осадков сточных вод, образующихся на очистных сооружениях;

- увеличение выхода биогаза и тем самым снижение потребления природного топлива;
- улучшение водоотдающих свойств осадка и снижение расходов на флокулянт;
- сокращение затрат на вывоз осадка;
- повышение надежности и уровня безопасности работы метантенков.

В результате проведенной реконструкции метантенков выработка биогаза выросла в 1,7 раза и составляет около 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут (более 90 млн м<sup>3</sup>/год). Мини-ТЭС, построенная на Курьяновских очистных сооружениях и работающая на биогазе, эксплуатируется параллельно с сетью внешнего энергоснабжения. Мини-ТЭС обеспечивает электроэнергией 50 % основных технологических потребителей Курьяновских очистных сооружений и до 50 % технологической потребности КОС в тепловой энергии. Электрическая мощность мини-ТЭС — 10 МВт; тепловая мощность — 8 МВт (6,9 Гкал/ч).

В настоящее время одной из основных целей применения новых и разработки перспективных технологий очистки сточных вод и обработки осадков является достижение стабильного качества очищенных вод и вывозимого осадка при минимальных затратах электроэнергии [138].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эта книга не претендует, конечно, на детальное рассмотрение всего спектра вопросов и проблем, связанных с проектированием, строительством, реконструкцией, эксплуатацией канализационных очистных сооружений. Основные цели — выделить принципиальные моменты при эксплуатации большинства существующих очистных сооружений, расставить акценты в технологических подходах и расчетах при планировании и осуществлении реконструкции очистных сооружений под технологии удаления биогенных элементов для достижения современных требований к очищенной воде, зафиксировать внимание на базовых принципах построения эффективно функционирующего комплекса сооружений очистки сточных вод.

Хочется подвести некоторые итоги и суммировать наиболее значимые, с точки зрения автора, вопросы, к правильному решению которых и призывает (и, надеюсь, поможет) эта книга.

Большинство канализационных очистных сооружений в нашей стране запроектированы и построены давно, используемые технологические решения 40-летней давности не способны обеспечить качество очистки сточной воды на уровне современных требований, в первую очередь по биогенным элементам. Усилия государства в вопросах очистки сточных вод, разработка и принятие новых природоохранных законов направлены на то, чтобы руководители производственных предприятий, локальных очистных сооружений и городских сооружений очистки сточных вод ускорили решение задачи по обеспечению качества очищенной воды в соответствии с

действующими нормативами. В качестве первого этапа решения этой задачи — вывод существующих очистных сооружений на максимально эффективный уровень эксплуатации. Второй этап (рано или поздно неизбежный) — реконструкция существующих очистных сооружений под современные технологии, строительство новых сооружений. Но (!) эти задачи корректно решаемы только при условии наличия специалистов, которые способны разработать наиболее эффективную технологию для конкретных очистных сооружений, грамотно рассчитать и спроектировать новые очистные сооружения, правильно их эксплуатировать для стабильного обеспечения требуемого качества очистки сточной воды. При отсутствии таких специалистов вопросы реконструкции, строительства и эксплуатации очистных сооружений сопровождаются обилием мнений (порой взаимоисключающих) и профессиональной мифологии. К тому же в настоящее время в нашей стране отсутствует утвержденная методика расчета сооружений биологической очистки сточных вод от азота и фосфора, в результате чего многие проектные организации используют западные методики без должного анализа возможности их применения. Не стоит забывать, что анализ требований к качеству очищенных сточных вод различных стран показывает, что наиболее жесткие требования установлены в Российской Федерации.

Ответственность за правильный выбор технологической схемы реконструкции и корректность расчета очистных сооружений, то есть за технологические и технические решения по реконструкции, предлагаемые проектными организациями, ложится, в конечном итоге, на тех, кому эксплуатировать очистные сооружения. В этой ситуации (с учетом серьезных капитальных затрат, необходимых для реконструкции сооружений) эксплуатирующие организации рассматривают большое количество предложений от различных компаний, и вопрос окончательного принятия решений в связи с этим иногда сильно затягивается, ведь риски велики, а критериев выбора нет (либо они неочевидны). К сожалению, далеко не всегда выбирается решение, которое действительно обеспечит требуемое качество очистки сточных вод. Основная причина и проблема в том, что в современных условиях эксплуатирующей организации достаточ-

но сложно разобраться в эффективности предлагаемых решений. К тому же время на утверждение убедительно и красиво сформулированного технико-коммерческого предложения, разработку проектной документации, непосредственно реконструкцию, строительство и запуск реконструированных по этому решению очистных сооружений суммарно относительно велико; по мере прохождения различных стадий (проектирования, согласования, реконструкции, пуско-наладочных работ, запуска сооружений и выхода на проектный режим) ответственность исполнителей размывается. В конечном итоге именно эксплуатирующая организация отвечает за результаты качества очистки, которые могут не достигать изначально требуемых, что обнаруживается слишком поздно.

Дефицит квалифицированных специалистов и знаний в области современной биологической очистки сточных вод компенсируется устойчивыми мифами.

*Миф:* невозможность достижения требований к качеству очищенной воды на уровне современных ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения по биогенным элементам.

*Реальность.* Для обеспечения современных требований к качеству очищенных вод, сбрасываемых в водоемы, по азоту аммонийному 0,39 мг/л, азоту нитритов 0,02 мг/л, азоту нитратов 9,1 мг/л и фосфору фосфатов 0,2 мг/л на очистных сооружениях необходима реализация технологий удаления азота и фосфора из сточных вод. Достижение требуемых нормативов в реальных условиях работы городских очистных сооружений не представляется проблемой при их корректном проектировании. Основой достижения необходимого результата является выбор оптимальной для конкретных условий технологической схемы реализации процессов удаления азота и фосфора, которая определяет не только эффективность прохождения процессов удаления биогенных элементов, но и саму возможность организации данных процессов. А профессиональный расчет аэротенков позволяет рассчитать сооружения, стабильно обеспечивающие качество очищенной воды по биогенным элементам на уровне ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения.

*Миф:* возможность реконструкции аэротенков (запроектированных изначально под классическую технологию окисления органических соединений) под технологию удаления азота и фосфора без увеличения объемов сооружений, то есть проведение реконструкции в существующих объемах сооружений биологической очистки (аэротенки и вторичные отстойники) без реализации технологий, позволяющих увеличить количество биомассы в системе.

*Реальность.* Если мы говорим о реконструкции аэротенков (запроектированных в свое время под технологию окисления органических соединений на проектный расход) под технологию удаления биогенных элементов, то без увеличения количества биомассы в системе уложиться в существующие объемы сооружений биологической очистки невозможно. Решить вопрос реализации технологий удаления азота и фосфора в рамках существующих объемов сооружений биологической очистки возможно только при использовании технологий, позволяющих увеличить окислительную мощность сооружений за счет увеличения концентрации биомассы и ее активности.

*Миф:* канализационные очистные сооружения — априори эстетически непривлекательный объект.

*Реальность.* В настоящее время преимущество привлекательно внешнего вида очистных сооружений не вызывает сомнений. На фоне современного дизайна малоэтажных зданий и промышленных предприятий, в условиях дефицита и высокой стоимости площадей под застройку дизайну очистных сооружений придается все большее значение. И в этом вопросе на первый план выходит возможность (при требуемом качестве очистки и без потери производительности) исполнения компактных и закрытых сооружений, что достигается только реализацией современных технологических решений.

*Миф:* канализационные очистные сооружения — затратное и убыточное предприятие.

*Реальность.* Инвестиции в реконструкцию и строительство современных очистных сооружений с достижением требуемых качественных параметров очистки могут и должны возвращаться за адекватное время. Эффективная организация производственных процессов с использованием квалифицированного персонала и средств

мониторинга и управления позволит оптимизировать задействованные людские ресурсы; реализация технологий с наименьшими энергозатратами, коммерческое использование очищенной воды и переработанного осадка — вот реальные способы снижения издержек и статьи дохода, помимо основной — продажи качественных услуг по очистке сточных вод абонентов.

Для того чтобы избавиться от мифов, качественно и спокойно работать в реальных условиях, есть простой способ — быть профессионалом в своей области и (осознавая, что невозможно знать все самому) сотрудничать с профессионалами.

Удачи.

*С уважением,  
Оксана Харьковина*

*P. S.* Следующая книга серии «Очистка сточных вод. Концепция 10 шагов» посвящена вопросам корректного проектирования как основы для успешного построения технологически и экономически эффективных сооружений биологической очистки сточных вод, в том числе от биогенных элементов.

### Список литературы

- [1] ГОСТ 25150—82. Канализация. Термины и определения. М., 1982.
- [2] Hoover S. R. and Porges N. Assimilation of Dairy Wastes by Activated Sludge II. The Equations of Synthesis and Rate of Oxygen Utilization by Activated Sludge // Sew. And Ind. Waters. 1952. 25(10). Pp. 35—48.
- [3] EPA. Wastewater treatment manuals. Primary, secondary & tertiary treatment, 1997. 131 p.
- [4] Технический справочник по обработке воды «Дегремон»: в 2 т. СПб : Новый журнал, 2007.
- [5] Технологические мероприятия эксплуатации сооружений биологической очистки в аварийных и экстремальных условиях: сб. статей и публикаций / Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, О. В. Мойжес\*, В. Г. Исаков, К. В. Шотина ; МГУП Мосводоканал. М., 2008. С. 154—163.
- [6] СНиП 2.04.03—85. Канализация. Наружные сети и сооружения. М., 1986.
- [7] Харьковина О. В., Шотина К. В. Исследование работы аэротенков нитри-денитрификации с повышенными дозами активного ила // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10 (Ч. 1). С. 42—47.
- [8] Шотина К. В. Очистка городских сточных вод от азота и фосфора с использованием повышенных доз активного ила: дисс... канд. техн. наук. СПб., 2011.
- [9] Влияние возраста ила и качества очистки сточных вод на прирост биомассы по результатам промышленных и полупромышленных исследований / Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, О. В. Мойжес\*, Д. В. Гусев, В. Г. Асеева // ВэйстТэк-2007: сб. докладов. М. : СИБИКО ИНТ, 2007.
- [10] Activated sludge model No. 1 / M. Henze, C.P.L. Grady Jr., W. Gujer, GvR. Marais, T. Matsuo // IAWQ Scientific and Technical Report. № 1. IAWQ, London, 1987.
- [11] Mathieu S. and Etienne P. Estimation of Wastewater Biodegradable COD Fractions by Combining Respirometric Experiments in Various SO/XO Ratios // Wat. Res. 2000. 34(4). Pp. 1233—1246.
- [12] Calibrating a side-stream membrane bioreactor using Activated Sludge Model No. 1 / T. Jiang, X. Liu, M. D. Kennedy, J. C. Schippers and P. A. Vanrolleghem // Water Science & Technology. 2005. 52(10—11). Pp. 359—367.
- [13] Dold P. L., Ekama G. A. and Marais GvR. A general model for the activated sludge process // Prog. Wat. Tech. 1980. 12. Pp. 47—77.
- [14] Characterization of the heterotrophic biomass and the endogenous residue of activated sludge / A. Ramdani, P. Dold, A. Gadbois, S. Deleris, D. Houweling, Y. Comeau // Water Res. 2012. 46(3). Pp. 653—668. doi: 10.1016/j.watres.2011.11.030.
- [15] Measurement of Active Biomass in Activated Sludge Mixed Liquor A / A. O. Beeharry, B. J. Lee, G. L. Cronje, M. C. Wentzel and G. A. Ekama // Conference of the Water Institute of Southern Africa, 19—23 May 2002, Durban, South Africa.
- [16] Ekama G. A., Dold P. L. and Marais GvR. Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems // Water Sci. Tech. 1986. 18. Pp. 91—114.
- [17] СанПиН 2.1.5.980-00.2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы. М. : Минздрав, 2000.
- [18] Приказ № 20 от 18 января 2010 г. Федерального агентства по рыболовству «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного назначения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного назначения».
- [19] Использование математических моделей для расчета технологических и конструктивных параметров системы очистных сооружений «первичный отстойник — аэротенк — вторичный отстойник» / Л. П. Истомина, И. А. Механик, А. П. Нетюхайло, И. В. Скирдов и др. // ВОДГЕО. Научные исследования в области механической и биологической очистки промышленных сточных вод. М., 1979. С. 29—37.
- [20] Activated sludge simulation programs / P. L. Dold, M. C. Wentzel, A. E. Billing, G. A. Ekama, GvR. Marais // Water Research Commission. P.O. Box 824, Pretoria 0001, South Africa. 1991.
- [21] Activated sludge model No. 2. / M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wentzel and GvR. Marais // IAWQ Scientific and Technical Report. № 3. IAWQ, London. 1995.
- [22] Johansson P. SIPHOR a kinetic model for simulation of biological phosphate removal : Ph. D. thesis. Sweden. Lund University, 1994.

\* С 2010 г. — Харьковина.

[23] An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal / E. Murnleitner, T. Kuba, M.C.M. van Loosdrecht and J. J. Heijnen // *Biotechnol. Bioeng.* 1997. 54(5). Pp. 434—450.

[24] *Wentzel M. C., Ekama G. A., Marais GvR.* Processes and modelling of nitrification denitrification biological excess phosphorus removal systems // *Water Sci. and Technol.* 1992. 25(6). Pp. 59—82.

[25] *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2s and ASM3 / M. Henze, W. Gujer, T. Mino, M. van Loosdrecht.* London, 2000.

[26] A general model for single-sludge wastewater treatment system / M. Henze, C. P. Laslie Grady Jr., W. Gujer, GvR. Marais, T. Matsuo // *Wat. Res.* 1987. (21)5. Pp. 505—515.

[27] *Marais GvR and Ekama G. A.* The activated sludge process. Part 1. Steady state behavior // *Water SA.* 2(4). Pp. 163—200.

[28] *Gujer W.* Design of a Nitrifying Activated Sludge Process with the Aid of Dynamic Simulation // *Prog. Wat. Tech.* 1977. 9(2). Pp. 323—336.

[29] *Мойжес\* О. В.* Динамическая модель OxiD сооружений биологической очистки сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника.* 2008. № 10. С. 52—57.

[30] *Мойжес С. И.* Разработка технологии удаления биогенных элементов из городских сточных вод с дефосфотацией в аноксидных условиях : дисс... канд. техн. наук. Волгоград, 2013.

[31] *Диксон М., Уэбб Э.* Ферменты. Т. 1. М. : Мир, 1982. 392 с.

[32] *Richard I. Sedlak.* Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater. Principles and Practice. N.-Y., 1991.

[33] *ATV-Kurse zur Abwasser- und Abfalltechnik.* ATV, 1994.

[34] *Loveless J. E., Painter H. A.* The influence of metal Ion concentrations and pH Value on the grow of Nitrosomonas Strain Isolated from Activated sludge // *J. Gen. Microbiol.* 1968. 52. Pp. 1—14.

[35] *Tomlinson T. G., Boon A. G., Trotman G. N. A.* Inhibition of nitrification in the Activated sludge Process of Sewage Disposal // *J. Appl. Bact.* 1966. 29. Pp. 266—291.

[36] Технологические мероприятия по эксплуатации сооружений биологической очистки в аварийных и экстремальных условиях / Д. А. Дани-

лович, М. Н. Козлов, О. В. Мойжес\*, В. Г. Исаков, К. В. Шотина // *Сборник статей и публикаций Московского водоканала.* Вып. 1. 2008. С. 154—163.

[37] *Готтшалк Г.* Метаболизм бактерий. М. : Мир, 1982. 310 с.

[38] *Walter G. Zumft.* Nitric Oxide Signaling and NO Dependent Transcriptional Control in Bacterial Denitrification by Members of the FNR-CRP Regulator Family // *J. Mol. Microbiol. Biotechnol.* 2002. 4(3). Pp. 277—286.

[39] *Мойжес О. В.\** Применение динамической модели OxiD для реконструкции аэротенков ЛСА по технологии биологического удаления азота и фосфора // *Сб. тезисов конгресса в рамках «ВэйстТЭК-2005».* М., 2005.

[40] *Burdick C. R., Refling D. R. & Stensel H. D.* Advanced Biological Treatment to Achieve Nutrient removal // *J. Water pollut. Control Fed.* 1982. 54. Pp. 1078—1086.

[41] *Baillo C. R.* Oxygen utilization in activated sludge plants: simulation and model calibration: project summary Cincinnati, OH. U.S. Environmental Protection Agency, 1989.

[42] *Мойжес\* О. В.* Проведение спектрально-статистического анализа количественного и качественного состава сточных вод, поступающих на КСА // *Сб. тезисов конгресса в рамках «ВейстТЭК-2005».* М., 2005.

[43] *Lineweaver H. and Burk D.* The Determination Of Enzyme Dissociation Contacts // *Journal of the American Chemical Society.* 1934. 56(3). Pp. 658—666.

[44] *Annalisa Onis-Hayden and April Z. Gu.* Comparison of organic Source for Denitrification: Biodegradability, Denitrification rates, Kinetic Constants and Practical Implication for Their Application in WWTPs // *WEFTEC,* 2008.

[45] *Got carbon&, WE&T / C. de Barbadillo, J. Barnard, S. Tarallo and M. Steichen // WEF,* Jun 2008. Pp. 49—53.

[46] Реконструкция аэротенков Люберецкой станции аэрации с внедрением технологии нитри-денитрификации / В. А. Загорский, Д. А. Данилович, Ф. А. Дайнеко, Н. А. Белов, С. Е. Березин, В. И. Баженов, А. Н. Эпов // *Водоснабжение и санитарная техника.* 1999. № 11. С. 28—31.

[47] *Peter A. Wilderer, Edward D. Schroeder.* Anwendung des Sequencing Batch Reactor (SBR) — Verfahrens zur biologischen Abwasserreinigung. 1986. 213 p.

\* С 2010 г. — Харьковина.

[48] *Мойжес\* О. В.* Разработка технологии очистки производственных сточных вод в аэротенках циклического действия: дисс... канд. техн. наук. СПб., 1995.

[49] ПНД Ф 14.1:4.248-07. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций ортофосфатов, полифосфатов и фосфора общего в питьевых, природных и сточных водах фотометрическим методом. М., 2007.

[50] НДП 10.1:2:3.28-04. МВИ ортофосфата в питьевых, природных и сточных водах. М., 2009.

[51] ПНД Ф 14.1:2.106-97. Методика выполнения измерений массовой концентрации фосфора общего в пробах природных и очищенных сточных вод фотометрическим методом после окисления персульфатом. М., 2004.

[52] *Щеголькова Н. М., Венецианов Е. В.* Охрана загрязненной реки: интенсификация самоочистки и оптимизация водоотведения. М.: РАСХН, 2011. 388 с.

[53] Крупномасштабные сооружения биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов / Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, О. В. Мойжес\*, К. В. Шотина, Б. А. Ершов // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. № 10. С. 45—51.

[54] Nutrient control design manual for phosphorus removal. EPA/600/R-09/012. United States Environmental Protection Agency, 2009.

[55] *Barjenbruch M., Exner E.* Potenziale der Reduzierung der Phosphorbelastung am Bei-spiel der Klaranlagen in Thüringen, Landesverbandstagung des DWA-Landesverbandes Sachsen. Thüringen, Weimar, 2009.

[56] *Sawyer C. N.* Biological engineering in sewage treatment // Sewage Works J. 1944. 16. Pp. 925—935.

[57] *Rudolfs W.* Phosphates in sewage treatment: I. Quantities of phosphates // Sewage Works J. 1947. 19. Pp. 43—47.

[58] *Srinath E. G., Sastry C. A., Pillai S. C.* Rapid removal of phosphorus from sewage by activated sludge // Experientia. 1959. 15. P. 339.

[59] *Levin G. V., Shapiro J.* Metabolic uptake of phosphorus by waste water organisms // J. Water Pollut. Control Fed. 1965. 37. Pp. 800—821.

[60] Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: stoichiometry and pH influence / G. J. F. Smolders, J. van der Meij, M. C. M. van Loosdrecht and J. J. Heijnen // Biotech. Bioeng. 1994a. 43(6). Pp. 461—470.

[61] Результаты работы крупномасштабных сооружений биологической очистки от соединений азота и фосфора / Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, О. В. Мойжес\*, К. В. Шотина, Б. А. Ершов // Сб. стат. и публикаций Московского водоканала. М., 2008. С. 101—119.

[62] *Schlegel H. G.* General Microbiology. 2nd ed. University Press Cambridge, UK, 1993.

[63] Activated Sludge Model No. 2D, ASM2D / M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wentzel, GvR. Marais and Mark C. M. van Loosdrecht // Wat. Sci. Tech. 1999. 39(1). Pp. 165—182.

[64] Activated sludge model No. 3 / W. Gujer, M. Henze, T. Mino, M. C. M. van Loosdrecht // Water Science and Technology. 1999. 39(1). Pp. 183—193.

[65] *Meijer S. C. F., van Loosdrecht M. C. M. and Heijnen J. J.* Metabolic modelling of full-scale biological nitrogen and phosphorus removing WWTP's // Water Res., 2001. 35. Pp. 2711—2723.

[66] *Wentzel M. C., Ekama G. A.* Modelling of biological nutrient removal activated sludge systems — an overview // Proceedings Bio-P International Konferenz zur Vermehrten Biologischen Phosphorelimination, Hanover, 1995. Pp. 14.1—14.31.

[67] Evaluation of biochemical models for biological excess phosphorus removal / M. C. Wentzel, L. H. Lotter, G. A. Ekama, R. E. Loewenthal, GvR. Marais // Water Science and Technology. 1991. 23(4-6). Pp. 567—576.

[68] *Randall C. W., Stansel H. D. and Barnard J. L.* Design of activated sludge biological nutrient removal plants. In Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal. (ed. Randall). Technomic Publishing Co. Inc., 1992. 125—126.

[69] *Janssen P. M. J.* Praktijkervaringen met biologische P-verwijdering // Symposium Fosfaatverwijdering, 5 jaar ervaring — en hoe nu verder NVA, Programmagroep 3, Appeldoorn, The Netherlands. In Dutch (1999).

[70] Forms of soil phosphorus in selected hydrologic units of Florida Everglades / K. R. Reddy, Y. Wang, W. F. DeBusk, M. M. Fisher, S. Newman // Soil Sci. Soc. Am. J. 1998. 62. Pp. 1134—1147.

[71] *Ekama G. A. and Marais GvR.* Influence of wastewater characteristics on process design. Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes, 3, 1-10 (Water Research Commission) Pretoria, South Africa, 1984a.

[72] *Fuhs G. W. and Chen M.* Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for treatment of wastewater // *Microbiol. Ecol.* 1975. 2(2). Pp. 119—138.

[73] Biological phosphorus removal: study of the main parameters / D. Malnou, M. Meganck, G. M. Faup and M. du Rostu // *Wat. Sci. Tech.* 1984. 16(10/11).

[74] *Ekama G. A., Marais GvR. and Siebritz I. P.* Biological excess phosphorus removal. Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge processes, 7, 1-32 (Water Research Commission) Pretoria, South Africa, 1984b.

[75] *Abu-Ghararah Z. H. and Randall C. W.* The effect of organic compounds on biological phosphorus removal // *Wat. Sci. Tech.* 1991. 23 (Kyoto). Pp. 585—594.

[76] Metabolic behavior of *Acinetobacter* spp. in enhanced biological phosphate removal — a biochemical model / M. C. Wentzel, L. H. Lotter, R. E. Loewenthal and GvR. Marais // *Water SA.* 1986. 12(4). Pp. 209—224.

[77] *Arun V., Mino T. and Matsuo T.* Biological mechanisms of acetate uptake mediated by carbohydrate consumption in excess phosphorus removal systems // *Wat. Res.* 1988. 22(5). Pp. 565—570.

[78] *Mino T., Tsuzuki Y. and Matsuo T.* Effect of phosphorus accumulation on acetate metabolism in the biological phosphorus removal process // *Proc. IAWPRC Int. Conf. on Biological Phosphate Removal from Wastewaters.* Rome, Italy, Adv. Water Pollut. Cont. (ed. Ramadori), 27-38 (1987).

[79] Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge. Part I: Enhanced culture development / M. C. Wentzel, R. E. Loewenthal, G. A. Ekama and GvR. Marais // *Water SA.* 1988. 14(2). Pp. 81—92.

[80] *Comeau Y., Oldham W. K. and Hall K. J.* Dynamics of carbon reserves in biological dephosphation of wastewater // *IAWPRC Int. Conf. on Biological Phosphate Removal from Wastewaters.* Rome, Italy Adv. Water Pollut. Cont. (ed. Ramadori), 39—55 (1987b).

[81] *Kunst S.* Untersuchungen zur biologischen Phosphorelimination im Hinblick auf ihre abwassertechnische Nutzung. Veröffentlichungen des Institutes

für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, 77 (1991).

[82] A modification to the activated sludge model No. 2 based on the competition between phosphorus-accumulating-organisms and glycogen-accumulating organisms / J. Manga, J. Ferrer, F. Garcia-Usach and A. Seco // *Proc. 1st World Conf. of IWA, 3(Wastewater Treatment Plants).* 2000. Pp. 300—307.

[83] Enhanced polyphosphate organism cultures in activated sludge systems. Part II: Experimental behaviour / M. C. Wentzel, G. A. Ekama, R. E. Loewenthal, P. L. Dold and GvR. Marais // *Water SA.* 1989a. 15(2). Pp. 71—88.

[84] *Janssen P. M. J., Meinema K., van der Roest H. F.* Biological Phosphorus Removal // *STOWA 2002.*

[85] *Janssen P. M. J., Meinema K., van der Roest H. F.* Biological Phosphorus Removal. Manual for Design and Operation. 2002. 224 p.

[86] *Ufuk G. Erdal and Clifford W. Randall.* The effects of operational conditions on EBPR performance Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA.

[87] *Hascoet M. C. and Florentz M.* Influence of nitrates on biological phosphorus removal from wastewater // *Water SA.* 1985. 11(1). Pp. 1—8.

[88] *Levin G. V. and Shaheen D. G.* Metabolic Removal of Phosphate from Sewage Effluent // *Biotechnology and Bioengineering.* Vol. IX. 1967. Pp. 457—470.

[89] Factors affecting competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal: effect of dissolved oxygen concentration / K. Pillay, S. Kumari, F. M. Swalaha and F. Bux. *WISA, 2012, Cape Town.*

[90] *Bentvelsen M. M. A.* Ervaringen met chemische defosfatering. Symposium Fosfaatverwijdering, 5 jaar ervaring — en hoe nu verder?!, NVA Programmagroep 3, Appeldoorn, The Netherlands. In Dutch (1999).

[91] *Levin G. V. and Della Sala U.* PhoStrip® process — a viable answer to eutrophication of lakes and coastal sea water in Italy // *Biological Phosphate Removal From Wastewaters,* Pergamon Press, 1987. Pp. 249—259.

[92] *Rensink J. H., Donker H. J. G. W. and Anink D. M. E.* Vergaande P-en N-verwijdering uit huishoudelijk afvalwater met terugwinning van fosfaat // *H<sub>2</sub>O.* 1988. 21. Pp. 240—242.



[93] Levin G. V., Topol G. J. and Tarnay A. G. Operation of a full-scale Biological Phosphorus removal Plant // J. Water Pollution control Fed. 1975. 47(3). P. 577.

[94] Randall C. W., Waltrip D., Wable M. V. Upgrading a municipal activated sludge plant for high-rate biological nutrient removal // Wat. Sci. Tech. 1990. 22(7-8). Pp. 21—33.

[95] Tracy K. D., Hong S. N. Upgrading wastewater treatment plants with anaerobic selectors // Wat. Sci. Tech. 1990. 22(7-8). Pp. 35—43.

[96] Strategies for Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal in the A2/O Process / Changwen Wanga, Jun Lib, Baihang Zhao, Zhaozhao Wang, Changjing Liu // Asia Pacific Conference on Environmental Science and Technology Advances in Biomedical Engineering. 2012. Vol. 6.

[97] Barnard J. L. Biological nutrient removal without the addition of chemicals // Wat. Res. 1975. 9. Pp. 485—490.

[98] US EPA. Nutrient Control Design Manual, 2009.

[99] Seyfried C. F., Daumaum E. Upgrading of wastewater treatment plants for the reduction of nitrogen and phosphorus in Schleswigholstein FRG // Wat. Sci. Tech. 1990. 22(7-8). Pp. 69—76.

[100] Rabinowitz B. and Marais GvR. Chemical and Biological Phosphorus Removal in the Activated Sludge Process. Research report No. W32, Civil Engineering Department, University of Cape Town, South Africa. 1980.

[101] Анализ промышленного применения технологий удаления фосфора из городских сточных вод / В. А. Загорский, Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, О. В. Мойжес\*, Ф. А. Дайнеко // Водоснабжение и санитарная техника. 2004. № 5. С. 5—8.

[102] Мойжес\* О. В., Шотина К. В. Изучение возможности стабилизации качества очистки сточных вод от азота и фосфора в условиях стохастических колебаний исходной нагрузки // Сб. статей и публикаций МГУП «Мосводоканал». М., 2008. С. 142—153.

[103] Опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора / М. Н. Козлов, О. В. Харьковина, А. Н. Пахомов, С. А. Стрельцов, М. Г. Хамидов, Б. А. Ершов, Н. А. Белов // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10-1. С. 5—8.

[104] Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants / T. Kuba, M. C. M. van Loosdrecht, F. A. Brandse and J. J. Heijnen // Wat. Res. 1997a. 31(4). Pp. 777—786.

[105] van Loosdrecht M. C. M., Brandse F. A., De Vries A. C. Environmental impacts of nutrient removal processes: case study // J. Environ. Eng. 1997c. 123. Pp. 33—40.

[106] Wanner J., Cech J. C. and Kos M. New process design for biological nutrient removal // Water Sci. Tech. 1992. 25. Pp. 445—448.

[107] Biological anoxic phosphorus removal — The DEPHANOX process / G. Borton, R. Saltarelli, V. Alonso, R. Sorm, J. Wanner and A. Tilche // Water Sci. Technol. 1996. 34(1, 2). Pp. 119—128.

[108] Phosphate uptake under anoxic conditions and fixed film nitrification in nutrient removal activated sludge system / R. Sorm, G. Borton, R. Saltarelli, P. Jenicek, J. Wanner and A. Tilche // Water Res. 1996. 30(7). Pp. 1573—1584.

[109] Опыт промышленного внедрения технологий биологического удаления азота и фосфора / В. А. Загорский, Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, О. В. Мойжес\*, Ф. А. Дайнеко, В. А. Мухин // Водоснабжение и санитарная техника. 2001. № 12. С. 21—27.

[110] Сравнительная оценка методов определения концентрации кислорода для контроля процессов биологической очистки сточных вод / А. Г. Дорофеев, М. Н. Козлов, Д. А. Данилович, Т. М. Аджиенко, Л. А. Рыбакова // Вода и экология: проблемы и решения. 2001. № 4.

[111] Мойжес\* О. В. Динамическое моделирование процессов удаления биогенных элементов в реакторах с мембранным илоразделением // Сб. статей и публикаций / МГУП Мосводоканал. М., 2008. С. 171—180.

[112] Мойжес\* О. В. Разработка технологии очистки производственных сточных вод в аэротенках циклического действия : дисс... канд. техн. наук. СПб., 1995. 150 с.

[113] СП 32.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03—85. Канализация. Наружные сети и сооружения. М., 2012.

[114] Wastewater Treatment Plant Amsterdam West: New, Large, High-Tech and Sustainable / A. F. van Nieuwenhuijzen, M. Havekes, B. A. Reitsma and P. de Jon // Water Practice & Technology. 4(1). doi: 10.2166/WPT.2009.006.

[115] Meijer S. C. F. and Piekema P. Model evaluation of Biological Phosphorus removal under full-scale influent and storm condition // New Developments in IT & Water Conference. Amsterdam, 4—6 November 2012.

\* С 2010 г. — Харьковина.

[116] *Reitsma B.* Implementation of the MUCT-process at the new WWTP Amsterdam-West (in Dutch) // *H<sub>2</sub>O*. 2001. 18.

[117] *Reitsma B., Van Nieuwenhuijzen A. and Mulder M.* Start-up of the new WWTP Amsterdam-West (in Dutch) // *H<sub>2</sub>O*. 2006. 10.

[118] *Christiankohler.* COD fraction dynamics: Respirometric analysis & modelling sewer processes // Diplomarbeit to reach the degree of a Diplomingenieur of Water Management Academic year 2007—2008.

[119] *Solvi A.-M.* Modelling the sewer-treatment-urban river system in view of the EU Water Framework Directive: Ph. Thesis. Ghent University, Belgium, 2006.

[120] *Козлов М. Н., Мойжес\* О. В.* Установка для биологической очистки сточных вод. Пат. № 101704. Оpubл. 27.01.2011, бюл. № 3.

[121] *Данилович Д. А., Козлов М. Н., Мойжес\* О. В.* Надежность эксплуатации сооружений биологической очистки городских сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2006. № 1. Ч. 1. С. 33—37.

[122] Повышение качества очищенных сточных вод на Курьяновских и Люберецких очистных сооружениях / С. В. Храменков, Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, С. А. Стрельцов, Н. А. Белов, О. В. Мойжес\*, Б. А. Вайсфельд, О. Н. Исаев // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2006. № 11. Ч. 1. С. 24—30.

[123] Российская энциклопедия по охране труда: в 3 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007.

[124] *Randall C. W. and Buth D.* Nitrite build-up in activated sludge resulting from temperature effects // *Jour. Water. Pollut. Control Fed.* 1984. 56.

[125] *Мойжес\* О. В.* Математическая модель процессов очистки сточных вод в аэротенках «OxiD» // Сб. тезисов конгресса в рамках «ЭкваТэк-2004», Москва. М., 2004.

[126] *Мойжес\* О. В.* Динамическое моделирование аэротенков по результатам их трассирования // Сб. тезисов конгресса в рамках «ЭкваТэк-2006», Москва. М., 2006.

[127] *Мойжес\* О. В., Киндерова К. В.* Оценка стабильности работы сооружений биологической очистки сточных вод с помощью математического аппарата случайных величин // Сб. тезисов конгресса в рамках «ВэйсТэк-2007», Москва. М., 2007.

[128] *Мойжес\* О. В., Шотина К. В.* Применение динамического моделирования для стабилизации качества очистки сточных вод при ликвидации экстремальных ситуаций // Сб. статей и публикаций / МГУП Мосводоканал. М., 2008. С. 370—378.

[129] *Мойжес\* О. В., Шотина К. В.* Динамическое моделирование — перспективный подход к проектированию сооружений биологической очистки сточных вод // *Экология и промышленность России*. 2009. № 2. С. 55—58.

[130] Удаление азота из возвратных потоков сооружений обработки осадка путем нитри-денитрификации без дополнительного источника углерода / Ю. А. Николаев, Е. А. Казакова, О. В. Харькина, А. Г. Дорофеев // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010. № 10-1. С. 60—64.

[131] *Alleman J. E.* Elevated nitrite occurrence in biological wastewater treatment systems // *Water Sci. Tech.* 1984. 17. Pp. 409—419.

[132] *Water and Wastewater Energy Best Practice Guidebook.* Provided By: Focus on Energy, Prepared by: Science Applications International Corporation (SAIC), Dec. 2006.

[133] <http://www.energibesparelser-and.dk/Default.aspx?ID=1249&TokenExist=no>, DANVA.

[134] *Brown R.* Energy efficiency and renewable energy technologies in wastewater management, testimony on sustainable wastewater management, subcommittee on water resources and environment house committee on transportation and infrastructure, 2009.

[135] *Guideline for Energy Efficiency in Wastewater Treatment,* Ankara, October 2010. I&M-1016744-BG, pp. 45.

[136] Обработка сброженного осадка в аэрируемых биореакторах / К. Е. Хренов, М. Н. Козлов, О. В. Харькина, М. В. Кевбрина // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010. № 10-1. С. 54—59.

[137] *Стрельцов С. А., Хамидов М. Г.* Альтернативная энергетика в системе водоотведения Москвы // *Экологический вестник России*. 2001. № 1. С. 46—51.

[138] *Харькина О. В.* Новые разработки Инженерно-технологического Центра МГУП «Мосводоканал» // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2011. № 2(38). С. 56—68.

\* С 2010 г. — Харькина.

[139] *Udo Wiesmann, In Su Choi, Eva-Maria Dombrowski*. Fundamentals of Biological Wastewater treatment. 2007. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 393 p.

[140] *Seifert K., Domka F.* Inhibiting Effect of Surfactants and Heavy Metal Ions on the Denitrification Process // Polish Journal of Environmental Studies. 2005. 14(1). Pp. 87—93.

[141] Chemical phosphorus removal to extremely low levels: experience of two plants in the Washington D.C. area / I. Takacs, S. Murthy, S. Smith, M. McGrath // Water Science and Technology. 2006. 53. Pp. 21—28.

[142] *Marais GvR., Loewenthal R. E. and Siebritz I. P.* Review: observations supporting phosphate removal by biological excess uptake // Wat. Sci. Tech. 1983. 15. Pp. 15—41.

**УЧЕБНИКИ, ДИПЛОМЫ, ДИССЕРТАЦИИ -**  
полные тексты  
На сайте электронной библиотеки  
[www.учебники.информ2000.рф](http://www.учебники.информ2000.рф)

**НАПИСАНИЕ на ЗАКАЗ:**

1. Диссертации и научные работы
2. Дипломы, курсовые, рефераты, чертежи...
3. Школьные задания

Онлайн-консультации

ЛЮБАЯ тематика, в том числе ТЕХНИКА

Приглашаем авторов

Очистка сточных вод. Концепция 10 шагов

Производственно-практическое издание

**Харькина** Оксана Викторовна

**ЭФФЕКТИВНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ  
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Редактор *М. Л. Песчаная*

Компьютерная правка и верстка *А. Г. Сиволобова*

Подписано в печать 24.08.2015. Формат 60×84/16.

Усл.-печ. л. 27,5. Уч.-изд. л. 18,6. Тираж 500 экз. Заказ № 1565н

Отпечатано в полном соответствии

с качеством предоставленного электронного оригинал-макета  
в типографии ОАО «Альянс «Югполиграфиздат»», ВПК «Офсет»

400001, г. Волгоград, ул. КИМ, 6

тел./факс: (8442) 26-60-10, 97-49-40



## Харькина Оксана Викторовна

ведущий инженер-технолог  
компании General Electric,  
кандидат технических наук

Более 10 лет проработала в Инженерно-технологическом центре Мосводоканала. 6 лет являлась начальником ИТЦ Мосводоканала. Была одним из авторов разработки новых технологий очистки сточных вод от азота и фосфора, базового инжиниринга реконструкции аэротенков Люберецких и Курьяновских очистных сооружений под технологии удаления биогенных элементов. Осуществила технологический шеф-монтаж реконструируемых сооружений, пуск и технологическую отладку, технологическую поддержку эксплуатации аэротенков, реконструируемых под технологии удаления биогенных элементов, технологический аудит. Разрабатывала технологические регламенты эксплуатации Курьяновских и Люберецких очистных сооружений. Автор более 80 печатных работ, в том числе патента аэротенка Люберецких очистных сооружений Мосводоканала, реализующего технологии очистки сточных вод от азота и фосфора и положенного в основу проекта по реконструкции старого блока Люберецких очистных сооружений производительностью 1 млн м<sup>3</sup>/сут.