


Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
"Донбасская национальная академия строительства и архитектуры"


 На правах рукописи

Рожков Виталий Сергеевич

**ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В
СИСТЕМАХ С ЭРЛИФТНЫМИ БИОРЕАКТОРАМИ**

2.1.4 - Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны
водных ресурсов

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

 Научный консультант:
Нездойминов Виктор Иванович,
доктор технических наук, профессор

Идентичность всех экземпляров диссертации заверяю:

ученый секретарь

диссертационного совета 02.2.001.01:



Удовиченко Злата Викторовна

Макеевка 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ.....	14
1.1. Требования к современным системам биологической очистки сточных вод.....	14
1.1.3. Нормирование качества очищенных сточных вод.....	18
1.1.4. Оценка технико-экономической эффективности работы станций биологической очистки сточных вод.....	22
1.1.5. Обоснование основных требований к станциям очистки сточных вод.....	29
1.2. Схемы и реакторы биологической очистки сточных вод.....	32
1.2.1. Действующие, наилучшие доступные и перспективные технологии биологической очистки сточных вод.....	33
1.2.1.1 Модифицированный процесс Лудзака-Эттингера.....	33
1.2.1.2 Процесс A^2/O	35
1.2.1.3 Процесс Phoredox.....	37
1.2.1.4 Процесс Кейптаунского университета (УСТ).....	38
1.2.1.5 Йоханнесбургский процесс (JNB).....	40
1.2.1.6 Многоиловые системы.....	41
1.2.1.7 Сравнительный анализ схем биологической очистки.....	44
1.2.2. Способы отделения возвратного ила.....	49
1.2.2.1 Гравитационные методы.....	49
1.2.2.2 Мембранные методы илоразделения.....	51
1.2.2.3 Илоразделение во взвешенном слое.....	52
1.2.4. Способы повышения ИПКО биологически очищенных стоков.....	54
1.2.4.1 Комбинирование биологической и химической обработки.....	55
1.2.4.2 Третичная очистка.....	60
1.2.4.3 Ацидофикация сырого осадка и отказ от первичного отстаивания.....	63
1.2.4.4 Организация процессов одновременной нитри-денитрификации.....	65
1.3. Биохимические процессы биологической очистки.....	66

1.3.1 Аэробное гетеротрофное разложение органики	66
1.3.2 Биологическое удаление соединений азота	70
1.3.3 Усовершенствованное биологическое удаление фосфора	74
1.4. Способы математического описания биохимических процессов.....	78
1.5. Выводы по первой главе.....	82
Глава 2. ЗАДАЧИ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	84
2.1. Задачи исследований	84
2.2. Методология научных исследований	86
2.2.1 Условия проведения лабораторных исследований	86
2.2.2 Условия проведения полупромышленных исследований	90
2.2.3 Условия проведения опытно-промышленных исследований	91
2.2.4 Экспериментальные методы оценки биологических процессов	93
2.3. Метод реализации имитационного моделирования	94
Глава 3. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ В СИСТЕМАХ БОСЭБ.....	103
3.1. Концепция биологической очистки с эрлифтными биореакторами.....	103
3.2. Математическое описание гидродинамических процессов в эрлифтных биореакторах.....	108
3.3. Исследование процесса аэрации в эрлифтных биореакторах	113
3.4. Илоотделение в самообновляющемся взвешенном слое	125
3.4.1 Исследование эффективности илоразделения в эрлифтных биореакторах.	125
3.4.2 Определение мнимой максимальной гидравлической крупности при осветлении (полуэмпирическая теория самообновляющегося взвешенного слоя).....	129
3.5. Имитационная модель одновременной нитри-денитрификации с учетом преобразования соединений фосфора ASM3P-2SND.....	134
3.6. Выводы к третьей главе.....	145

Глава 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ С ЭРЛИФТНЫМИ БИОРЕАКТОРАМ.....	147
4.1. Натурные исследования биологической очистки с одновременной нитри-денитрификаций в аэротенке с затопленной эрлифтной аэрацией.	147
4.1.1 Описание условий проведения натурных исследований.	147
4.1.2 Описание натурных исследований биологической очистки с одновременной нитри-денитрификацией и результаты.	152
4.1.3 Обработка результатов натурных исследований.....	156
4.2. Опытно-промышленные исследования биологической очистки с одновременной нитри-денитрификацией эрлифтным биореакторе.....	167
4.2.1 Описание технологической схемы опытнo-промышленной установки	167
4.3. Выводы к четвертой главе.....	184
Глава 5. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМ БОСЭБ.....	186
Глава 6. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЙ	202
Заключительные выводы.....	217
Перечень использованных сокращений и условных обозначений	220
Список литературы	222
Приложение А.	249
Приложение Б.	251
Приложение В.....	253
Приложение Г.	260
Приложение Д.....	288

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Биологические методы очистки повсеместно используются как для обработки хозяйственно-бытовых, так и промышленных сточных вод, содержащих органические примеси и соединения биогенных элементов. Существует ряд схем биологической очистки, предназначенных для получения на выходе из очистной станции воды, не вызывающей эвтрофикацию поверхностных водоемов. При этом схемы, отличающиеся высокой эффективностью, являются весьма громоздкими, а их воплощение сопряжено со значительными затратами как на строительство сооружений, так и на обеспечение их функционирования.

В частности, обеспечение удаления соединений азота и фосфора на станциях биологической очистки сопровождается высокими затратами на перекачивание обрабатываемой воды между различными технологическими зонами сооружений, аэрацию, механическое перемешивание в зонах культивирования денитрифицирующих и фосфор-аккумулирующих бактерий.

Затратность современных технологий и экономические проблемы в отрасли объясняют тот факт, что в настоящее время около 70% сооружений биологической очистки сточных вод, согласно официальной статистике, не обеспечивают требуемое качество по сбросу очищенных стоков.

Улучшение ситуации возможно при выполнении ряда требований к очистным сооружениям сточных вод населенных пунктов:

- сокращение расходов воздуха для аэрации и реагентов для удаления соединений фосфора;
- минимизация затрат на перекачивание воды между различными зонами очистных сооружений;
- высокая эффективность и надежность работы сооружений вторичного илоотделения;
- высокоэффективная доочистка сточных вод от взвешенных веществ и биогенных элементов;

- эффективное и экологически безопасное решение вопроса утилизации избыточной биомассы в схеме биологической очистки;
- снижение негативного воздействия станций очистки сточных вод на окружающую среду.

Реализация всех перечисленных требований позволит значительно повысить технико-экономическую эффективность обработки сточных вод, и экологическую безопасность, что отвечает требованиям к перспективным технологиям в науке и технике.

Одним из наиболее перспективных путей выполнения указанных выше требований на станциях очистки сточных вод малой и средней производительности, является применение в качестве биореакторов аэротенков - осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтных биореакторов). Эти сооружения отличаются меньшими объемами за счет организации в них процессов одновременной нитри-денитрификации и устройством встроенного илоразделения. Кроме того, устройство затопленной эрлифтной системы аэрации в эрлифтных биореакторах позволит исключить нитратный рецикл.

Наряду с этим, широкое распространение в практике биологической очистки сточных вод имеет эмпирический подход к расчету сооружений, который характеризуется ограниченной областью применения и не учитывает ряд протекающих в реальных системах биологических процессов. Существующие имитационные модели не учитывают отдельно нитрат и нитрит, диффузионные ограничения при одновременной нитри-денитрификации.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой работы являлись исследования отечественных и зарубежных авторов, среди которых наибольший вклад в развитие вопроса биологической очистки сточных вод внесли: Яковлев С.В., Куликов Н.И., Серпокрылов Н.С., Мишуков Б.Г., Швецов В.Н., Нездойминов В.И, Соловьева Е.А., Юрченко В.А., Баженов В.И., Стрелков А.К., Степанов С.В., Никитина О.Г, Залетова Н.А., Данилович Д.А., Гогина Е.С., Харькина О.В., Чернышев В.Н., M. Henze, C. P. Jr. Grady, W. Gujer, G.

v. Marais, T. Matsuo, L. Rieger, G. Koch, H. Hauduc, T. Mino, M. van Loosdrecht, и др.

Наиболее распространенными программами для расчета систем биологической очистки сточных вод методом биохимического моделирования являются: ЭкоСим, GPS-X (компания «Hydromantis»), Biowin (компания «EnviroSim»), Stoa, West и др.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в рамках:

госбюджетной научно-исследовательской темы кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» К-3-01-16 «Совершенствование процессов биологической очистки городских и производственных сточных вод» (номер государственной регистрации НИР: 0117D000273);

госбюджетной научно-исследовательской темы кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» К-3-01-21 «Разработка комплексных технологических схем очистки городских сточных вод и органических осадков в высокоэффективных биореакторах» (номер государственной регистрации НИР: 0121D000092);

хозяйственно-договорной тематики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» 0820-РП «Строительство объектов канализационных систем пгт Карло-Марксово» в рамках Постановления Правительства ДНР №26-13 от 5 июня 2020 г. «О реализации мероприятий по повышению эксплуатационных характеристик систем и объектов жилищно-коммунального хозяйства Донецкой Народной Республики в 2020 году»;

госбюджетной научно-исследовательской темы ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» FRRW-2023-0008 «Повышение технико-экономической эффективности функционирования систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов ДНР» (номер государственной регистрации НИР: 1023022400039-0-2.8.2).

Целью исследования является повышение эффективности удаления органических соединений и биогенных элементов из сточных вод средних и малых населенных пунктов путем оптимизации комплекса биологических и гидравлических процессов очистки, включая создание новых типов биореакторов и методов управления процессами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

- на основании критического обзора и собственных исследований сформулировать конкретные требования к сооружениям биологической очистки сточных вод средних и малых населенных пунктов, соответствующие условиям максимальной эффективности и минимизации затрат;
- математически описать гидродинамические параметры работы эрлифтных биореакторов: установить зависимости скоростей в характерных точках сооружения от интенсивности аэрации, гидравлической нагрузки на осветлитель;
- исследовать эффективность использования кислорода воздуха, подаваемого в затопленную эрлифтную систему аэрации, в зависимости от степени диспергирования воздуха, интенсивности эрлифтной аэрации и размеров сооружения;
- разработать и обосновать расчетную математическую модель биологической очистки активным илом, которая учитывает диффузионные ограничения при одновременной нитри-денитрификации, преобразование форм азота и фосфора;
- выполнить опытно-промышленные и натурные исследования систем с эрлифтными биореакторами для определения параметров биологической очистки сточных вод;
- разработать рекомендации на проектирование систем биологической очистки в сооружениях с одновременной нитри-денитрификацией и встроенным илоотделением для различного состава сточных вод и производительности сооружений очистки;
- оценить экономическую эффективность предложенных схем биологической очистки для реконструируемых и вновь строящихся сооружений.

Объект исследования – сооружения биологической очистки сточных вод, включающие аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Предмет исследования –биологические и гидродинамические процессы в биореакторах с затопленной эрлифтной аэрацией для повышения эффективности биологической очистки сточных вод.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относится имитационное моделирование на основе собственной модели ASM3P-2SND. Моделирование реализовано в программной среде CellDesigner, созданной The Systems Biology Institute, Токио, Япония. Для численного решения математических зависимостей гидравлики использовалась компьютерная программа в среде Delphi на языке Object Pascal.

Экспериментальные исследования выполнены на лабораторных и промышленных установках. Выполнены инструментальные измерения (расход воздуха, жидкости, растворенный кислород, рН) и химические анализы по известным действующим методикам. Используются методы сверхзамедленной съемки с частотой 960 кадров/с.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- разработан метод расчета гидравлических параметров эрлифтных биореакторов, основанный на совместном аналитическом решении уравнений гидродинамики и численном моделировании скоростей в различных точках сооружения;
- получены расчетные зависимости, позволяющие определить коэффициент использования кислорода в биореакторах с затопленной эрлифтной системой аэрации;
- разработана полуэмпирическая теория самообновляющегося взвешенного слоя, которая описывает илоразделение в эрлифтном биореакторе с использованием методов численного моделирования гидродинамических процессов;
- составлена математическая модель активного ила ASM3P-2SND, которая учитывает отдельно нитрат и нитрит, преобразования фосфора при

жизнедеятельности ординарных гетеротрофов, автотрофов и денитрификаторов, а также диффузионные ограничения одновременной нитри-денитрификации;

- установлена зависимость коэффициентов диффузионных ограничений проникновения растворенного органического субстрата и кислорода в хлопья активного ила от глубины эрлифтного биореактора;
- установлены граничные возможности по удалению соединений азота при одновременной нитри-денитрификации в эрлифтных биореакторах в зависимости от соотношения БПК:N в исходном стоке.

Теоретическая значимость результатов исследований.

- получены расчетные зависимости, описывающие гидродинамические процессы в эрлифтных биореакторах со встроенным вторичным илоразделением;
- разработана математическая модель активного ила ASM3P-2SND, учитывающая преобразования биогенных элементов и диффузионные ограничения при одновременной нитри-денитрификации;
- получены расчетные зависимости, описывающие степень использования кислорода воздуха при затопленной эрлифтной системе аэрации через величину эжекционной добавки к скорости всплытия пузырька;
- предложены зависимости для определения «мнимой» гидравлической крупности частиц ила, выносимых из самообновляющегося взвешенного слоя для определения максимальных скоростей в осветлителе.

Практическая значимость результатов исследований.

- предложен усовершенствованный метод расчета систем биологической очистки с применением моделирования биохимических процессов в системах с активным илом ASM3P-2SND;
- разработана методика проверки на сходимость, настройки и калибровки предложенной модели ASM3P-2SND с помощью вычислительных средств программного комплекса CellDesigner;
- разработаны рекомендации на проектирование и расчет систем биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами для малых и средних

населенных пунктов

Внедрение результатов работы. Материалы исследований использованы при разработке:

- рабочего проекта 0820-РП «Строительство объектов канализационных систем пгт. Карло-Марксово» г. Енакиево, 2021 г.;
- лекционного материала в дисциплине «Комплексные системы очистки сточных вод» при подготовке магистров по направлению «Строительство», программа «Современные методы очистки природных и сточных вод»;
- 15 -ти магистерских диссертаций ГОУ ВПО «ДонНАСА» (2016-2022 г.) под руководством автора;
- при разработке Рекомендаций на проектирование и расчет систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами, утвержденных НТС Минстроя ДНР, 2022 г.

Результаты внедрены следующими организациями: ГОУ ВПО «ДонНАСА» (г. Макеевка), АО «ЭКОС» (г. Новочеркасск), ООО «Проектный мир» (г. Донецк), ООО «Тессеракт» (г. Москва), ООО Фирма «Промстройремонт», (г. Донецк).

Личный вклад соискателя. Приведенные в диссертационной работе результаты исследований получены соискателем самостоятельно. Отдельные составляющие численных исследований выполнены с соавторами научных работ, представленных в списке публикаций.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена: применением стандартных методик определения качественных показателей сточных вод, использованием всемирно признанного подхода к моделированию биохимических процессов в очистке сточных вод, сходимостью результатов численных исследований и натурных испытаний.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались автором на различных научных конференциях, форумах, наиболее значимыми из которых являются:

- Национальный экологический форум «Экология промышленного региона», г. Донецк, 2012 г.;
- 5-я Восточно-Европейская конференция «Опыт и молодость в решении водных проблем», г. Киев, 2013 г.;
- Международная украино-японская конференция по вопросам научно-промышленного сотрудничества, г. Одесса, 2013 г.;
- Первый Международный строительный форум «Строительство и архитектура», г. Макеевка, 2017 г.;
- X Юбилейная Международная научно-практическая конференции «Техновод-2017», г. Астрахань, 2017 г.;
- II Международный строительный форум «Строительство и архитектура», г. Макеевка, 2018 г.;
- XI Международная научно-практическая конференция «Техновод-2018», г. Сочи, 2018 г.;
- International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE 2018, Saint Petersburg, 2018 г.
- XII Международная научно-практическая конференция «Техновод-2019», г. Москва, 2019 г.;
- Международная очно-заочная конференция «БиоТехВод – 2020» (Биотехнологии очистки воды), г. Макеевка, 2020 г.;
- V Международный строительный форум «Строительство и архитектура», г. Макеевка, 2021 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы, из которых 13 публикаций в рецензируемых научных изданиях, 2 - в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования Web of Science, 4 - в сборниках трудов международных и региональных научных конференций, 1 - патент на изобретение, другие публикации по теме диссертации - 2.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка из 233

наименований, приложений и содержит 298 страниц, в том числе 221 страницы основного текста, 27 страниц списка использованной литературы и 50 страниц приложений.

Положения, выносимые на защиту:

- концепция БОСЭБ, которая подразумевает организацию процессов одновременной нитри-денитрификации и илоразделения в самообновляющемся взвешенном слое в системах на базе эрлифтных биореакторов;
- расчетные зависимости, описывающие гидродинамические процессы в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтных биореакторах) со встроенным вторичным илоразделением;
- полуэмпирическая теория самообновляющегося взвешенного слоя активного ила, в которой введено понятие «мнимой» гидравлической крупности выносимых при илоразделении частиц для определения максимальных граничных скоростей в осветлителе;
- математическая модель для имитационного моделирования ASM3P-2SND, которая учитывает разделение окисленных форм азота на нитрат и нитрит, преобразования фосфора при жизнедеятельности ординарных гетеротрофов, автотрофов и денитрификаторов, а также диффузионные ограничения одновременной нитри-денитрификации;
- методика расчета систем очистки городских сточных вод от биогенных элементов и органических веществ на базе эрлифтных биореакторов с применением подходов биохимического моделирования;
- методика проверки на сходимость, настройки и калибровки предложенной модели ASM3P-2SND с помощью вычислительных средств программного комплекса CellDesigner.

Глава 1.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Биологические методы очистки повсеместно используются как для обработки хозяйственно-бытовых, так и промышленных сточных вод, содержащих органические примеси и соединения биогенных элементов. При обработке сточных вод населенных пунктов, эти методы являются наиболее распространенными и исследуемыми как в Российской Федерации, так и за рубежом, поскольку для городских и близких к ним по составу сточных вод, практически не имеют экономически обоснованной альтернативы. Ужесточение экологических норм по сбросу очищенных сточных вод в водоемы выдвигает достаточно жесткие требования к современным системам биологической очистки сточных вод населенных пунктов.

1.1. Требования к современным системам биологической очистки сточных вод

1.1.1. Влияние качества очищенных сточных вод на состояние водоемов

Сброс сточных вод различной степени очистки оказывает значительное воздействие на водные экосистемы [1-3], что выражается в снижении биосферных функций водоемов, принимающих сточные воды антропогенного характера. Основным негативным фактором такого воздействия является ускорение процессов эвтрофикации водоемов, что классически описывается по Н.Ф. Реймерсу [4,5]. Процесс эвтрофикации состоит из 4-х стадий:

А) 1-я стадия — поступление загрязняющих веществ в водоем. При этом, биогенный азот поступает как со сточными водами, так и из атмосферы, где находится в избытке. Фосфор же не имеет в данном случае иного внешнего источника, кроме поверхностных и сточных вод;

Б) 2-я стадия — разложение водорослей. Первоначально природный процесс, сопровождающийся потреблением продуктов разложения в виде первичного БПК;

В) 3-я стадия — аэробные процессы разложения, потребление кислорода после отмирания водорослей. Возникновение вторичного БПК за счет жизненного цикла придонных микроорганизмов. При этом в водоеме возникает хемоклин — разница плотностей между придонными и поверхностными слоями, что затрудняет перемешивание слоев жидкости в водоеме и снижает проникновение кислорода в придонные слои, где происходит накопление органического вещества;

Г) 4-я стадия — анаэробные процессы разложения. Накопленные органические вещества разлагаются под действием анаэробных микроорганизмов. Хемоклин при этом приближается к поверхности водоема, что приводит к образованию на месте водоисточника гнилостных болот.

Естественные процессы эвтрофикации водоемов занимают сотни лет, а при сбросе сточных вод, содержащих биогенные элементы (N и P) — уже десятки лет.

Приведенные выше положения указывают на значительное влияние биогенных элементов поверхностных и сточных вод на биосферные функции водоемов.

Одним из наиболее опасных для человека последствий эвтрофикации водоемов является снижение качества питьевой воды в экосистеме [6], что может выражаться в развитии цианобактерий, которые способны к продуцированию нейротоксинов, оказывающих критическое влияние на организм человека.

1.1.2. Примеси сточных вод

По характеру примесей в водах, образующихся в процессе деятельности человечества, сточные воды можно разделить на 4 условные группы:

1. - **хозяйственно-бытовые** сточные воды, образующиеся в следствие бытовой и физиологической деятельности населения. Эти сточные воды собираются с территорий поселений, городских округов с помощью централизованных систем водоотведения (ЦСВ) [7];

2. – **промышленные** сточные воды, образующиеся на территориях промышленных объектов. В зависимости от схемы организации водного хозяйства предприятия могут поступать в ЦСВ, либо сбрасываться в природу после очистки или без таковой;
3. – **поверхностные** сточные воды (ПСВ) – дождевые, талые, поливомоечные воды территорий поселений, городских округов. Поверхностные воды промышленных объектов, на наш взгляд, должны относиться ко второй группе – промышленные сточные воды, ввиду их разнообразия и корреляцией с основными технологическими процессами на производстве [8];
4. – **сельскохозяйственные** сточные воды, образующиеся в сферах растениеводства и животноводства. Для обоих видов сельскохозяйственной деятельности состав таких сточных вод достаточно однозначен: так, для животноводства характерны фекальные загрязнения, образующихся на территории агрокомплексов сточных вод, а для растениеводства – загрязнения остатками минеральных удобрений в смывных водах.

В контексте эвтрофикации водоемов, наибольший интерес представляют хозяйственно-бытовые и сельскохозяйственные сточные воды, что никак не снижает значимость обработки промышленных и поверхностных вод [9]. Так, для ПСВ характерны загрязнения взвешенными веществами и нефтепродуктами [8], а сточные воды промышленных предприятий могут содержать широчайший спектр загрязнений физического, химического, биологического, радиационного характера [10-12].

Следует отметить, что в случае использования общесплавных систем канализования населенных пунктов, 1 и 3 группа стоков в периоды дождей и таяния снежного покрова будут поступать на очистные сооружения канализации совместно, что приводит к изменению качества поступающего стока в это время. Это будет заключаться как в разбавлении стоков, так и в повышенных концентрациях нефтепродуктов в смеси.

Достаточно часто в практике канализования совмещаются 1 и 2 группы стоков – когда промышленные стоки поступают в городскую централизованную систему водоотведения [7].

Качество хозяйственно-бытовых сточных вод, согласно различным литературным источникам и собственным исследованиям, приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Типичные показатели загрязнений хозяйственно-бытового стока

Показатели	Ед. изм.	По данным М. Хенце [13]	По данным ИТС [7]	Собственные данные
БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	250	200	170
БПК ₇	мгО ₂ /дм ³	290	--	---
ХПК _(бихром)	мгО ₂ /дм ³	530	--	---
ХПК _(бихром.2ч)	мгО ₂ /дм ³	370	--	260
Азот общий	мгN/дм ³	50	43	---
Азот NH ₄ ⁺	мгN/дм ³	30	35	43
Азот NO ₂ ⁻	мгN/дм ³	0,1	--	0,0
Азот NO ₃ ⁻	мгN/дм ³	0,5	--	1,5
Фосфор общий	мгP/дм ³	10	8	---
Фосфаты PO ₄ ³⁻	мгP/дм ³	7	5	8,1
Взвешенные в-ва	мг/дм ³	300	217	507
Соотн. БПК ₅ :N:P		100:12:2,8	100:17,5:2,5	100:25:4,7

Следует отметить, что данные таблицы 1.1. усреднены как по степени разбавления стока (условная норма водоотведения 250-300 л·сут/чел), так и по времени. Фактически, в зависимости от времени года, дня недели и даже времени суток концентрации загрязняющих веществ могут колебаться в весьма широких диапазонах [13]. С учетом проблематики действующих сооружений очистки городских сточных вод вопрос удаления биогенных элементов из сточных вод населенных пунктов в настоящее время наиболее актуален [15,16].

Как было указано выше, кроме органического вещества (органического углерода), в состав сточных вод входят основные биогенные элементы: азот и фосфор, которые рассмотрены более подробно ниже.

Для хозяйственно-бытовых сточных вод, соотношения форм азота весьма постоянно в большинстве рассматриваемых случаев [13,17], и промышленные стоки не влияют на этот параметр ввиду достаточно строгих нормативов по сбросу в сети централизованного канализования [17].

Соединения фосфора в сточных водах имеют два основных направления происхождения: продукты жизнедеятельности человека и использование моющих средств, содержащих фосфаты [18-21]. Присутствуют фосфаты в органической и неорганической форме: ортофосфаты (присутствуют в различных формах, в зависимости от pH - H_3PO_4 , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) и полифосфаты [22].

Ввиду сложностей с удалением фосфора из сточных вод, мировая научная и экологическая общественность смогла в последние десятилетия оказать воздействие на производителей синтетических моющих средств, что привело к ряду законодательных инициатив по снижению или запрещению применения фосфатов в СМС [20-24]. Исследования фактического содержания фосфатов в стиральных порошках, моющих средствах, используемых в быту, действительно показывают отказ производителей от использования этих соединений [25-26].

Таким образом можно резюмировать, что соединения азота и фосфора в сточных водах хоть и меняются в значительном диапазоне концентраций - не имеют тенденции к перспективному значительному изменению, что позволяет при разработке перспективных технологий опираться на текущее качество сточных вод в системах хозяйственно-бытовой канализации.

1.1.3. Нормирование качества очищенных сточных вод

Необходимая степень очистки хозяйственно-бытовых сточных вод долгое время являлась предметом дискуссии в научно-практических кругах [27,28]. Это связано с высокой стоимостью реализации технологий очистки городских сточных

вод до требований действующих водных экосистем [29,30], что особенно актуально для станций малой и средней производительности (до 10.000 м³/сут) [7].

Первые законодательные усилия по защите водоемов от ускоренной эвтрофикации за счет поступления хозяйственно-бытовых сточных вод были предприняты еще в 1970-х годах прошлого века [31]. Результатом дискуссии того времени стали достаточно жесткие нормативы по концентрациям биогенных элементов в водоемах [32, 33], которые приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Требования к концентрациям биогенных элементов в расчетном створе водоисточника на 2005-й год [33]

Наименование	Ед.изм.	Тип водоема		
		культурно-бытовое назначение	рыбохозяйственное водопользование	
Азот аммонийный, NH ₄ ⁺	мг/дм ³	2	0,39	
Азот нитратов, NO ₃ ⁻	мг/дм ³	10	9,1	
		эуτροφный	мезатрофный	олиготрофный
Фосфор фосфатов, P-PO ₄ ³⁻	мгP/дм ³	0,2	0,15	0,05

Нормативные показатели, приведенные в таблице 1.2. долгое время являлись основой для расчета нормативов допустимого сброса (НДС) очищенных сточных вод для предприятий [34, 35]. Не состоятельность такого подхода (не только по биогенным элементам, но и по другим типам загрязнений) очевидна в практической плоскости – в некоторых случаях, на основе расчета НДС приходится сделать вывод о необходимости доочистки по некоторым показателям самого источника (фоновые концентрации до створа сброса превышают ПДК).

Попыткой разорвать «замкнутый круг» стал Федеральный Закон № 225-ФЗ от 29.07.2017 [36], который ввел понятие «технологически нормируемых величин» (ТНВ), к которым также отнесены соединения азота и фосфора [37] в привязке к наилучшим доступным технологиям и категории водоема [38,39].

Связующим звеном между ТНВ и категорией водоема стал «интегральный показатель качества очистки» ИПКО, представляющий из себя сумму отношений

фактического качества очистки к значению целевых технологических показателей (ЦТП). Значения ЦТП приведены в таблице 1.3.

Кроме того, в таблице 1.3, для наглядности, предложены требуемые расчетные концентрации загрязнений для водоемов различной категории. При определении этой концентрации использовались статистические данные [7] и авторский опыт обследования действующих сооружений очистки сточных вод.

В частности, можно с достаточной степенью достоверности утверждать, что в подавляющем большинстве случаев, вне зависимости от категории водоема, удастся достигнуть показателей ЦТП по БПК и ХПК на действующих станциях очистки хозяйственно-бытовых сточных вод (без существенного подмеса промышленных либо сельскохозяйственных стоков). Эта гипотеза очевидна из данных таблицы 1.1., где можно отметить недостаток органических веществ для протекания процессов биологического удаления азота.

В то же время известно, что полная биологическая очистка в ее классическом исполнении (первичный отстойник – биореакторы – вторичный отстойник) может обеспечить концентрации взвешенных веществ на выходе не более 10-15 мг/л [40]. Более низкие концентрации могут быть достигнуты исключительно за счет применения доочистки сточных вод [41].

Таблица 1.3 - Значения ЦТП и ориентировочных показателей очистки для технологически варьируемых величин

Показатель	ЦТП, [7] мг/дм ³	Категория водоема			
		А	Б	В	Г
Взвешенные вещества	5	2	3	15	15
БПК ₅	3	1	3	10	10
ХПК	30	20	30	50	50
Азот аммонийных солей (N-NH ₄)	1	0,6	1,0	1,0	22
Азот нитратов (N-NO ₃)	8	6	8	8	20
Азот нитритов (N-NO ₂)	0,1	0	0,1	0,1	0,15
Фосфор фосфатов (P-PO ₄)	0,5	0,3	0,7	0,5	8
	ИПКО	3,5	7	12	50

Категории водоемов в таблице 1.3:

- *Категория А.* Наиболее охраняемые или наиболее уязвимые водные объекты, озеро Байкал.
 - *Категория Б.* Основная группа водных объектов (включая Азовское, Черное, Японское, Балтийское и Каспийское моря, а также водохозяйственные участки этих морей).
 - *Категория В.* Экологически благополучные водные объекты.
- Категория Г.* Объекты с особо низким содержанием азота и фосфора, допускающие применение биологической очистки без глубокого удаления азота и фосфора.

Приведенные значения визуализируют основные тенденции в очистке сточных вод: для наиболее распространенной категории Б требуется достаточно высокая степень очистки по азоту и фосфору, практически на уровне ЦТП. Гипотетически возможны отклонения в большую сторону за счет снижения ИПКО по взвешенным веществам, что достижимо на практике в случае применения доочистки от взвешенных веществ.

В случае водоемов категории В – предложено отказаться от доочистки, что сразу дает повышенные индексы по взвешенным веществам, ХПК и БПК, что, в свою очередь, ужесточает требования по азоту и фосфору. Для таких систем есть и второй вариант – выполнить глубокую доочистку по взвешенным веществам и повысить сброс биогенных элементов. Техничко-экономическое сравнение двух вариантов в этом случае следует проводить для каждого конкретного случая.

Для водоемов категории Г в справочнике ИТС указано: «*для водоемов категории Г возможно применение механических способов очистки*». В таблице 1.4. рассмотрен вариант только механической и биологической очистки аэрацией (вариант очистки, имевший распространение с середины прошлого века). Как видно, даже в случае аэрации, попасть под критерий ИПКО удастся с трудом, по нижней границе качества исходных вод из таблицы 1.1., а значит, для характерных для современного хозяйствования составов сточных вод, даже для водоемов

категории Г, может понадобиться полная биологическая очистки с удалением биогенных элементов.

В целом, анализируя современные способы нормирования качества очистки сточных вод, можно отметить некоторую компромиссность действующих методик. В данном случае, компромисс не в пользу биосферных функций водоемов (сравнивая показатели таблиц 1.3 и 1.4) и не имеет отношения к «доступным» технологиям, скорее, этот компромисс – уступки сложной экономической ситуации в водохозяйственном комплексе.

Отсюда возникает необходимость в анализе технико-экономической эффективности работы станций очистки сточных вод.

1.1.4. Оценка технико-экономической эффективности работы станций биологической очистки сточных вод

Технико-экономические показатели большинства предприятий водно-хозяйственного комплекса (ВХК) стран бывшего СССР, в настоящее время характеризуются низкой рентабельностью [42], что сопровождается финансово-организационной разбалансированностью отрасли [7]. Как естественная монополия, ВХК не имеет права действовать в рыночных механизмах, но в то же время подвергается взысканиям за невыполнение экологического законодательства, как и все прочие организации.

Область канализационного хозяйства в этих условиях занимает отстающие позиции [42]. При этом, очистка сточных вод в себестоимости водоотведения занимает 30-40%, остальное складывается из затрат на эксплуатацию канализационных сетей и насосных станций. Тариф же, привязан к себестоимости услуг водоотведения, что дает обратный эффект на качество очистки – чем ниже затраты на очистку, тем хуже качество очистки, тем ниже тариф для населения. Поэтому представленные в литературе [7] тарифы не имеют никакого технико-экономического смысла.

Действующее в РФ законодательство финансово стимулирует внедрение наилучших доступных технологий [43] – так, «за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ в пределах технологических нормативов **после внедрения наилучших доступных технологий на объекте**, оказывающем негативное воздействие на окружающую среду» при исчислении платы за сброс загрязняющих веществ, применяется коэффициент «0» (плата не взимается). Таким образом, внедрение НДТ повышает инвестиционную привлекательность мероприятий по очистке сточных вод.

В то же время, даже в случае выполнения норматива допустимого сброса, плата за сброс применяется с коэффициентом 1, в случае выполнения временно разрешенных величин сброса, плата исчисляется с коэффициентом 25, а в случае не санкционированного превышения коэффициент составляет 100 крат.

Таким образом, в условиях фиксированных надбавок к себестоимости очистки сточных вод при формировании тарифа, что составляет доходную часть процесса водоотведения и расходной части (вне прямых затрат) в виде платы за негативное воздействие на окружающую среду, единственным выходом является внедрение НДТ на действующих станциях очистки, даже с учетом определенного повышения себестоимости процесса обработки ГСВ.

Тем не менее, рентабельность многих мероприятий по переходу на НДТ часто остается все еще отрицательной [7], что требует разработки менее капиталоемких решений перехода на НДТ, что особенно актуально для станций малой и средней производительности.

Кроме величины капитальных затрат, как указано выше, важным фактором будет являться также себестоимость очистки сточных вод и определение некоторой условной границы, при которой покрытие трат отменой платы за загрязнение нивелируется (уравнивается).

Поскольку зачастую, в практике водоотведения приходится рассматривать низкоэффективные, но действующие сооружения очистки сточных вод, оценку технико-экономической эффективности перехода на НДТ целесообразно вести в формате реконструкции действующих сооружений, а не строительства новых.

Действующие сооружения имеют некоторую остаточную стоимость основных фондов K_{OF} (руб.). Эта стоимость вследствие реконструкции повышается на величину капитальных затрат на эти мероприятия $K_{РЕК}$ (руб.).

Таким образом, стоимость основных фондов очистных сооружений после реконструкции составит

$$K_{OF+РЕК} = K_{OF} + K_{РЕК}, \text{ (руб.)} \quad (1.1)$$

Годовые приведенные затраты на эксплуатацию станции очистки сточных вод определяются по формуле [44]

$$ГПЗ = C + E_n \cdot K_{OF+РЕК}, \text{ (руб.)} \quad (1.2)$$

где C – годовые эксплуатационные расходы;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, который в случае, если не оговорен инвестором, составляет 0,12.

Отсюда мы и приходим к себестоимости обработки воды [45]

$$COB = ГПЗ / W_{год}, \text{ (руб/м}^3\text{)} \quad (1.3)$$

где $W_{год}$ – годовой объем очищенной воды, $м^3$.

На основании величины COB , с учетом плановой прибыли (P , %), определяется отпускная цена на услугу очистки сточных вод (OC , руб.). Важным фактором при этом является сопоставление отпускной цены с действующими тарифами в регионе и установление необходимости и степени повышения этого тарифа.

Приведенные выше расчеты также указывают на тот факт, что мероприятия по реконструкции очистных сооружений без достижения требований НДТ изначально имеют пониженную экономическую эффективность за счет прибавления в этом случае к величине ГПЗ расходов ($CЗВ$, руб.) на оплаты за сброс загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты [43].

Таким образом, на стадии принятия решения о реконструкции станции очистки сточных вод, в каждом конкретном случае необходимо сравнивать 2 варианта:

1. Эксплуатация действующих сооружений, не отвечающие требованиям НДТ + плата за сброс загрязняющих веществ.

2. Реконструкция до уровня НДТ, эксплуатация модернизированных сооружений без платы за сброс с возможным увеличением тарифа на водоотведение.

Как указано выше, доля затрат на очистку сточных вод в тарифе на водоотведение составляет 30-40%, что также необходимо учитывать при анализе возможности и эффективности внедрения НДТ при реконструкции действующих сооружений. Диаграммы финансовых потоков для 2-х вариантов приведены на рисунке 1.1.

Приведенную схему предлагается использовать для первичного обоснования внедрения НДТ на станциях очистки сточных вод, не удовлетворяющих современным требованиям.

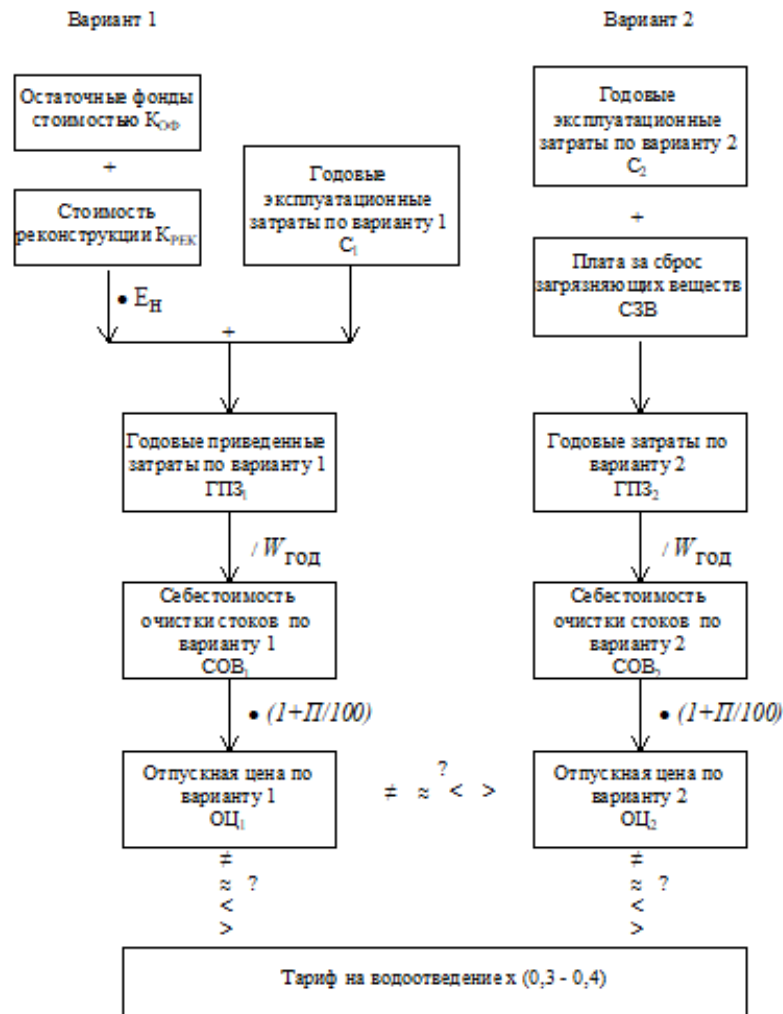


Рисунок 1.1 - Диаграммы финансовых потоков при сравнении вариантов для внедрения НДТ на очистных сооружениях сточных вод

Согласно схеме финансовых потоков на рисунке 1.2., на конечную отпускную цену влияют величина капитальных затрат и эксплуатационные затраты. В капитальные затраты входят средства на строительные-монтажные работы, оборудование, мебель, инвентарь и прочие расходы [45], эксплуатационные расходы состоят из ряда статей, представленных в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Структура эксплуатационных расходов на станциях ОСВ

Группа затрат	Статьи расходов	Описание
Прямые производственные расходы	Затраты на покупку реагентов	Приобретение коагулянтов, флокулянтов, хлорсодержащих реагентов, органических субстратов, ферментных комплексов
	Затраты на электроэнергию	Воздуходувное оборудование, насосное оборудование, механизированные мешалки, системы измельчения, редукторы технологических элементов и конструкций, электролизные установки, нагрев воды.
	Амортизация основных фондов	3,6% от стоимости основных фондов
	Фонд оплаты труда	Оплата труда задействованного в основном технологическом процессе персонала.
Цеховые расходы		Заработная плата цехового персонала с отчислениями, расходы по охране труда, на энергию всех видов, кроме задействованной в технологическом процессе, содержание оборудования, зданий и инвентаря, текущий ремонт сооружений, оборудования и инвентаря, амортизацию основных фондов цеха, цеховые транспортные расходы.
Общезаводские расходы		Содержание, текущий ремонт и амортизацию зданий и инвентаря общепроизводственного назначения, административно-управленческие расходы, заработную плату общезаводского персонала с отчислениями, расходы по охране труда, налоги и сборы, входящие в себестоимость продукции, прочие общепроизводственные расходы предприятия.

Характерное распределение статей эксплуатационных расходов приведено на диаграмме рисунке 1.2. [45].

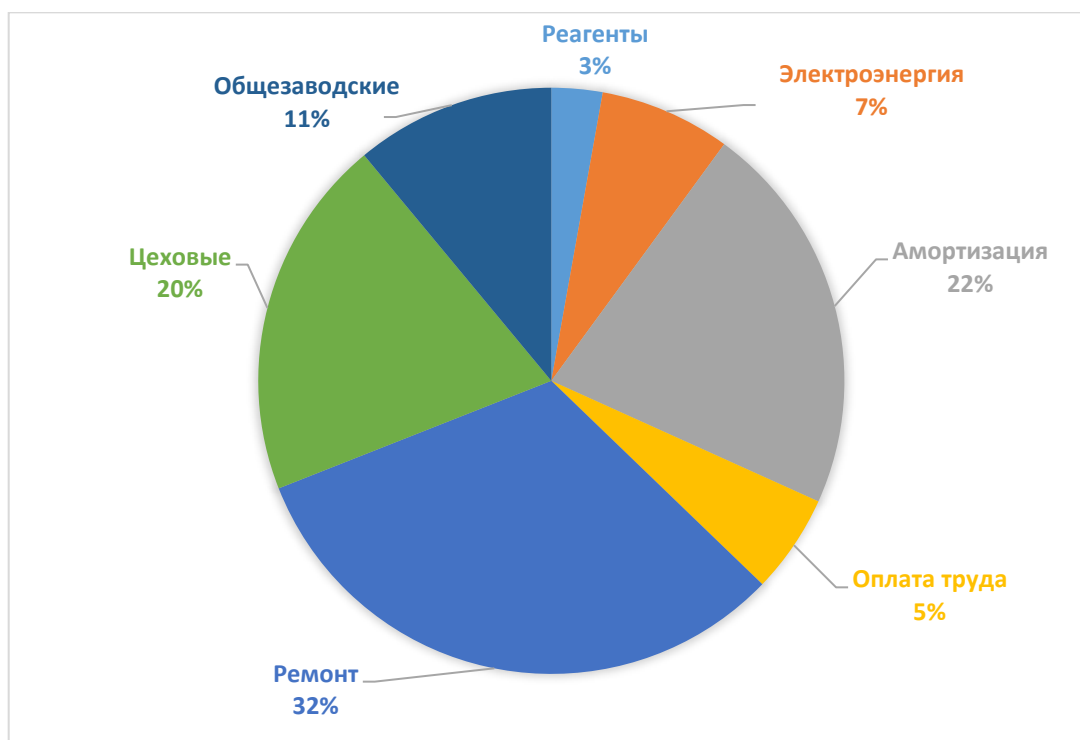


Рисунок 1.2 - Диаграмма распределения статей эксплуатационных затрат станций ОСВ

Значительный ремонтный, амортизационный и цеховой фонды выдвигают следующие требования по повышению экономической эффективности реконструкции действующих сооружений ОСВ с доведением качества очистки до требований НДТ:

1. Снижение капитальных затрат на реконструкцию при сохранении качества очистки. Такое решение позволит не только улучшить инвестиционную привлекательность системы в целом, но и снизить начальную стоимость основных фондов, и, соответственно, такой крупной статьи расходов как амортизационные отчисления.
2. Повышение надежности работы систем очистки сточных вод [46]. В данном случае речь идет о такой значительной статье расходов как ремонтный фонд. Повышение надежности приведет к снижению затрат на ремонт, что может быть обеспечено на проектном и научно-техническом уровне отказом от сложных, перегруженных и неремонтопригодных элементов и решений.

3. Снижение цеховых расходов возможно за счет автоматизации процессов очистки сточных вод, что может в некоторой степени противоречить п. 2 данных требований. В этом случае также необходимо находить оптимальный вариант с финансовой точки зрения.

Техническая сторона эффективности работы сооружений ОСВ оценивается качеством очистки сточных вод, объемом сооружений, занимаемой площадью и энергопотреблением [47]. Поскольку вопрос площади можно исключить из этого списка ввиду его прямой связи с объемом используя известный подход ИПКО [7], для оценки технической эффективности можно предложить следующий набор данных:

- ИПКО (безразм.) – показатель качества очистки, варьируется от 3,5 до 50 и более.
- Время пребывания сточной жидкости в процессе очистки $T_{оч}$ (ч), которое фактически является показателем объема сооружений. Здесь учитываются все стадии очистки – от приемных камер до трубопроводов выпусков.
- Удельный расход воздуха на очистку и перемешивание $I_{ок}$, m^3/m^3 , - расход воздуха, подаваемый в систему биологической очистки, отнесенный к расходу поступающих на очистку сточных вод.
- Кратность превышения рециркуляционных потоков над расходом исходного стока $S_{рец}$, - отношение суммарного расхода рециклов к расходу поступающих на очистку сточных вод.
- Количество условных зон механического перемешивания $Z_{пер}$, зона перемешивания ограничивается в пределах неразрывного тока поступающей иловой смеси.

К сожалению, в области исчисления не имеет выражения крайне важный технологический параметр – «foolproof» технологии [48, 49], что подразумевает ее устойчивость к неверным действиям обслуживающего персонала. Очевидно, что в области конструкционной защиты обустроить какие-либо решения в

биохимических процессах очистки воды возможным не представляется, однако хотя бы первый и второй уровни защиты (обнаружения персоналом несоответствия и его недопущение) должны максимально реализовываться на станциях ОСВ.

1.1.5. Обоснование основных требований к станциям очистки сточных вод

В настоящее время на нормативном уровне (ИТС [7]) требования к технологиям очистки сточных вод, применяемым на действующих и проектируемых станциях, изложены достаточно полно [50, 51]. Основными технологиями, согласно действующему подходу, являются:

БО – биологическая очистка (полная биологическая очистка) – удаление из сточных вод органических веществ без обработки биогенных элементов.

БН – биологическая очистка, включающая нитрификацию (удаление аммонийного азота аэрацией с переводом в нитрат-ион).

БНД – биологическая очистка с нитри-денитрификацией, позволяющая удалить как органические вещества, так и соединения азота. При этом направленно из сточных вод соединения фосфора не изымаются.

БНДХФ – биологическая очистка с нитри-денитрификацией и химическим удалением фосфора. Под химическим удалением понимается осаждение фосфатов с помощью коагулянтов.

БНДБФ – биологическая очистка с нитри-денитрификацией и биологическим удалением фосфора. Биологическое удаление подразумевает культивацию фосфор-аккумулирующих микроорганизмов с выводом накопленных фосфатов с избыточным илом.

БНДБХФ – биологическая очистка с нитри-денитрификацией и комбинированным биологическим и химическим удалением фосфора.

Индекс ИПКО для каждой из приведенных технологий, согласно [7] приведен в таблице 1.5. При этом указаны значения показателей очистки для технологии с доочисткой и без доочистки.

Таблица 1.5 - Значения ИПКО для основных технологий

Технологии	Величина ИПКО	
	без доочистки	с доочисткой
БО	16,0 – 47,9	11,6 – 45,5
БН	8,8 – 21,7	6,4 – 20,0
БНД	7,1 – 18,8	5,8 – 17,0
БНДХФ	5,9 – 13,3	4,5 – 11,5
БНДБФ	6,3 – 13,8	5,0 – 12,0
БНДБХФ	5,9 – 13,3	4,5 – 11,5
ЦТП	7,0	

Как видно из таблицы 1.5, ни одна из предложенных в справочнике НДТ технологий не соответствует ИПКО, требуемым при сбросе сточных вод в водоемы категории А (ИПКО = 3,5). Также отсюда следует, что само по себе использование наилучшей доступной технологии не гарантирует требуемое качество очистки сточных вод, наблюдается достаточно большой разброс величины ИПКО в пределах одной технологии.

Кроме основной технологии, согласно [7], существуют следующие требования к станциям очистки сточных вод, отвечающих требованиям НДТ:

1. Определение фактических и перспективных расходов сточных вод, поступающих на рассматриваемые очистные сооружения. При этом подход, рекомендованный отечественными нормативными документами [52] весьма грубо учитывает сезонные колебания количества сточных вод (максимум-минимум), которые, согласно иностранным источникам, могут быть весьма существенны [13]. Не смотря на значительные суточные колебания количества сточных вод при небольших производительностях систем [53], эта неравномерность менее значима при расчете очистных сооружений ввиду устройства систем усреднения. Наличие же суточных колебаний способно серьезно разбалансировать технологию очистки, рассчитанную на максимальные расходы. Отсюда следует, что современные

системы очистки сточных вод *должны быть устойчивы к суточным колебаниям количества поступающих сточных вод.*

2. Организация комплекса мероприятий по отбору проб и анализу сточной, очищенной жидкости. Бесспорное требование, которое должно быть дополнено необходимостью анализа сточных вод в процессе очистки [54]. Особый интерес представляет поточный метод анализа – с помощью непрерывного измерения электрохимических показателей сточных вод, позволяющих оперативно получать косвенные данные о работе каждой ступени очистки. Алгоритмизация таких данных, связывающая показания приборов и технологические параметры – перспективный подход к управлению процессами очистки сточных вод [55, 56]. Следует признать, что высокая степень автоматизации в экономических условиях отечественного комплекса ВКХ все еще остается недоступной, однако, за рубежом достаточно высокие уровни автоматизации давно стали распространенной практикой [57, 58]. Основные контролируемые параметры на станциях очистки сточных вод, согласно [59]: расход, уровень (давление), температура, рН, Редокс-потенциал, электропроводимость, растворенный кислород, мутность, иловый индекс, концентрации ингредиентов ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$), ХПК, флуоресценция, содержание растворенных газов.

Очевидно, что значительная часть этих параметров невозможно контролировать на аппаратном уровне без внедрения роботизированных комплексов, однако этого и не требуется. «Инертность» систем биологической очистки позволяет в этом случае использовать классический лабораторный анализ с введением этих параметров персоналом.

3. Организация системы обработки осадка сточных вод в части стабилизации, обезвоживания и обеспечения требуемого качества возвратных вод. При соблюдении основных технологических требований БНДФ, БНДФХФ, избыточный ил будет содержать значительные количества фосфатов, которые при стабилизации переместятся в надилловую воду [60]. Возврат такой воды в голову сооружений, по понятным причинам, не целесообразен. Здесь же можно отметить требования защиты почв при размещении осадков очистных сооружений [61].

4. Заключительным, на наш взгляд, является требование по безопасности станций очистки сточных вод для атмосферного воздуха [62].

На основании изложенных выше положений на рисунке 1.3 предложена диаграмма требований к современным станциям очистки сточных вод.

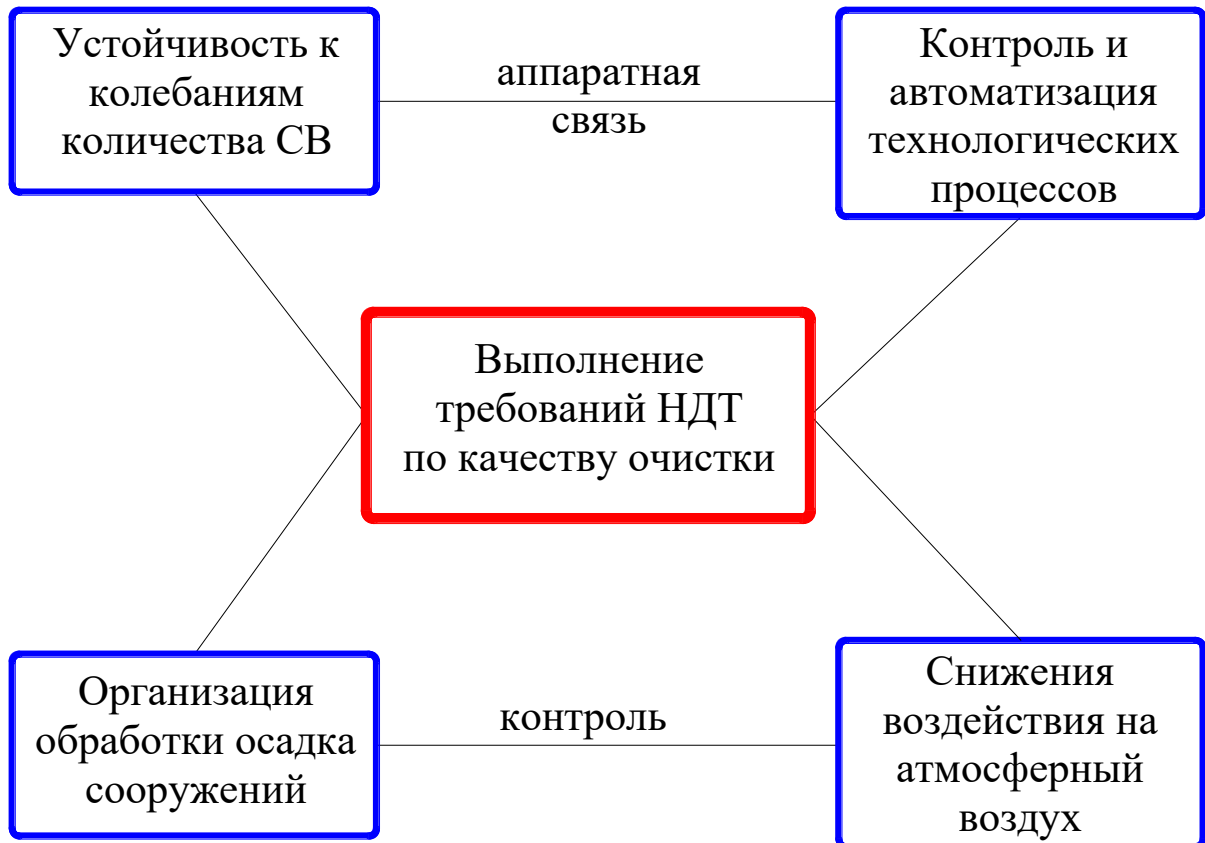


Рисунок 1.3 - Диаграмма требований к современным станциям очистки сточных вод.

Сформированные требования предлагается использовать для анализа эффективности действующих и проектируемых сооружений очистки городских сточных вод.

1.2. Схемы и реакторы биологической очистки сточных вод

Исходя из рассмотренной общей проблематики систем очистки городских сточных вод, а также современных требований к качественным показателям их работы, следует выполнить критический анализ как действующих способов

биологической очистки, так и наилучших доступных и перспективных технологий для выявления основных направлений и тенденций перехода на НДТ.

1.2.1. Действующие, наилучшие доступные и перспективные технологии биологической очистки сточных вод

Большая часть очистных сооружений, действующих на территории РФ запроектирована и построена в 60х-70х годах прошлого века, когда использовалась классическая схема биологической очистки Лудзака-Эттингера [7]. Станции, построенные в 80-90х годах и реконструированные с учетом уменьшения фактической загрузки работают на принципе модифицированного процесса Лудзака-Эттингера, который получил наибольшее распространение не только в РФ, но и в США [63]. Более развитыми в этом плане являются Китай (большая часть очистных сооружений работает по схеме A2/O [64] – следующий шаг развития после модифицированной схемы Лудзака-Эттингера) и некоторые страны Европейского Союза [65]. Таким образом, стоит рассмотреть и подвергнуть критическому анализу все основные технологии, начиная с процесса Лудзака-Эттингера.

1.2.1.1 Модифицированный процесс Лудзака-Эттингера.

Как отмечено выше, множество действующих станций изначально рассчитывались на работу с использованием данной классической схемы. Суть модифицированного процесса Лудзака-Эттингера (рисунок 1.4) заключается в биологическом удалении соединений азота предварительной денитрификацией. От классического процесса Лудзака-Эттингера отличается только наличием внутреннего рецикла [66].

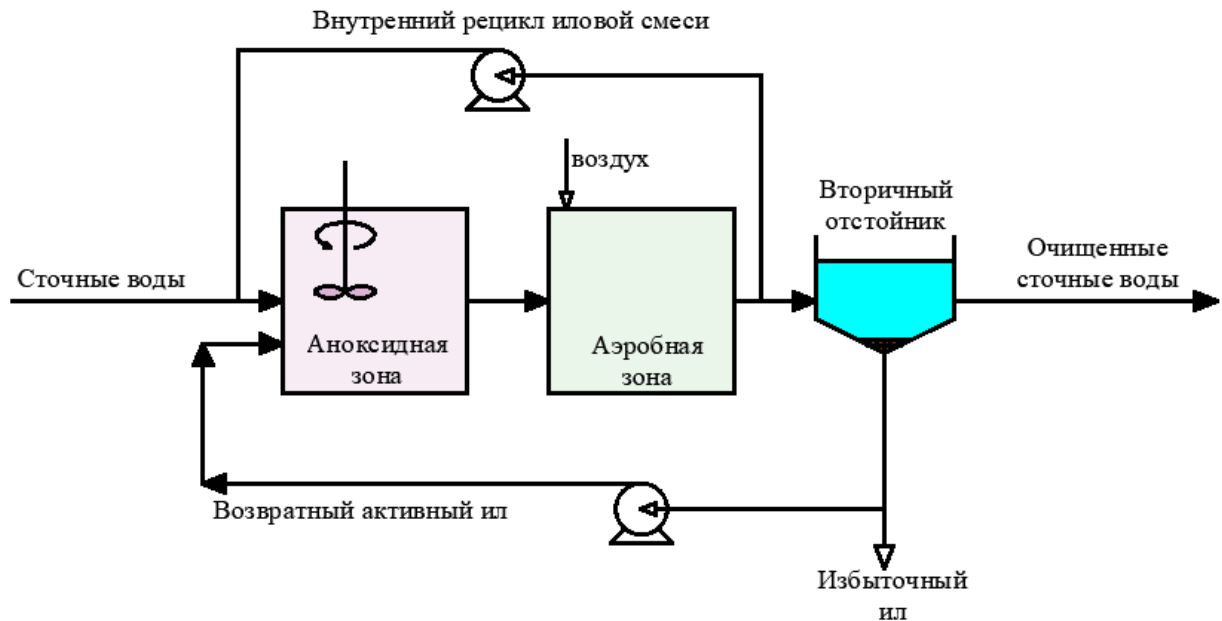


Рисунок 1.4 - Модифицированный процесс Лудзака-Эттингера

Сущность процесса: в первое сооружение (аноксидный реактор) поступают исходные сточные воды, возвратный ил и смесь нитратного рецикла. В аноксидной зоне происходит денитрификация азота нитратов до газообразного азота с потреблением органического вещества исходного стока. В аэробной зоне проходят процессы автотрофной нитрификации, потребления оставшегося после денитрификации органического вещества. Далее иловая смесь поступает во вторичный отстойник, где происходит разделение ила и очищенной сточной жидкости. Избыточный ил при этом сбрасывается на дальнейшую обработку, весь остальной – возвращается в аноксидный реактор [67].

В целом технология направлена на очистку от органических веществ и соединений азота (классификация БНД по [7]). Качество очистки колеблется в значительных пределах, в зависимости от состава исходного стока [67], особенно критичным является соотношение БПК:N (БПК сточных вод к азоту в исходном стоке) [67, 68].

Величина рецикла возвратного ила зависит от концентрации ила в аэротенке и режима работы вторичного отстойника [69] и составляет порядка 30% от расхода исходных сточных вод. Величина нитратного рецикла также зависит от состава сточных вод и зачастую составляет 100 – 300% от расхода исходного стока. Таким

образом, при использовании схемы модифицированного процесса Лудзака-Эттингера дополнительно к расходу исходных сточных вод в системе перекачивается до 330% расхода.

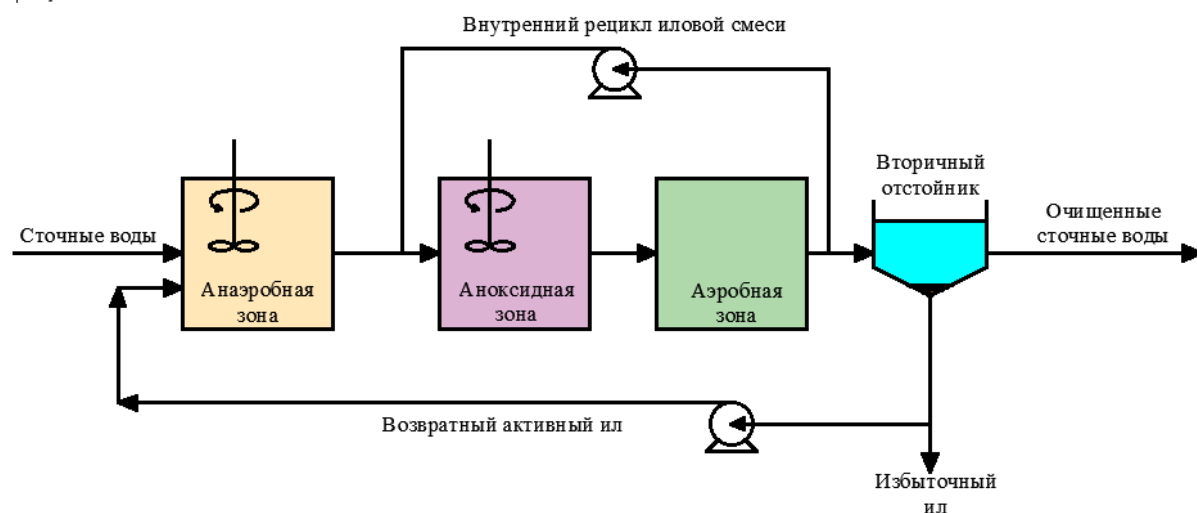
При времени пребывания в денитрификаторе (аноксидном реакторе) порядка 1 часа и в аэробном реакторе 6-8 часов (в зависимости от состава исходного стока), можно определить общее время пребывания в системе очистки $T_{оч}$ с учетом рециклов, которое составляет от 14 до 21 часа. Указанные величины являются ориентировочными, однако могут быть использованы для выявления основных путей реконструкции таких сооружений в части использования имеющихся объемов.

Расход воздуха на аэрацию (проведение процессов нитрификации и аэробной биодеструкции органических загрязнений) зависит от качества сточных вод и эффективности системы аэрации. Согласно [70], для характерного качества городских сточных вод, расход воздуха колеблется в пределах 12 – 18 м³ воздуха/м³ обрабатываемой смеси, что, с учетом рециклов, дает достаточно большой разброс необходимого количества воздуха на 1 м³ обрабатываемых исходных сточных вод (22 – 42 м³/м³).

Важным элементом процесса очистки являются вторичные отстойники [69], две основные функции которого – осветление очищенных сточных вод и сгущение возвратного и отводимого ила. Время пребывания во вторичном отстойнике составляет 1,5 – 2,5 ч, что увеличивает $T_{оч}$ (фактический, общий объем сооружений) до диапазона 15,5 – 23,5 ч.

1.2.1.2 Процесс А²/О

Непосредственным развитием модифицированного процесса Лудзака-Эттингера стала схема А²/О [71], которая подразумевает наличие 3-х зон очистки – анаэробная, анноксидная и аэробная с устройством возвратного и нитратного рециклов (Рисунок 1.5).

Рисунок 1.5 - Схема A²/O

Данный процесс относится уже к технологии БНДФФ – биологическая очистка с удалением соединений азота и фосфора [72] и технологически соответствует критериям НДТ для соответствующих показателей ИПКО [7].

В схеме A²/O, уплотненный ил вторичных отстойников рециркулируется в анаэробный реактор, куда поступают исходные стоки. Насыщенные фосфатами стоки далее направляются в аноксидную зону, куда также подается нитрифицированная иловая смесь из аэробного реактора. В аноксидном реакторе протекают процессы денитрификации с переводом азота нитратов в N₂. Далее смесь поступает в последний, аэробный биореактор, где происходят процессы нитрификации, разрушения остатка органического вещества и накопление фосфора микроорганизмами. Поглощенный активным илом фосфор выводится из системы с избыточным активным илом.

Ввиду наличия нитратов в рециркулирующем иле, процесс роста ФАО (фосфор-аккумулирующих организмов) в анаэробном реакторе замедляется, что не позволяет достичь высоких показателей очистки по фосфору с использованием схемы A²/O. Остаточные значения концентрации фосфора фосфатов при очистке городских сточных вод находятся в пределах 1,5 мг/л и более, при ЦТП 0,5 мг/л [73-75].

Следует отметить, что использование биофильтров в качестве реакторов A^2/O не способно привести к качественному улучшению параметров очистки [76] при указанных в разделе 1 характеристиках исходного стока.

Для схем A^2/O важным является соотношение БПК (либо ХПК) к азоту в исходных сточных водах [77]. Оптимальным считается соотношение БПК₅ к N-NH₄ более 8 [78]. Данные таблицы 1.1. указывают на соотношение 5,7 по ИТС и 4 по результатам собственных исследований.

При аналогичных процессу Лудзака-Эттингера затрат на аэрацию, время пребывания в системе $T_{оч}$ увеличивается на 0,5 – 1 часа за счет дополнительного биореактора, а также удваиваются затраты на перемешивание.

1.2.1.3 Процесс Phoredox

Процесс Phoredox является развитием схемы A^2/O (известен также как «пятистадийный Vardenpho» процесс) [79] (рисунок 1.6). По сути, в схему A^2/O между третьим реактором и вторичным отстойником добавлены еще два биореактора – аноксидный и аэробный второй ступени. Задачи второй ступени – увеличить степень потребления фосфора микроорганизмами путем снижения нитратной нагрузки на первый, анаэробный, реактор [80].

Phoredox процесс показывает высокую эффективность удаления соединений азота и фосфора [81] (до 97% либо концентраций 0,5 мг/л, что соответствует требованиям ЦТП), однако на процесс очистки все еще оказывает влияния недостаток БПК на входе в систему и наличие нитратов в рецикле [82]. Так, требуемое соотношение ХПК/N для этого процесса составляет 12,5 – 14.

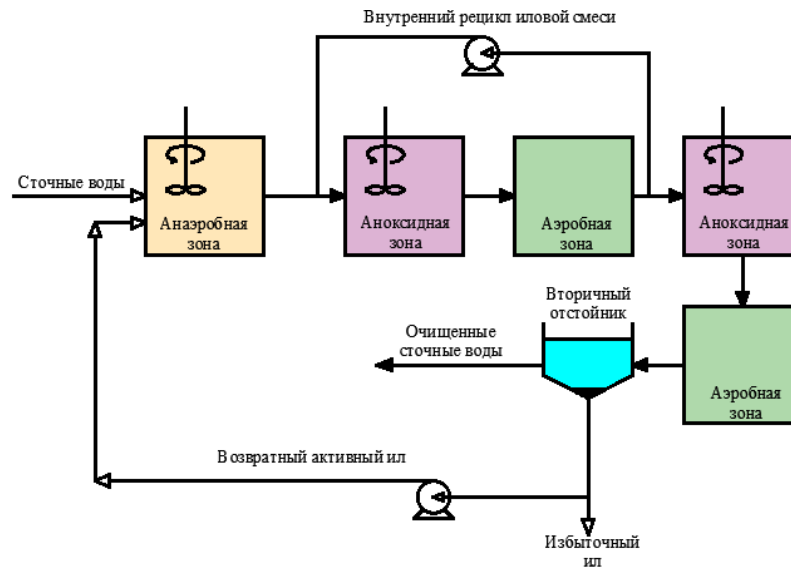


Рисунок 1.6 - Схема процесса Phoredox

Относительно A^2/O время пребывания сточных вод в системе $T_{оч}$ увеличивается на 2 – 3 часа за счет дополнительной степени очистки, увеличивается расход воздуха за счет аэробного реактора второй степени на 20-30%, затраты на перемешивание вырастают на 30-40%.

1.2.1.4 Процесс Кейптаунского университета (UCT)

UCT процесс и его модифицированный вариант – МУСТ [69] получил широкое распространение в мировой практике очистки сточных вод [83, 84, 85]. Схемы процессов представлена на рисунках 1.7, 1.8.

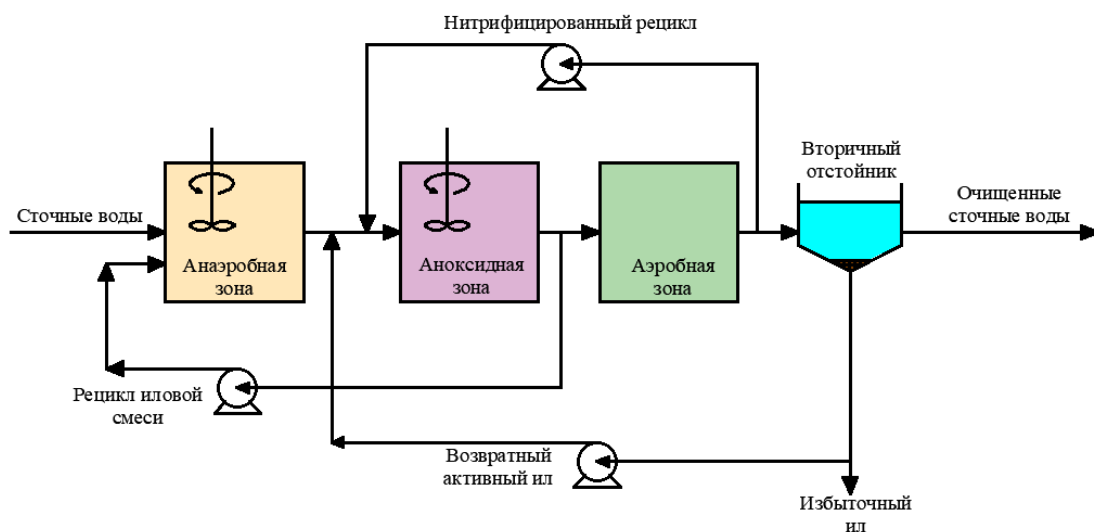


Рисунок 1.7 - Схема UCT процесса

Как видно из рисунка 1.7, УСТ процесс включает 3 ступени (анаэробную, аноксидную и аэробную) и характеризуется наличием трех рециклов:

- классический нитратный рецикл из аэробного реактора в аноксидный, предназначенный, как и в других схемах, для протекания процессов нитриденитрификации;
- рецикл возвратного ила, который, в отличие от других, вышеописанных схем, замыкается не на анаэробном, а на аноксидном реакторе, что исключает попадание нитратов в анаэробный реактор, тем самым создавая условия для роста ФАО;
- денитрифицированный рецикл, забирающий иловую смесь после аноксидного реактора с подачей перед анаэробным реактором.

Отличие модифицированного МУСТ процесса от УСТ заключается в устройстве 2х последовательных аноксидных реакторов: первым из них замыкается рецикл возвратного ила, и после него же осуществляется отбор денитрифицированного стока на соответствующий рецикл; второй же аноксидный реактор принимает нитрифицированный рецикл [86].

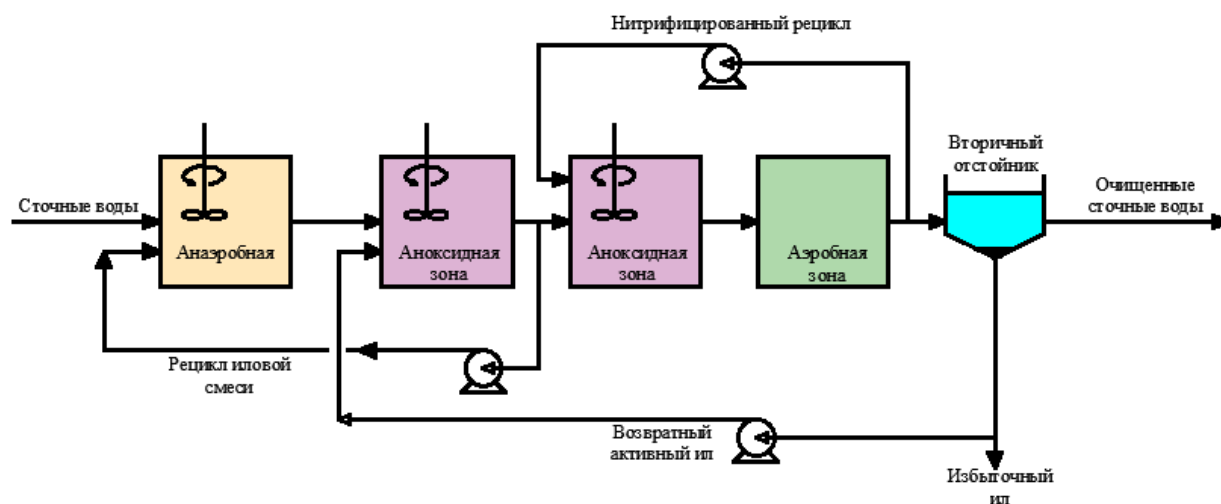


Рисунок 1.8 - Схема модифицированного МУСТ процесса

Для протекания биологического удаления фосфора по схеме УСТ, соотношение ХПК/N ограничено минимальным значением около 7 [69], в ином случае органического вещества не будет хватать для протекания процесса денитрификации с учетом нитратного рецикла, и с денитрифицированным

рециклом в анаэробный реактор будут поступать нитраты, ингибирующие рост ФАО.

Решить этот вопрос возможно с помощью снижения расхода денитрифицированного рецикла, однако оперативный контроль соотношения ХПК/N в условиях действующей станции затруднен достаточно продолжительным анализом ХПК, даже с использованием самых современных методов анализа.

Увеличением объема анаэробного реактора проблему нитратов в денитрифицированном рецикле также решить не удастся. При увеличении времени пребывания более 1 часа возникает проблема седиментационных свойств активного ила – вторичный отстойник в этом случае не обеспечивает необходимую степень очистки [69, 87].

Именно для решения этой проблемы схема УСТ и была модифицирована в МУСТ. Общий объем аноксидной зоны при этом остается неизменен, однако разбивается в соотношении: 10% – первый реактор, 90% – второй реактор. При такой конфигурации системы величина нитратного рецикла не влияет на работу анаэробного реактора в случае колебания соотношения ХПК/N, что, однако, ограничивает это соотношение минимальным значением порядка 9 [69].

Время пребывания сточной жидкости в системе $T_{оч}$ для процессов УСТ и МУСТ практически идентично процессу A^2/O , как и расходы на перемешивание и аэрацию. На величину дополнительного (денитрифицированного) рецикла в этом случае возрастают затраты на рециркуляцию.

1.2.1.5 Йоханнесбургский процесс (JNB)

Согласно Йоханнесбургской схеме решить вопрос нитратов в возвратном иле предлагается посредством размещения на линии этого рецикла дополнительного аноксидного реактора (Рисунок 1.9) [88].

Очевидный недостаток первоначального варианта этой схемы – отсутствие органического субстрата в возвратном иле для проведения процесса денитрификации - решается разделением потока поступающих сточных вод [89].

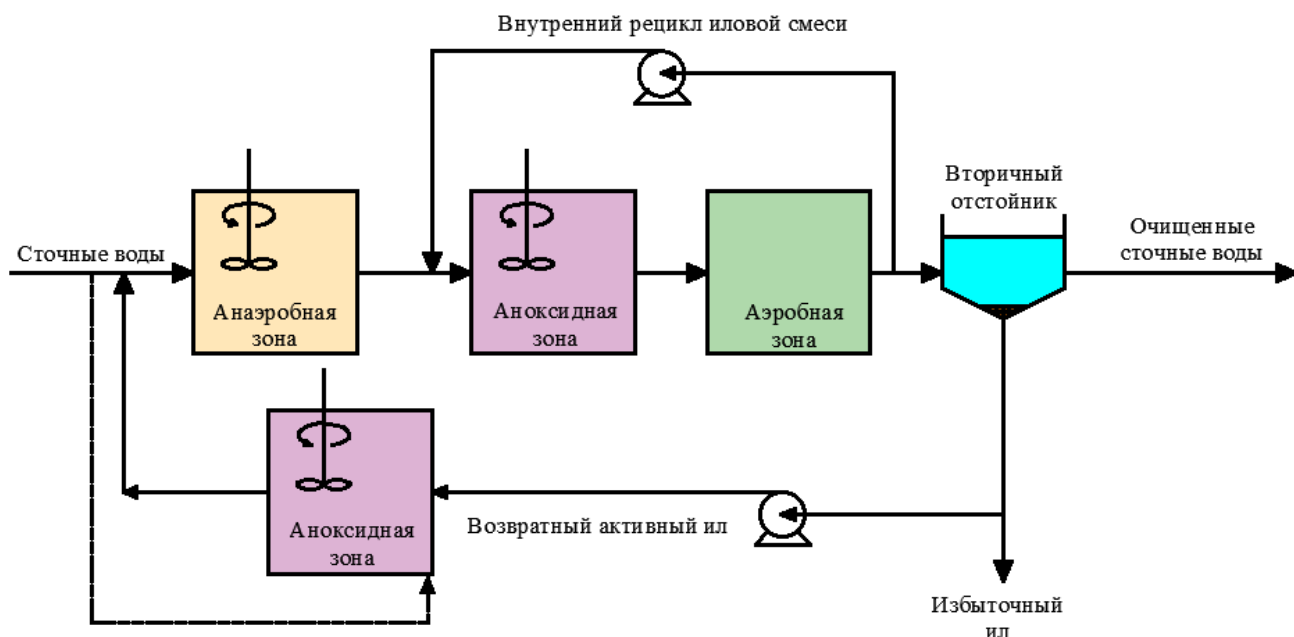


Рисунок 1.9 - Схема Йоханнесбургского процесса

Данная схема декларирует эффективную работу при соотношении ХПК/Н порядка 10-14 (в зависимости от степени рециркуляции возвратного ила) [88], что превышает аналогичный показатель для МУСТ. То есть система более требовательна к концентрациям органического вещества в исходном стоке, что ограничивает ее область применения.

Относительно схемы A^2/O , схема характеризуется большим временем $T_{оч}$ на 0,5 -1 часа и на 50% большими затратами на перемешивание жидкости.

1.2.1.6 Многоиловые системы

Многоиловые системы (DEPHANOX и M-DEPHANOX) предложены для работы в условиях поступающих сточных вод с низким содержанием органического вещества [90]. Особенностью DEPHANOX процесса является размещение в начале очистки анаэробного биореактора-отстойника (Рисунок 1.10).

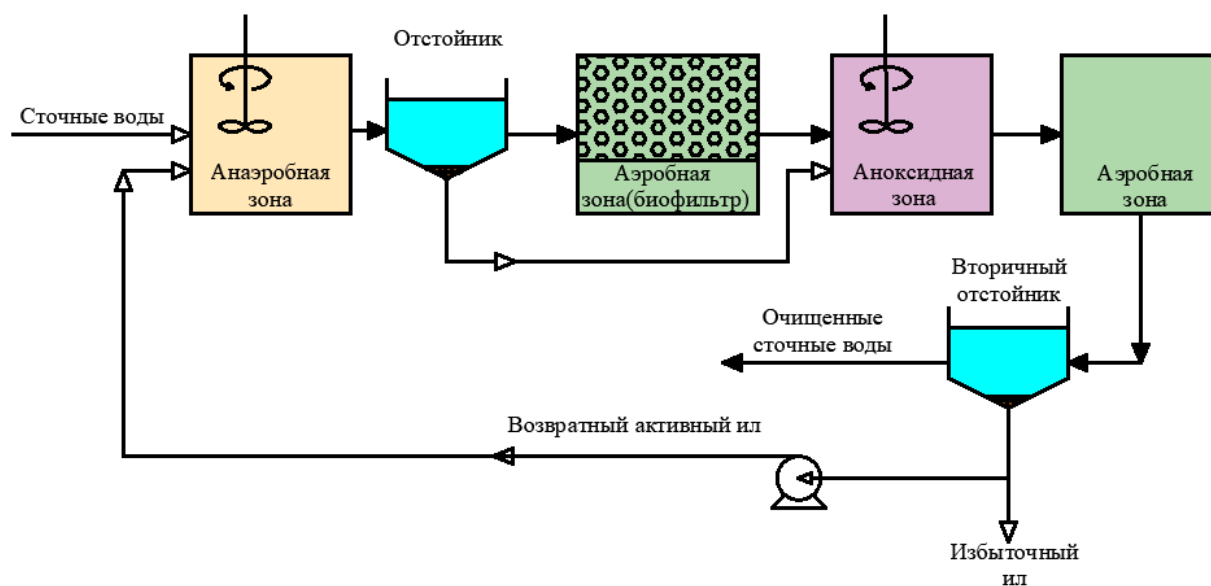


Рисунок 1.10 – Схема DEPHANOX-процесса

В этом реакторе происходит рост ФАО и сорбция (включая накопление) активным илом органических веществ. Активный ил, связавший часть органического вещества, отделяется в этом биореакторе и направляется в обход нитрификатора на аноксидный реактор. Жидкая фаза направляется на аэробный реактор с закрепленной биомассой для нитрификации, после чего объединяется с активным илом из отстойника в денитрификаторе (аноксидном реакторе). Последним реактором в схеме DEPHANOX является аэротенк со свободноплавающей биомассой, где происходят процессы накопления фосфора и аэробного потребления оставшегося органического вещества.

Декларируется способность процесса DEPHANOX снижать концентрацию фосфатов до 1 мг/л при ХПК/N порядка 4 и концентрации фосфатов в исходном стоке 4,5 мг/л [90]. При этом Йоханнесбургский процесс способен обеспечить концентрацию фосфора 2,7 мг/л.

Устройство вторичного отстойника после аэробного реактора негативно сказывается на иловом индексе и качестве илоразделения, что значительно снижает эффективность очистки в целом. Для решения этой проблемы, предложена схема M-DEPHANOX [91] (Рисунок 1.11).

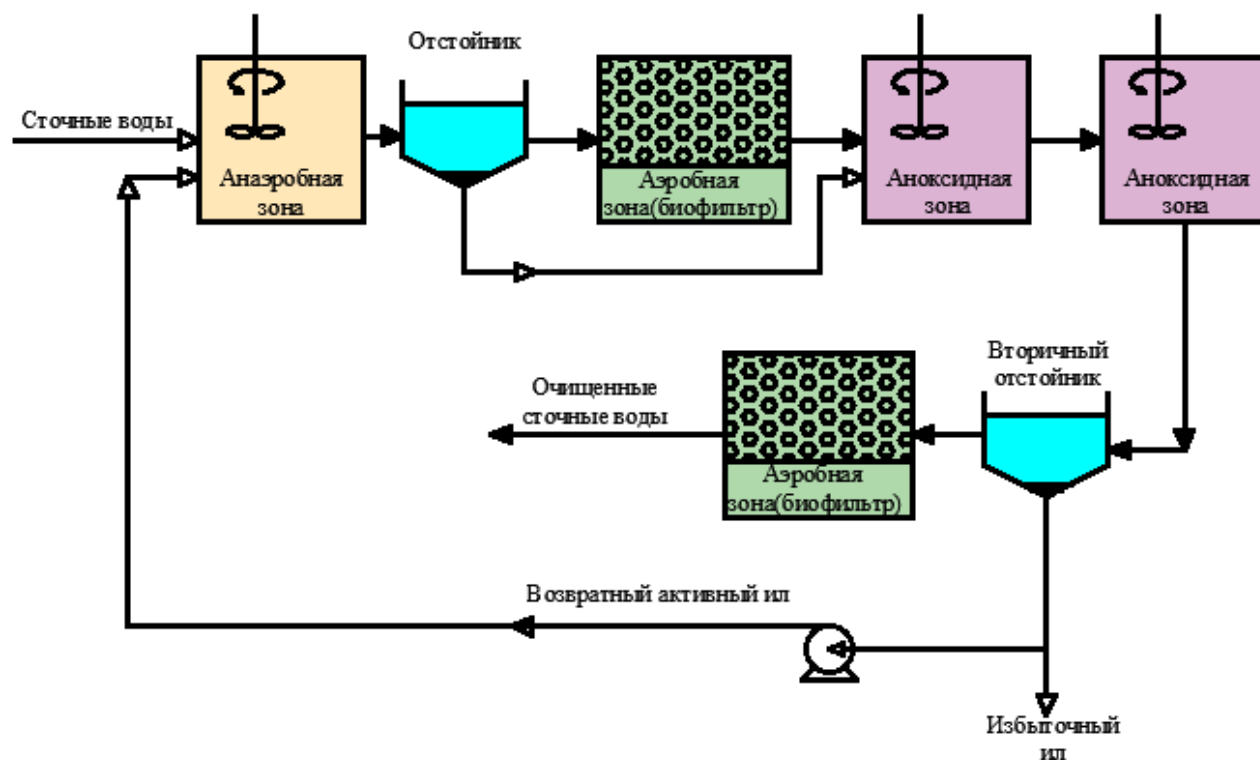


Рисунок 1.11 – Схема M-DEPHANOX-процесса

Отличие предложенной специалистами МГУП «Мосводоканал» схемы от классического процесса DEPHANOX заключается в наличии преднитрификатора и денитрификатора между аэробным нитрификатором и вторичным отстойником. Необходимость устройства предденитрификатора и его основная функция авторами не пояснена, и, иначе как использование его в качестве смесителя, на наш взгляд поясняться не может. После вторичного отстаивания, вода поступает на финальный биофильтр-нитрификатор, осуществляющий функции доокисления азота аммонийного с помощью прикрепленной биомассы.

Авторами декларирована высокая степень очистки по биогенным элементам (очистка по фосфору до 0,4 мг/л), однако время пребывания сточных вод $T_{оч}$ в таких системах, по нашим расчетам может превышать 30 часов при значительном количестве достаточно технологичных и дорогостоящих реакторов. Энергозатраты на аэрацию, за счет использования процессов денитрификации, могут быть снижены относительно других схем на величину порядка 20%, однако при этом увеличиваются затраты на перекачивание жидкости как для устройства рециклов,

так и на поддержание кипящего слоя в биофильтрах. Общее увеличение потребляемой мощности на перекачивание относительно схемы A^2/O может составлять до 40-50%. Кроме того, существуют сведения о недостаточной устойчивости данного сложного технологического процесса к колебаниям качества сточных вод [92].

1.2.1.7 Сравнительный анализ схем биологической очистки

Приведенный в подразделах 1.2.1.1-1.2.1.6 перечень схем не является исчерпывающим. Существует еще ряд технических решений, которые либо базируются на приведенных в данной работе, либо достаточно специфические по качеству исходного стока и аппаратному оформлению. К ним можно отнести PhoStrip [93], Renphosystem [92], VIP [94], ISAN [95], SBR и др. [92]. Часть из этих методов можно отнести к комбинированным – совместному биологи-химическому удалению фосфора.

Попытка качественного анализа существующих схем была выполнена Харьковской О.В. в [92], где достаточно подробно в критериях «низкая/средняя/высокая» рассмотрены чувствительности схем к колебаниям состава исходного стока, сложность схемы, потенциал качества очистки. Все рассмотренные выше процессы охарактеризованы высокой сложностью, средней либо высокой эффективностью и зависимостью от состава исходного стока [96].

Используя сформулированный в первой главе подход по оценке эффективности биологической очистки и выявленные выше основные параметры работы систем, можно предложить более конкретную характеристику процессов (Таблица 1.6).

В таблице 1.6 использованы следующие обозначения:

I_{OK} – удельный расход воздуха на окисление органического вещества 1 метра кубического поступающих сточных вод, m^3/m^3 ;

$S_{PEЦ}$ – кратность превышения рециркуляционных потоков над расходом исходного стока;

$Z_{\text{ПЕР}}$ – количество условных зон перемешивания.

Таблица 1.6 - Укрупненная характеристика схем биологической очистки сточных вод

Технологическая схема	ИПКО	$T_{\text{оч}}, \text{ч}$	$I_{\text{ОК}}$ $\text{м}^3/\text{м}^3$	$S_{\text{РЕЦ}}$	$Z_{\text{ПЕР}}$
Процесс Лудзака-Эттингера	20-30	15...24	22...42	1,5...2,8	1
Процесс A^2/O	15-20	16...25	22...42	1,2...3,5	2
Процесс Phoredox	14-20	18...28	26...55	2...6	2,5
Процессы УСТ и МУСТ	8-10	16...25	22...42	1,5...7	2
Йоханнесбургский процесс	9-12	17...26	22...42	1,5...7	3
Процесс DEPHANOX	7-10	30...35	18...34	1,0...5,0	3

Сложность в данном случае представляет оценка реального ИПКО систем. В таблице 1.6 ИПКО принят по результатам литературного обзора весьма укрупненно. Основной причиной этого является не только разнообразие исходного стока и особенности каждой станции очистки сточных вод, но и тип публикуемых результатов.

Под типом результатов подразумевается объект конкретного исследования: теоретическая модель, лабораторная модель, действующие сооружения (промышленные исследования).

Ряд публикуемых зарубежных исследований сводятся либо к исключительно модельным расчетам биологической очистки (сравнивая те или иные варианты, схемы, улучшения), либо, в лучшем случае, сопоставляются данные расчетов и лабораторных установок [76, 81, 87]. Оценки эффективности реально действующих станций публикуются гораздо реже [97], что объяснимо и понятно – таких полномасштабных исследований проводится гораздо меньше. В отечественной практике проявляются те же тенденции, однако пропорция все же больше в сторону

лабораторных и промышленных исследований [75, 83, 98]. Так, весьма показательна таблица расчетного и фактического качества очищенных сточных вод, приведенная А.А. Кулаковым [75] для процесса А²/О (Таблица 1.7.)

Таблица 1.7 - Проектный и фактический состав сточных вод (адаптировано [75])

Показатель	Фактическое значение, мг/л			Проектное, мг/л	
	ВХОД	после первичного отстойника	ВЫХОД	ВХОД	ВЫХОД
Взвешенные вещества	290	277	8	260	3
БПК ₅	153	123	4	240	2
N-NH ₄	---	36,3	1,3	32	0,39
N-NO ₂	---	---	0,31	---	0,02
N-NO ₃	---	---	10,7	---	9,1
P-PO ₄	---	6,6	3,4	6	0,2
Вклад в ИПКО		15,5		3,4	

Повышение ИПКО с проектных 3,4 (что соответствует сбросу в водоемы категории А) до 15,5 (не допустим сброс даже в водоемы категории В) говорит о крайне низкой эффективности работы технологии очистки сточных вод в реальных, промышленных условиях.

Наблюдаемое превышение по взвешенным веществам, с учетом высокого содержания фосфора в ФАО, наряду с фактическим высвобождением фосфора во вторичном отстойнике, часто является негативным фактором качества очистки сточных вод, в первую очередь, по фосфатам. Аналогичные расхождения в качестве очистки сточных вод наблюдаются достаточно широко в практике [7], [99-101].

Таким образом, причиной подобных явлений являются не только колебания качества исходных сточных вод, но и несовершенство системы вторичного

отстаивания – анаэробные условия вторичного отстаивания приводят к выделению фосфора в очищаемый сток [102].

Для выявления способов решения этой проблемы необходим критический анализ способов отделения возвратного ила от очищенного стока.

Состояние и эффективность работы действующих станций биологической очистки с удалением азота и фосфора по технологии БНДБХФ (с химическим удалением фосфора) приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 - Показатели действующих в РФ станций БНДХФ [7]

Технология	Проектная/ фактическая производительность, тыс.м ³ /сут	Реагент	Качество очистки мг/л	Примечание
1	2	3	4	5
A ² /O	80/48,5	Хлорное железо, 38,3 % по FeCl ₃ 11,0 кг кг/1000 м ³	ВВ 2,3 БПК ₅ 1,1 N-NH ₄ 0,3 N-NO ₃ 3,1 N-NO ₂ 0,02 N _{общ} 6 P-PO ₄ 0,65 P _{общ} 1,22	НДН близка к одновременной, доочистка на зернистых фильтрах
A ² /O	140/78	Хлорное железо, 38,3 % по FeCl ₃ 26,7,0 кг кг/1000 м ³	ВВ 4 БПК ₅ 2 N-NH ₄ 0,09 N-NO ₃ 4,8 N-NO ₂ 0,05 P-PO ₄ 0,12	НДН близка к одновременной, доочистка на зернистых фильтрах
УСТ	35/10,3	РАХ 9 % 32 кг/1000 м ³	N-NH ₄ 0,52 N-NO ₃ 10,8 N-NO ₂ 0,04 P-PO ₄ 0,33	общесплавная
УСТ	290/171	Алюминий сернокислый, концентрация 8,7% по Al, 30 кг/1000 м ³	ВВ 3,4 БПК ₅ 2,1 N-NH ₄ 0,5 N- NO ₃ 4,6 P-PO ₄ 0,074 N _{общ} 6,1	частично раздельная система водоотведения ХЕЛКОМ*

1	2	3	4	5
ЖНВ	28/16,5	Алюминий сернокислый, концентрация 8,7 % по Al 17,28 кг/тыс. м ³	ВВ 22,7 N-NH ₄ 0,5 N- NO ₃ 4,2 P-PO ₄ 0,09 N _{общ} 5,5 БПК ₅ 1,5	ХЕЛКОМ
ЖНВ	72/25,37	Алюминий сернокислый, концентрация 8,7 % по Al 25 кг/тыс. м ³	ВВ 3,29 N-NH ₄ 0,52 N- NO ₃ 3,23 P-PO ₄ 0,086 N _{общ} 4,41 БПК ₅ 2,37	ХЕЛКОМ
ЖНВ	71/45	Алюминий сернокислый, концентрация 8,7 % по Al 18 кг/тыс. м ³	ВВ 2,87 N-NH ₄ 0,26 N- NO ₃ 4,6 P-PO ₄ 0,056 N _{общ} 5,72 БПК ₅ 1,81	ХЕЛКОМ
УСТ	17,1/17	Алюминий сернокислый, концентрация 8,7 % по Al 9,66 кг/тыс. м ³	ВВ 2,5 N-NH ₄ 0,62 N- NO ₃ 4,49 P-PO ₄ 0,058 N _{общ} 6,0 БПК ₅ 3,2	ХЕЛКОМ

* - требования ХЕЛКОМ отличаются от ЦТП нормированием общего азота (до 10 мг/л) и общего фосфора (до 0,5 мг/л)

Как видно из таблицы 1.8, большинство станций биологической очистки с удалением азота и фосфора используют метод комбинированного биолого-химического удаления фосфора. Биологическими методами достичь высокой степени очистки по фосфору не удастся. Причиной этого является не только характеристики качественного состава исходных сточных вод, но и несовершенство системы вторичного отстаивания, так как анаэробные условия вторичного отстаивания приводят к выделению фосфора из отделяемого активного ила в очищенную воду [102].

1.2.2. Способы отделения возвратного ила

Наиболее распространенными процессами в практике отделения возвратного ила от очищенных сточных вод являются [103]: гравитационное осаждение, осветление во взвешенном слое осадка и фильтрация через различные элементы (от сетчатых до мембранных фильтров). Наибольшее распространение в мире получили аппараты, основанные на гравитационном процессе илоразделения [63], [69]. Для этого могут быть использованы различные аппараты (в данном случае – отстойники), которые дифференцируются, в основном, по направлению движения воды [7], что с точки зрения биологических процессов, особого значения не имеет.

1.2.2.1 Гравитационные методы

Сущность гравитационных методов илоразделения заключается в создании гидравлических условий для оседания и уплотнения активного ила после протекания всех процессов биологической очистки [104, 105].

Различные конструкции отстойников выполняют следующие основные функции:

1. Отделение активного ила от очищенных сточных вод. Непосредственная функция вторичных отстойников, которая зачастую обеспечивает качество очистки на уровне порядка 15 мг/л взвешенных веществ [106]. В контексте требований к качеству очистки, соответствующих НДТ [7], это весьма большие значения, которые для большинства водоемов сброса потребуют улучшения.
2. Функция уплотнения возвратного активного ила. Для минимизации величины рецикла, и, соответственно, снижения эксплуатационных затрат на рециркуляцию. Типичная схема распределения концентраций активного ила в отстойнике приведена на рисунке 1.12.
3. Крайне важной, функцией вторичного отстаивания является удержание некоторого “запаса” активного ила на случай колебания качества поступающих сточных вод [104]. По сути, эта способность емкостных сооружений

гравитационного отстаивания ила является основным преимуществом данного способа илоразделения.

С учетом процессов осаждения и сгущения активного ила, время его пребывания в анаэробных условиях может составлять до 6 часов [107], что сопоставимо с временем пребывания в аэробном биореакторе в схемах биологического удаления фосфора. Важным фактором является отсутствие либо крайний недостаток органического вещества на этой стадии очистки, что приостанавливает все биохимические процессы с потреблением субстрата.

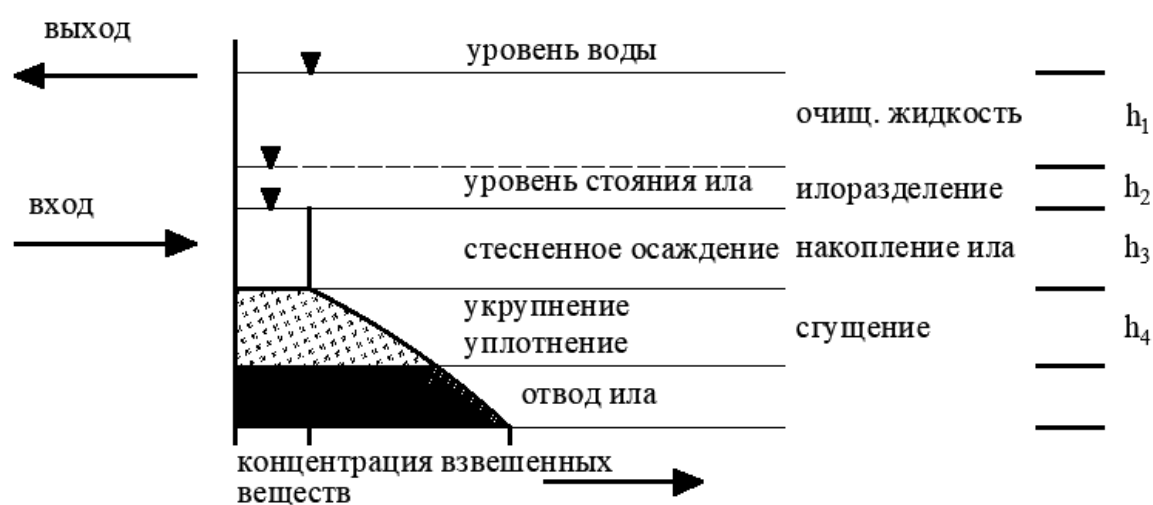


Рисунок 1.12 – Типовой профиль «глубина-концентрация» вторичного отстойника [104]

Не смотря на столь длительное время пребывания активного ила во вторичном отстойнике, детальные описания именно биохимических процессов в таких системах отсутствуют, и вышеприведенная гипотеза об ухудшении качества очистки по фосфору за счет процессов анаэробного лизиса ила вторичного отстойника нуждается в дополнительном теоретическом и практическом обосновании.

В работе [108] авторами, при исследовании редокс-потенциала при дефосфотации, было констатировано увеличение ортофосфатов после вторичного отстаивания относительно стоков, поступивших на илоразделение с 5,2 до 6,8 мг/л, что первоначально подтверждает выдвинутую гипотезу.

Близким процессом к явлению, предполагаемому в таких системах, является анаэробная стабилизация осадка, однако этот процесс характеризуется гораздо большими длительностями и протекающие за 6 часов процессы в анаэробном активном иле вторичного отстойника, на наш взгляд, стоит описывать с помощью известных зависимостей биологической очистки.

1.2.2.2 Мембранные методы илоразделения

Мембранное илоразделение в настоящее время является наиболее технологичным, но и наиболее затратным способом устройства вторичного разделения иловой смеси [106, 109]. Метод позволяет поддерживать высокие концентрации активного ила в биореакторах (в этих случаях, такие биореакторы получают обобщенное наименование МБР), стабильно высокий эффект илоразделения и высокую надежность в условиях изменения нагрузки.

В настоящее время мембранные технологии захватывают все большие области применения в биологической очистке – они используются совместно с очисткой активным илом, в схемах с биофильтрами [110], устраиваются как внутренние, так и внешние блоки мембран. Данные технологии позволяют достичь грануляции активного ила, что положительно сказывается на требуемых объемах сооружений и количестве зон биологической очистки [111].

В настоящее время мембранные биореакторы нашли широкое применение на территории РФ в области очистки промышленных сточных вод [112], однако об успешном полномасштабном внедрении технологии на крупных сооружениях очистки городских сточных вод в настоящее время не сообщается. На наш взгляд, причиной этого является высокая затратность технологии [106], совмещенная с описанными в первой главе общими тенденциями и проблемами отрасли.

В связи с вышеизложенным, мембранные технологии предлагается вынести «за скобки» НДТ и данного исследования, как безусловно эффективный и перспективный метод очистки сточных вод, но не доступный в настоящее время широкому кругу предприятий ВКХ.

1.2.2.3 Илоразделение во взвешенном слое.

Использование взвешенного слоя для илоразделения рационально в комбинированных сооружениях, где совмещается аэротенк и вторичный осветлитель [103]. Такие решения позволяют сократить суммарное время пребывания стока в очистке за счет интенсификации отделения активного ила, используя преимущества взвешенного слоя активного ила, что позволяет поддерживать более высокую концентрацию и возраст ила в сооружениях биологической очистки. Согласно справочнику ИТС [7], в настоящее время в Российской Федерации отсутствуют объекты, применяющие интенсификацию илоразделения методом взвешенного слоя.

В отечественной практике в 70-х годах разработан ряд различных аэротенков-осветлителей со взвешенным слоем ила [113-115] (Рисунок 1.13, 1.14). Данные конструкции не получили широкого распространения, однако они представили базис для дальнейшего развития концепции «аэротенков-осветлителей».

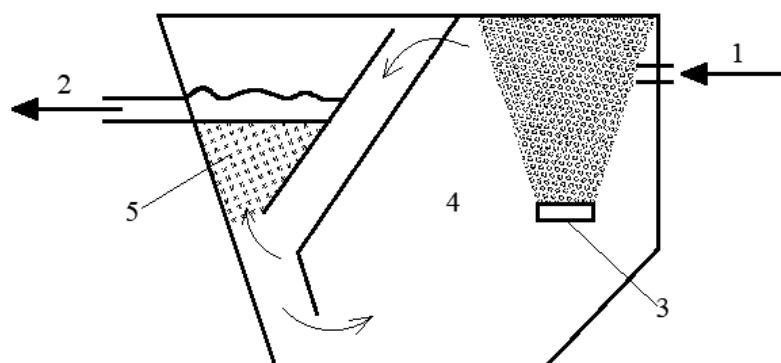


Рисунок 1.13 – Аэротенк-осветлитель БИО

1 – подача сточной жидкости; 2 – отвод очищенных стоков; 3 – аэраторы;
4 – зона аэрации; 5 – зона осветления.

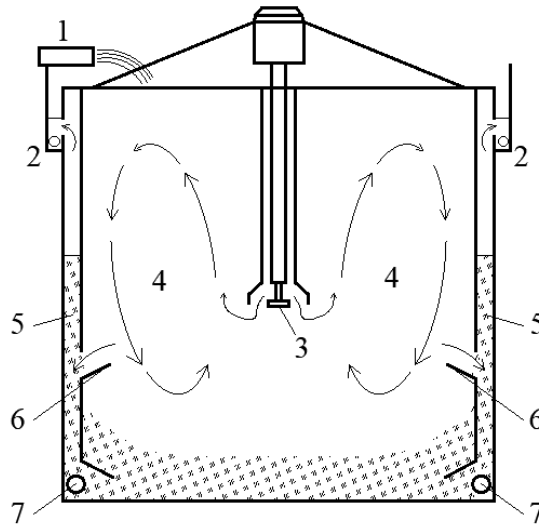


Рисунок 1.14 – Аэротенк-осветлитель МакИСИ

1 – подача сточной жидкости; 2 – отвод очищенных стоков; 3 – аэраторы;
4 – зона аэрации; 5 – зона осветления; 6 – окно иловой смеси; 7 – трубопровод удаления избытка ила.

Данные конструкции не получили широкого распространения из-за некоторых критичных недостатков: конструкция не предусматривала рециркуляцию иловой смеси из зоны осаждения в зону аэрации, из-за чего менялись седиментационные свойства ила и он был подвержен всплытию в зону отвода очищенной воды [103]. Это значительно снижало надежность работы сооружений.

В то же время были получены экспериментальные зависимости максимальной гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости от произведения aJ , где a – концентрация ила, г/л; J – иловый индекс, $\text{см}^3/\text{г}$ (Рисунок 1.15 [116]).

Следует признать, что в настоящее время, с учетом современных требований к протеканию биохимических процессов в системах с активным илом, приведенные данные могут быть не актуальны [117].

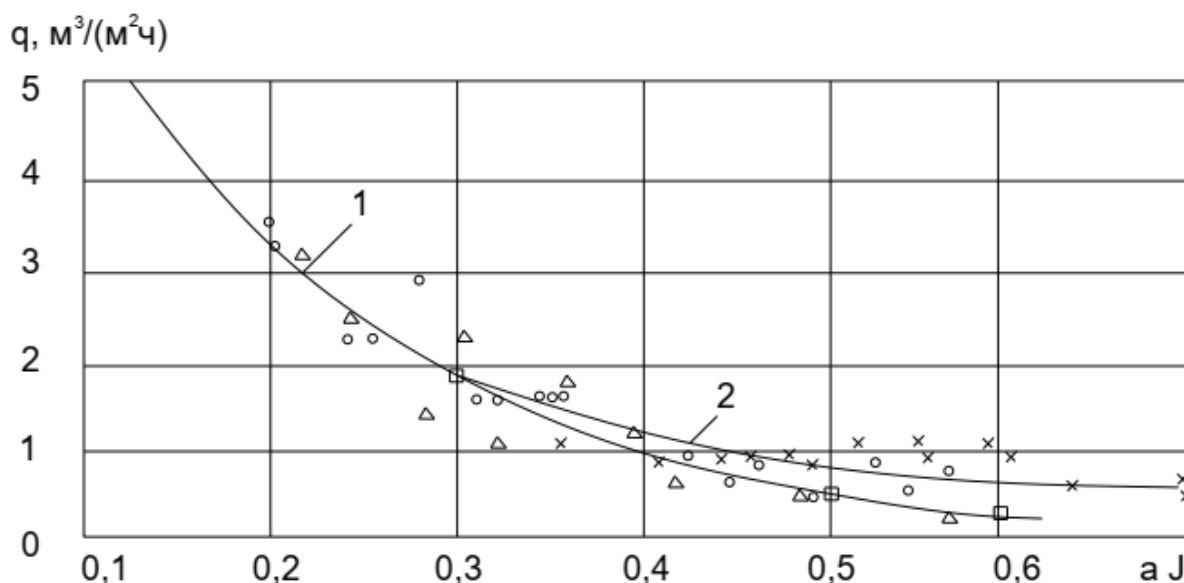


Рисунок 1.15 – Допустимая гидравлическая нагрузка на осветлитель

1 – лабораторные эмпирические данные; 2 – промышленные эмпирические данные.

В отечественной практике к вопросу илоразделения во взвешенном слое вернулись уже в конце 2000х годов, научной школой проф. Нездойминова В.И. [118-120]. Первоначально системы со взвешенным слоем ила успешно применялись и внедрялись в системах обработки осадка, где минерализованный ил с советующими седиментанционными свойствами весьма эффективно подвергался отделению. Эти сооружения стали прототипом эрлифтных биореакторов [121], основного элемента концепции БОСЭБ (биологической очистки с эрлифтными биореакторами), положения которой приведены в главе 3 данной работы.

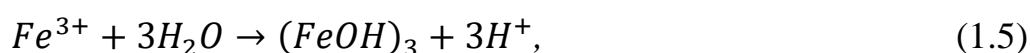
1.2.4. Способы повышения ИПКО биологически очищенных стоков

Биологическая очистка с илоразделением в поле сил тяжести, согласно приведенных выше положений, даже с использованием самых современных подходов к организации схем, не способна выполнить требования по ИПКО для сброса в водоемы категории А, Б [7]. Для достижения указанных показателей, наибольшее распространение, согласно данных приведенных в таблице 1.8, используется комбинированный способ биологической и химической очистки БНДБХФ [122, 123].

1.2.4.1 Комбинирование биологической и химической обработки.

Для повышения эффективности удаления соединений фосфора из сточных вод при биологической очистке используется химический метод с применением солей кальция, алюминия, железа, гидролизированных солей полиалюминия и полижелеза, синтетических органических полимеров. [124-126]. Вероятно, выпадение фосфора в осадок в виде струвита ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) [127-128], однако такой процесс не характерен для систем очистки сточных вод ввиду больших концентраций взвешенных веществ (мешающий фактор образования струвита) в реакторах, где есть достаточное количество азота аммонийного.

Фосфатное осаждение в практике очистки сточных вод включает в себя несколько стадий: преципитация, коагуляция, флокуляция и осаждение. [92, 129]. Скорости и стехиометрические параметры этих процессов во многом зависят от применяемого реагента (преципитанта). Наибольшее распространение в настоящее время получили соли железа (Fe^{2+} , Fe^{3+}) или алюминия (Al^{3+}). [130]. При введении в воду солей трехвалентного железа протекают следующие химические реакции:



Приведенные реакции подразумевают образование «мицелиев» гидратированного оксида железа с большой площадью поверхности и адсорбционной способностью, которые связывают фосфаты с образованием метал-гидроксид-фосфата [92, 131]. Данное соединение представляет из себя коллоид, постепенно агломерирующийся в частицы 10-50 мкм. В случае третичного отстаивания, для дополнительного укрупнения таких частиц необходимо введение флокулянта.

Аналогичные (1.4 – 1.6) процессы проходят при введении в сточную воду другого распространенного реагента – солей алюминия [127].

Химические реакции дают стехиометрические значения доз реагентов для удаления соединений фосфора. Теоретически, для удаления 1г фосфора фосфатов ($\text{PO}_4\text{-P}$) требуется 2,7г Fe^{3+} и 0,87г Al^{3+} [74].

Фактические дозы реагентов зависят в большой степени от места ввода реагента [132, 133]. По этому параметру системы комбинированного биолого-химического удаления фосфора подразделяются на 3 основных вида: пред-осаждение, одновременное осаждение и пост-осаждение. Вероятные места ввода реагента показаны на рисунке 1.16. Методы одновременного и пост-осаждения могут комбинироваться для увеличения качества очистки сточных вод по фосфору. В процессе пред-осаждения, реагент добавляется перед первичным отстаиванием. Образовавшиеся при этом агломераты соединений фосфора выводятся вместе с сырым осадком и воздействия на активный ил не оказывают. Такое решение ведет к увеличению количества сырого осадка. К положительным сторонам этого метода можно отнести возможность снижения негативного влияния колебаний качества исходного стока на процессы биологической очистки [130], к отрицательным – снижение БПК стока, подаваемого на биологическую очистку, что может негативно сказаться на процессе денитрификации. Кроме того, извлечение (восстановление) фосфора из сырого осадка в данном случае затруднено.

Одновременное осаждение подразумевает образование осадков соединений фосфора, отводимых совместно с избыточным активным илом. На рисунке 1.16 показаны возможные места введения реагентов: после первичного отстойника, в сооружения биологической очистки, в рецикл иловой смеси либо перед вторичным отстаиванием. Данный метод получил наибольшее распространение ввиду его простоты – отсутствие необходимости в сооружениях для смешения и осаждения, приемлемые дозы реагентов [92]. Однако имеются сведения о негативном воздействии вводимых реагентов на свойства и жизнедеятельность активного ила [127, 134, 135].

Пост-осаждение заключается в добавлении реагентов к очищенным стокам после вторичного илоразделения. В рамках реализации такого метода очистки, после вторичных отстойников требуется устройство дополнительных сооружений

как для смешения и реакции, так и для последующего отделения осадка. Для отделения осадка при этом используются методы третичного отстаивания и фильтрования [71].

Метод пост-осаждения исключает воздействие реагентов на свойства активного ила, характеризуется наиболее высокой эффективностью и допускает извлечение фосфора из осадка, что можно отнести положительным аспектам данной схемы.

Одним из основных показателей эффективности химического удаления фосфора является степень увеличения дозы относительно теоретического молярного значения β , которое для разных способов введения составляет [92]:

- для пред-осаждения $\beta = 2 \dots 3$;
- для одновременного осаждения $\beta = 1,2 \dots 1,5$;
- для пост-осаждения $\beta = 2 \dots 2,5$.

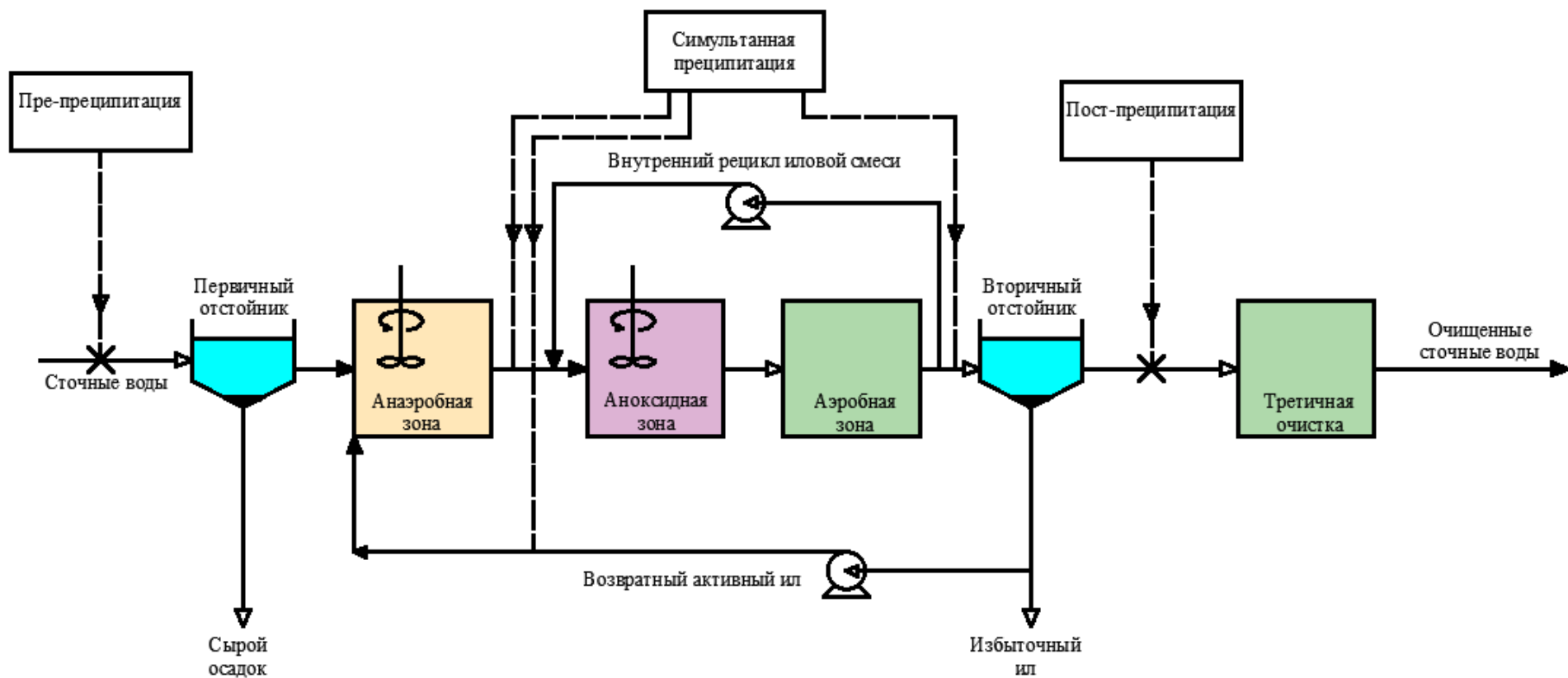


Рисунок 1.16 - Схема вариантов ввода реагентов при комбинированном удалении фосфора биолого-химическим методом.

Для совмещенного химико-биологического удаления фосфора, коэффициенты осаждения применяются к дозам, рассчитанным с учетом биологического накопления фосфора, что уменьшает расходы реагентов. [7]

Учитывая изложенные положения, а также данные первой главы по качественному составу исходных вод можно подытожить основные положения реагентного аспекта обработки сточных вод при удалении соединений азота и фосфора:

- пред-осаждение снижает БПК (ХПК) сточных вод, поступающих на очистку, что в условиях недостатка органического субстрата в исходных сточных водах (таблица 1.1) приведет недостаточной степени удаления нитратов;
- одновременное осаждение в условиях большого количества исходного фосфора ведет к повышенным дозировкам реагентов, что негативно скажется на биоценозе активного ила, внося корректировки в качество очистки по остальным компонентам. При небольших концентрациях фосфора, возможно введение солей железа либо алюминия в различные точки системы биологической очистки;
- пост-осаждение после комплекса биологического удаления фосфора является наиболее эффективным способом, позволяющим оптимизировать дозы реагентов и достичь наименьших остаточных концентраций. Однако, этот подход требует устройства третичных сооружений обработки очищенных сточных вод методами седиментации либо фильтрования [136].

Как отмечалось выше, степень очистки от взвешенных веществ гравитационными методами не может обеспечить высокие показатели очистки в целом по ИПКО. Концентрация взвешенных веществ 15 мг/л при отнесении к ЦТП (5 мг/л) уже дает вклад в суммарный ИПКО в 3 единицы. Учитывая, что во взвешенных веществах часть массы представлена биологически разлагаемым веществом - аналогичный вклад внесут и показатели БПК, ХПК. Таким образом, обусловленный только нерастворенными соединениями ИПКО будет составлять 9

единиц, что исключает возможность сброса в водоемы категории Б, где суммарный ИПКО всех технологически нормируемых величин требуется на уровне 7.

Отсюда следует, что для сброса очищенных сточных вод в водоемы категории Б при гравитационном вторичном илоразделении требуется устройство систем третичной доочистки. Данное заключение позволяет по-другому подойти к преимуществам и недостаткам пост-преципитации, ведь если устройство третичной очистки становится обязательным по другим требованиям - это уже нельзя приписать к недостаткам данного метода, и он может быть рекомендован в качестве базового в рамках концепции БОСЭБ.

1.2.4.2 Третичная очистка.

Для очистки вторичного стока (очищенных сточных вод после вторичного отстаивания) характерны несколько иные показатели загрязнений, нежели для других стадий илоразделения [104]. Это относится к таким показателям как электрокинетический поверхностный потенциал, удельный вес, форма частиц, что обуславливает несколько иной подход к очистке таких вод.

Примеси вторичного стока состоят из органических макромолекул, включая гуминовые вещества, белки, вирусы, бактерии, и водоросли [137]. Преобладающие гуминовые вещества – продукт биоразложения субстратов и продукты лизиса и растворения клеточных компонентов активного ила [138]. Математическое распределение размеров таких частиц определяется степенной функцией [139]:

$$\frac{dN}{d(d_p)} = A(d_p)^{-\beta}, \quad (1.7)$$

где N – количество частиц в интервале размера, шт;

d_p – средний размер частиц в заданном интервале, мкм;

A, β – эмпирические коэффициенты.

В практике анализа фракционного состава вторичного стока принято характеризовать этот показатель с помощью безразмерного коэффициента β [104], значения которого в целых числах приведены на рисунке 1.17.

При коэффициенте $\beta=3$ все частицы присутствуют в смеси в одинаковом количестве, при $\beta>3$ – мелкие частицы менее 1 мкм, а при $\beta<3$ – преобладают достаточно крупные частицы 10-1000 мкм.

Согласно литературным данным, низкие коэффициенты β (близко к 1) характеризуют сточные воды после совместной химико-биологической очистки в режиме одновременной преципитации [140], обычный сток биологической очистки от соединений азота и фосфора находится в пределах β 1,7...2,75 [141, 142].

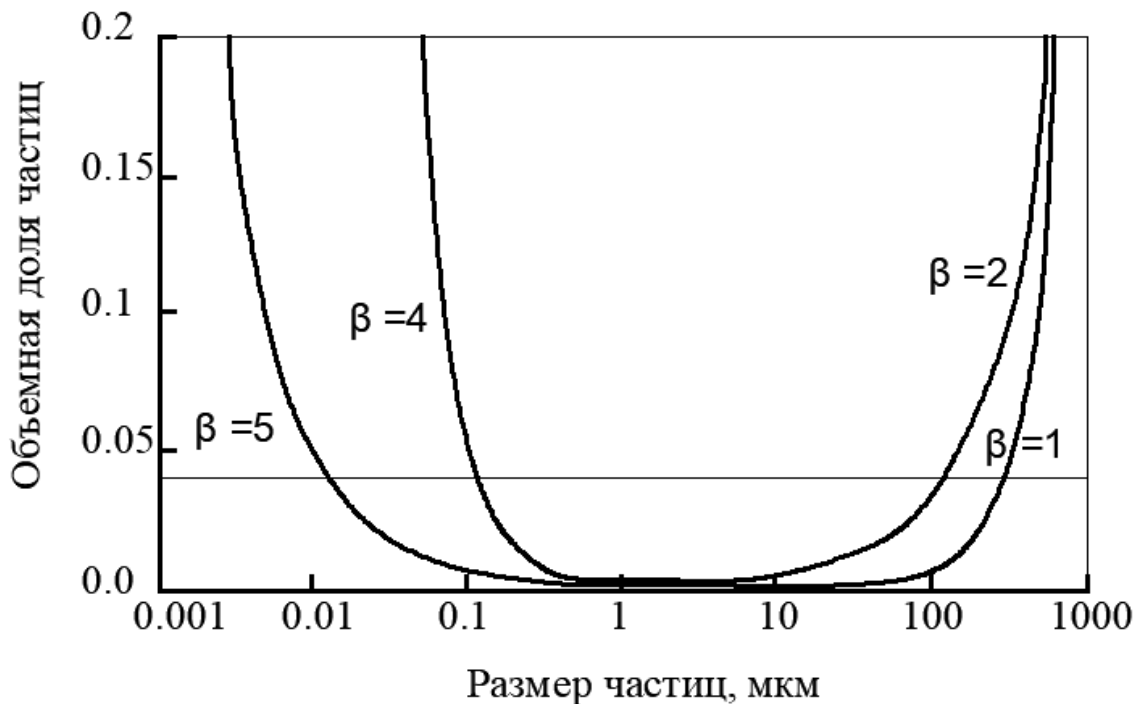


Рисунок 1.17. Объемная доля частиц определенного размера в зависимости от коэффициента β . (адаптировано и исправлено [104])

Эти данные позволяют предположить крупность частиц, поступающих на третичную обработку в пределах 10 мкм...1 мм со сдвигом фракционного распределения в сторону более крупных частиц. Согласно классификации по Кульскому, это преимущественно взвесь – примесь 1-й группы, частично 2-й (коллоиды), которая может быть отделена как гравитационным отстаиванием, так и фильтрованием. Данные примеси имеют отрицательный заряд (-10...-18 мВ) и плотность 1015-1034 кг/м³ [104].

Предложенный подход к фракционированию состава очищенного стока мы считаем предпочтительным над методом «количества частиц» [143], где речь идет о количестве частиц. Количество мелких частиц преобладает, однако их вклад в общее содержание взвешенных веществ при этом минимален.

В случае использования коагулянтов на основе железа либо алюминия, скорость оседания образовавшихся частиц зачастую находится в промежутке 0,6-0,9 м/ч. Для третичных же отстойников рекомендованные в расчеты скорости оседания составляют до 1 м/ч при коагуляции и до 2 м/ч при совместной коагуляции и флокуляции [104].

Согласно литературным данным [104, 144-146], третичная очистка в поле сил тяжести с применением коагулянтов и флокулянтов позволяет снизить концентрации фосфора в очищенных сточных водах до 0,5 мг/л. Для снижения фосфора до 0,2 мг/л требуется обустройство систем фильтрования.

В качестве сооружений третичной очистки в поле сил тяжести используются радиальные и вертикальные отстойники [147], (Рисунок 1.18).

Конструкция радиального отстойника весьма схожа с классическими сооружениями вторичного отстаивания. При реконструкции действующих сооружений биологической очистки, запроектированных по классической схеме, устройство систем со встроенным осветлителем позволит функционально освободить существующие вторичные отстойники, которые можно реконструировать в третичные с минимумом затрат, что может увеличить доступность НДТ для предприятий ВКХ. Аналогичным образом обстоят дела с предприятиями средней и малой производительности, которые оснащены либо могут оснащаться вертикальными отстойниками.

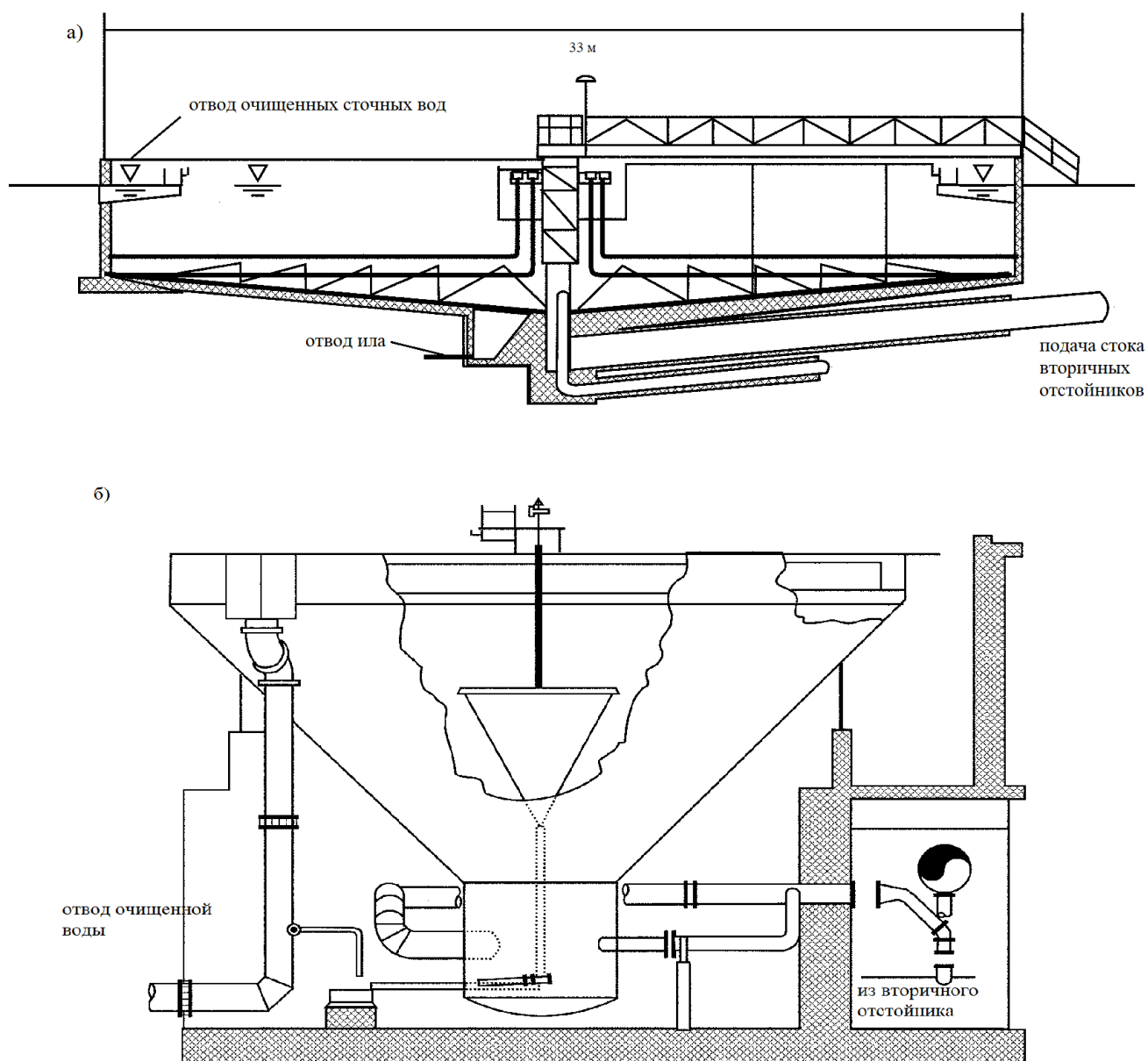


Рисунок 1.18. Конструкции отстойников, применяемых для третичной очистки [147]: а – радиальный отстойник; б – вертикальный отстойник.

1.2.4.3 Ацидофикация сырого осадка и отказ от первичного отстаивания.

Ацидофикация сырого осадка, как и отказ от первичного отстаивания могут быть применены в схемах биологической очистки сточных вод с удалением азота и фосфора с целью увеличения количества органического вещества, поступающего на биологическую очистку, а также увеличения количества ЛЖК (летучих жирных кислот, необходимых для культивирования ФАО) в анаэробном биореакторе схем биологической дефосфотации [92, 98]. При первичном отстаивании происходит снижение концентрации ЛЖК в стоке, поступающем на биологическую очистку.

Согласно данным [98], при содержании ЛЖК в исходных стоках 1,8...4,0 мг-экв/л, после первичного отстаивания их концентрация составляет 1,1...1,4 мг-экв/л, что можно охарактеризовать как значительное падение.

Исключение первичного отстаивания – достаточно привлекательный с экологической точки зрения метод интенсификации биологического удаления фосфора, поскольку при этом исключается образование сырого осадка достаточно высокого класса опасности [148]. Однако, при этом возникает ряд сложностей следующего характера:

1. Увеличивается прирост активного ила на 50-70%, что требует увеличения аэрируемых объемов аэротенков на близкие величины в процентном соотношении [104]. А это, соответственно, увеличение капитальных и эксплуатационных (аэрация) затрат на строительство и реконструкцию сооружений биологической очистки.
2. Соединения, обычно удаляемые в первичных отстойниках, зачастую относятся к трудноразлагаемым, со временем биологической переработки 1-2 сут. [148]. Из этого следует, что неизбежно, в случае отказа от первичного отстаивания, будет наблюдаться увеличение остаточных концентраций БПК и ХПК в очищенных сточных водах, что негативно скажется на общем ИПКО стока.

В целом, возможность применения данного метода интенсификации процессов существует для сооружений малой и средней производительности [149, 150] и нуждается в детальной комплексной оценке экологической, экономической и технологической эффективности.

Указанных недостатков лишен метод ацидофикации (преферментации) первичного осадка, где время ферментации может достигать 4-6 суток [148]. Сам процесс получения ЛЖК ацидофикацией начинается в канализационных сетях, где произвольно создаются благоприятные условия по наличию питательных веществ и температуре [151]. Благоприятные для ацидофикации температуры находятся в диапазоне 16-35°C [152], что затрудняет протекание этих процессов в зимнее время в северных широтах, поэтому процесс преферментации (согласно классическому решению [153]) запускают методом рецикла сырого осадка в первичных

отстойниках – так называемый “in-line” метод, где процессы сбраживания проводятся непосредственно в первичных отстойниках. Альтернативой ему является “side-stream” метод, когда часть осадка для ферментации выводится в отдельный реактор [154], что увеличивает эффективность процесса возможностью подогрева реактантов, однако увеличивает стоимость процесса за счет капитальных вложений.

Согласно исследованиям, эффективность производства ЛЖК выше на 50% у процессов с отдельным ферментером, чем в схемах с ацидофикацией в первичном отстойнике [155]. Объем ферментера при этом составляет порядка 15-20% от объема первичного отстойника.

Таким образом, можно резюмировать возможность применения методов ацидофикации для улучшения степени очистки по соединениям фосфора только при экономическом обосновании.

1.2.4.4 Организация процессов одновременной нитри-денитрификации

Сущность процессов одновременной нитри-денитрификации заключается в гипотезе, что в зависимости от диффузии кислорода внутри хлопьев активного ила могут образовываться две зоны — аэробная во внешнем слое и бескислородная в сердцевине хлопьев [156, 157]. В аэробной зоне нитрифицирующие бактерии, такие как АОВ и НОВ используют кислород в качестве акцептора электронов для нитрификации. Гетеротрофные бактерии также потребляют кислород и органический углерод для роста. В бескислородной зоне денитрифицирующие гетеротрофные бактерии используют $\text{NO}_2\text{-N}$ или $\text{NO}_3\text{-N}$, образующийся в аэробной зоне, и органический углерод, диффундирующий из основной массы жидкости для денитрификации [157, 158].

Существуют данные о совмещении процессов одновременной нитри-денитрификации и биологического удаления фосфора [159-161], однако эта технология имеет ряд ограничений, делающих ее не актуальной в рамках целей данных исследований [161].

Процессы одновременной нитри-денитрификации могут быть эффективно организованы в биореакторах с затопленной эрлифтной системой аэрации (gas-loop reactors) [157, 162-164]. Особенности применения такого типа аэрации будут рассмотрены в данной работе ниже.

1.3. Биохимические процессы биологической очистки

Биохимические процессы в системах с активным илом можно разделить по условиям протекания относительно растворенного кислорода и по способу питания осуществляющих их микроорганизмов [13], [165-168]. Общая схема основных процессов приведена на рисунке 1.19.

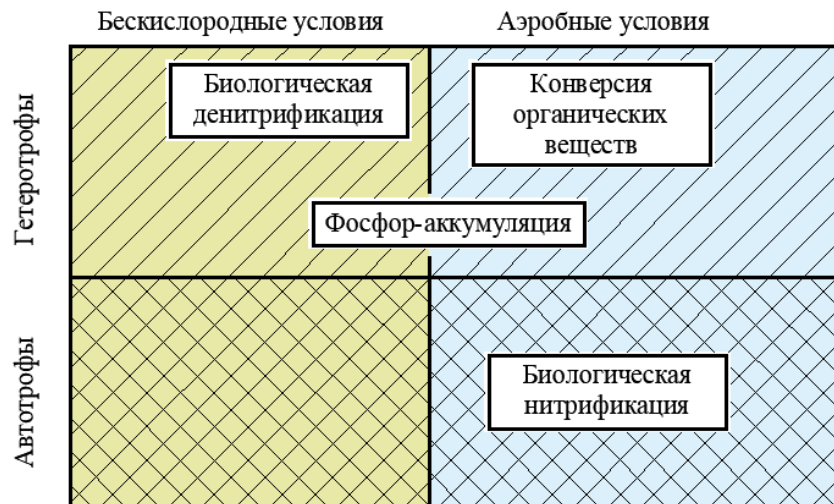


Рисунок 1.19 – Общая схема биохимических процессов очистки сточных вод.

Автотрофные микроорганизмы обеспечивают протекание процессов нитрификации в аэробных условиях, все остальные процессы биологической очистки выполняются гетеротрофными микроорганизмами.

1.3.1 Аэробное гетеротрофное разложение органики

Гетеротрофные микроорганизмы, выполняющие функции гетеротрофного разложения органического вещества, в зарубежной практике получили

обозначение “ОНО” (англ. “ordinary heterotrophic organisms” – обычные гетеротрофные организмы) [13, 169].

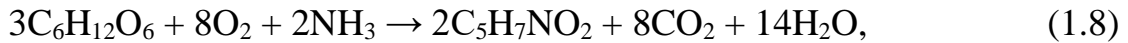
Микроорганизмы ОНО удаляют органические вещества, присутствующие в сточных водах, для производства собственной биомассы, используя кислород для дыхания. С метаболической точки зрения процесс удаления включает анаболический (для синтеза клеток) и катаболический процессы (для генерации энергии, необходимой для синтеза клеток). В анаболическом процессе ОНО получают необходимый углерод для роста клеток из органического вещества, присутствующего в сточных водах. Между тем, в катаболическом процессе происходит окислительно-восстановительная реакция, включающая перенос электронов из органического вещества (которое действует как донор электронов) в кислород (акцептор электронов), генерируя необходимую энергию для синтеза клеток. Однако из-за довольно изменчивой смеси биоразлагаемых и небиоразлагаемых органических соединений, присутствующих в сточных водах, для оценки их общей концентрации обычно используется показатель ХПК. Это происходит главным образом потому, что использование ХПК является предпочтительным по сравнению с другими аналитическими параметрами, такими как биохимическая потребность в кислороде: БПК₅ или общий органический углерод) из-за нескольких преимуществ.

К ним относятся [13]:

- определение кислородного эквивалента (или способности отдавать электроны) органических соединений;
- более детальное и полное определение органической емкости, позволяющее измерить всю разлагаемую и неразлагаемую органику;
- вероятность того, что баланс органики при расчете будет соблюден на основе ХПК (как следствие двух предыдущих преимуществ);
- быстрый анализ (т. е. несколько часов вместо 5 дней, необходимых для БПК₅).

Точного стехиометрического уравнения биологического окисления органики не существует, однако, следующее уравнение для аэробного потребления глюкозы ($C_6H_{12}O_6$) (которое пренебрегает большинством питательных веществ, кроме азота)

может быть использовано для иллюстрации процесса биологической аэробной конверсии [66]:



где $C_5H_7NO_2$ — упрощенное выражение приращенной биомассы, образующейся при аэробном разложении органики [159].

С точки зрения роста микроорганизмов, около $\frac{2}{3}$ биоразлагаемой органики преобразуется в новую биомассу посредством анаболизма и оставшихся $\frac{1}{3}$ окисляется с помощью кислорода по катаболическим путям для генерирования энергии, необходимой для роста биомассы [170]. Аэробная стехиометрическая истинная продуктивность Y_{OHO} составляет $\sim 0,67$ г ХПК-биомассы на 1г потребленного органического ХПК. Кроме того, для синтеза клеток и роста микроорганизмов необходимы макроэлементы (такие как азот и фосфор) и микроэлементы (такие как калий, натрий, кальций, магний, цинк, марганец и железо и др.) [66]. Отсутствие какого-либо из этих элементов может привести к ограничению протекания микробных процессов. Предполагается, что потребность в азоте и фосфоре для производства биомассы составляет приблизительно 0,10 гN/г беззольного вещества и 0,03 гP/г беззольного вещества соответственно [171]. Это означает, что если сточные воды содержат биоразлагаемые органические вещества в выражении ХПК 100 мгO₂/л, то концентрации азота и фосфора, которые необходимо подавать, должны быть не ниже 4,7 мгNH₄-N/л и 1,4 мг PO₄-P/л соответственно для удовлетворения потребностей в питательных веществах. Фактические значения продуктивности активного ила колеблются в достаточно широком пределе, в зависимости от типа субстрата, возраста активного ила [159]. С практической точки зрения и во избежание ограничений в отношении питательных веществ из-за различных возможных Y_{OHO} , обычно рекомендуется соотношение ХПК:N:P = 100:5:1 [66].

Не все органические вещества, присутствующие в сточных водах, могут подвергаться окислению. В потоке сточных вод могут быть идентифицированы по меньшей мере четыре различные органические фракции с различными

физическими характеристиками и степенью биоразлагаемости, которые определяют их степень удаления в системе очистки сточных вод [171]:

- биоразлагаемые растворимые органические вещества, быстро преобразуемые ОНО (и, таким образом, известные как легко биоразлагаемые органические вещества, $RBCOD$ или S_B в соответствии со стандартизированным обозначением [172]);
- нерастворенные биоразлагаемые органические вещества, которые подвергаются гидролизу перед биоокислением активным илом и поэтому обычно характеризуются как медленно биоразлагаемые органические вещества ($SBCOD$ или X_{C_B} в соответствии с [172]);
- не растворенные и небiorазлагаемые органические вещества, которые в основном попадают в состав ила и накапливаются в системе активного ила;
- неразлагаемые микроорганизмами растворимые органические вещества, которые не смешиваются и не разлагаются, остаются в растворимой фазе.

S_B может быть быстро использован ОНО. Хотя биологическое разрушение $SBCOD$ происходит медленно, при возрасте ила, обычно применяемом в большинстве технологий с активным илом (более 3-4 сут.), $SBCOD$ практически полностью используются. Таким образом, ОНО используют $RBCOD$ и $SBCOD$ для синтеза клеток, производя больше биомассы. Новая биомасса ОНО, полученная в результате удаления и преобразования $RBCOD$ и $SBCOD$, а также накопления не биоразлагаемых органических частиц, становится частью массы органического активного ила в реакторе. Благодаря способности флокуляции активного ила материал твердых частиц относительно хорошо осаждается, поэтому он может быть эффективно удален при вторичном илоразделении, обеспечивая очищенную и осветленную сточную воду. Масса ила, которая оседает во вторичном отстойнике, возвращается в биологический реактор и, в конечном итоге, удаляется с избыточным активным илом, что является одной из основных характеристик станций очистки. Однако, поскольку не биоразлагаемые растворимые органические вещества не могут быть эффективно удалены в системе с активным

илом - они покидают систему через стоки, внося свой вклад в концентрацию ХПК очищенных сточных вод.

В дополнение к аэробному удалению органических веществ в системах с активным илом, большая часть органического вещества будет удалена на анаэробной и аноксидной стадиях, которая предшествует аэробной стадии.

Как видно, удаление органического вещества из сточных вод может происходить в различных условиях среды и различными группами микроорганизмов, что характерно для всех стадий биологической очистки.

1.3.2 Биологическое удаление соединений азота

Для удаления соединений азота при биологической очистке могут быть применены различные биологические процессы и их комбинации с учетом относительных метаболических путей [159]. Характеристики поступающих сточных вод с точки зрения отношения ХПК / N будут служить руководством при определении наиболее подходящих биологических процессов для удаления азота. Можно выделить три диапазона отношения ХПК/N притока:

1. Для высоких значений притока ХПК/ N (> 20 гХПК/гN) обычно достаточно азота или ассимиляции азота гетеротрофными бактериями (обычные гетеротрофные организмы: $X_{\text{ОНО}}$) для синтеза биомассы во время удаления ХПК (органического вещества) для достижения необходимой концентрации азота в сточных водах.
2. Для соотношений входящего ХПК/N, составляющих от 5 до 20 г ХПК/гN, можно применять комбинацию ассимиляции азота для роста микроорганизмов и применения традиционных процессов нитрификации и гетеротрофной денитрификации.
3. Для соотношений ХПК/N менее 5 г ХПК/гN обычные процессы нитрификации и гетеротрофной денитрификации едва ли могут достичь удовлетворительных уровней удаления азота. В частности, процесс гетеротрофной денитрификации будет ограничен недостатком органического вещества, и необходимо

дополнительно дозировать дополнительный источник углерода. Таким образом, нетрадиционные процессы удаления азота, выполняемые через так называемый «нитритный маршрут», более подходят для удаления азота из-за их более низких (или даже отсутствующих) требований к ХПК.

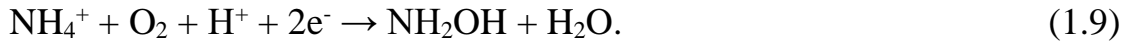
Несмотря на различные технологии и процессы удаления N, практически во всех из них аммоний сначала (полностью или частично) окисляется до нитрита (нитрирование) или до нитрата (нитрификация), а затем окисленная форма азота восстанавливается до газообразного азота, который выбрасывается в атмосферу в результате процессов денитрификации (от нитрата до N₂), денитризации (от нитрита до N₂) или анаммокс (от нитрита и аммония до N₂).

Эффективность удаления азота в биологических процессах зависит от адекватного баланса между активностями различных микробных групп. В этой связи выполнение периодических тестов активности (раздел 3) для оценки и определения стехиометрических и кинетических скоростей этих процессов представляет собой полезный инструмент для мониторинга и контроля процессов удаления азота.

Нитрификация. Благодаря выделению *Nitrosomonas europaea* и *Nitrobacter* установлено, что производство нитрата в результате окисления аммония фактически было разделено на два отдельных микробиологических процесса, выполняемых двумя филогенетически независимыми группами хемолитоавтотрофных аэробных бактерии: аммоний-окисляющие организмы (X_{AOO}), продуцирующие нитрит, и нитрит-окисляющие организмы (X_{NOO}), продуцирующие нитрат.

Окисление аммония в основном осуществляется хемолитоавтотрофными аммоний-окисляющими бактериями, которые используют аммоний в качестве источника энергии и азота и неорганический углерод в качестве источника углерода.

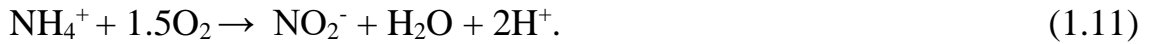
На уровне микробного процесса окисление аммония до нитрита протекает через образование гидроксиламина (NH₂OH) в качестве промежуточного соединения через фермент аммониймонооксигеназу (АМО):



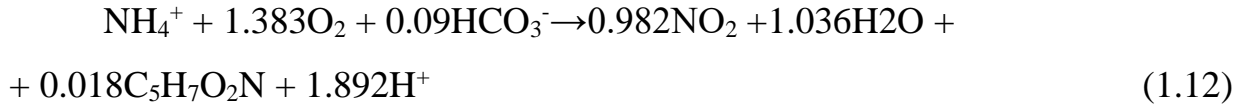
Затем гидроксилламин далее окисляется до нитрита с помощью фермента гидроксилламинооксидоредуктазы (НАО):



Комбинация двух окислительно-восстановительных процессов известна как нитрирование:



Это уравнение представляет собой уравнение катаболической макрохимической реакции процесса нитрирования. Когда также рассматривается анаболизм, то уравнение метаболической (катаболизм плюс анаболизм) макрохимической реакции представляют в виде:

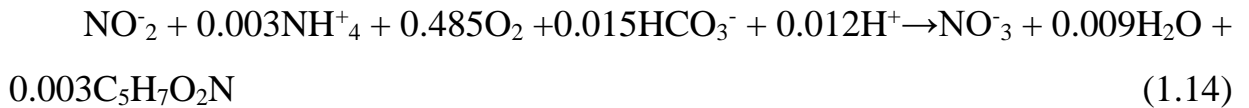


Как показано в приведенном выше уравнении, около 2 молей водорода образуется на моль окисленного аммония. Карбонатная система, как правило, представляет собой рН-буфер, доступный в сточных водах, который нейтрализует выработку водорода путем смещения углекислотного равновесия. Когда карбонатный буфер, обычно измеряемый по щелочности как эквиваленты карбоната кальция (CaCO_3 , мг-экв/л), отсутствует или недостаточен в сточных водах (например, в некоторых городских сточных водах, щелочность ниже, чем 100 мг/л CaCO_3 или 2 мг-экв/л), тогда рН может упасть ниже рН 7,0 [171].

На второй стадии процесса нитрификации, также известного как процесс нитратации, нитрит окисляется до нитрата с помощью X_{NOO} в присутствии фермента нитрит оксидоредуктазы (Nir):

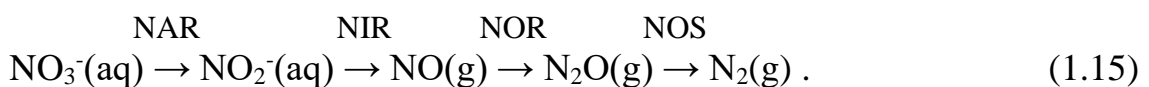


X_{NOO} представляют собой аэробные хемолитоавтотрофные бактерии, использующие для синтеза неорганический углерод в качестве источника углерода (например, HCO_3^-) и аммоний в качестве источника азота. При включении роста бактерий в вышеприведенное уравнение получается следующее уравнение метаболической макрохимической реакции:



В схемах БОСЭБ процессы нитрификации проходят в эрлифтном биореакторе, преимущественно в зоне насыщения кислородом.

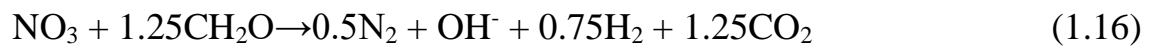
Денитрификация. Процесс биологического восстановления азота до газообразного N_2 . В природе не только бактерии, но также эукариоты и археи могут размножаться на энергии, получаемой при окислении органических или неорганических субстратов в сочетании с восстановлением нитратов до нитритов, NO , N_2O и, наконец, газообразного азота (N_2) [173, 174]. Также было показано, что некоторые микроорганизмы, способные выполнять гетеротрофную нитрификацию, способны проводить денитрификацию в аэробных и анаэробных условиях, так называемую аэробную денитрификацию [175]. Денитрификация также может протекать без N_2O в качестве промежуточного соединения, как при денитрификации с использованием метана в качестве донора электронов [176]. Также сообщалось о денитрификации на нитрификаторе, где $X_{\text{АОО}}$ восстанавливает нитрит до N_2O [177]. В отличие от других микроорганизмов в азотном цикле (например, $X_{\text{АОО}}$, $X_{\text{НОО}}$, апамтох), некоторые обычные гетеротрофные организмы ($X_{\text{ОНО}}$) являются факультативными денитрификаторами, которые преимущественно используют кислород в качестве акцептора электронов из-за более высокого выхода энергии и переключаются на денитрификацию только при низком содержании кислорода в присутствии нитратов или нитритов [178]. Независимо от используемого донора электронов, общий биохимический путь денитрификации включает одни и те же ферменты на каждой из этих стадий восстановления от нитрата до газообразного азота: нитратредуктаза (NAR), нитритредуктаза (NIR), окись азота редуктаза (NOR) и закись азота редуктаза (NOS):



Если денитрифицирующие микроорганизмы не выделяют все ферменты для полной цепи денитрификации, то могут выделяться промежуточные соединения

NO и N₂O, которые оба оказывают негативное воздействие на окружающую среду из-за их токсичности и прямого или косвенного вклада в парниковый эффект.

В системах очистки сточных вод биологическое удаление азота в основном осуществляется ОНО с использованием органических веществ в качестве донора электронов. Когда органических веществ, присутствующих в сточных водах, недостаточно для достижения полной денитрификации, обычно дозируются внешние доноры электронов (например, уксусная кислота или метанол). Из-за его распространенности в применениях сточных вод, в данной работе рассматривается только денитрификация, катализируемая X_{ОНО} (гетеротрофной денитрификацией), которая происходит по следующей общей катаболической схеме:



Это уравнение показывает, что гетеротрофная денитрификация подщелачивает окружающую среду из-за образования гидроксид-ионов. ОНО можно использовать как нитрат, так и нитрит в качестве акцептора электронов. Процесс восстановления нитрата до газообразного азота называется денитрификацией, а процесс восстановления нитрита до газообразного азота называется денитризацией [159].

Кроме приведенных процессов, в некоторых специфических условиях, могут протекать процессы окисления аммония с восстановлением нитрита (Anammox процесс) [179, 180]. В практике внедрения этого способа очистки, в основном обрабатываются стоки из анаэробных метантенков, а также различные богатые аммонием муниципальные и промышленные сточные воды: дубление кожи, пищевая промышленность и полупроводниковая, ферментная, дрожжевая, дистилляционная и винодельческая отрасли [159].

1.3.3 Усовершенствованное биологическое удаление фосфора

Усовершенствованное биологическое удаление фосфора (УБУФ) выполняется фосфор аккумулирующими организмами (ФАО) [181, 182] за счет внутриклеточного накопления полифосфатов (поли-Р). При этом возможно

удаление большего количества фосфора (0,35-0,38 гР/г беззольного вещества ФАО), чем обычными гетеротрофными микроорганизмами ОНО (0,03 гР/г беззольного вещества ОНО) [183]. Научные, микробиологические и инженерные характеристики процесса УБУФ были в центре исследований, проведенных в последние несколько десятилетий различными исследовательскими группами [182, 184-188].

ФАО являются гетеротрофными организмами. Однако, в отличие от ОНО, ФАО имеют уникальную способность использования внутриклеточно запасенного поли-Р для производства необходимой энергии (аденозинтрифосфата, АТФ) в анаэробных условиях для накопления легко биоразлагаемых органических веществ (RBCOD), таких как: летучие жирные кислоты (ЛЖК), ацетат и пропионат, внутриклеточные поли-β- гидроксиканоаты (ПГА). Запасенные ПГА позже используются в бескислородных или аэробных условиях для улучшения поглощения фосфора, синтеза гликогена, роста и поддержания биомассы. Эта особенность дает ФАО конкурентное преимущество перед другими популяциями микроорганизмов. Таким образом, ФАО могут быть культивированы для достижения УБУФ путем рециркуляции активного ила в результате чередования анаэробных и аноксидных либо аэробных стадий, в то время как поступающие на очистку стоки обычно богаты летучими жирными кислотами, необходимыми на анаэробном этапе. Схематическое изображение метаболизма ФАО показано на рисунке 1.20 [159].

На анаэробной стадии ФАО содержат легко биоразлагаемые органические вещества внутриклеточно, присутствующие в сыром осадке или осветленных сточных водах (чаще всего ЛЖК), в качестве ПГА используются два других внутриклеточно, накопленных полимера, которые принимают участие в вышеупомянутом метаболизме: поли-Р и гликоген (полисахарид глюкозы).

Поли-Р гидролизуются и используются ФАО для обеспечения необходимой энергии (в виде АТФ), для транспортировки и хранения ЛЖК в качестве ПГА [184], в то время как гликоген используется для обеспечения необходимой окислительной

способности для преобразования ЛЖК в ПГА, а также для обеспечения дополнительной необходимой энергии.

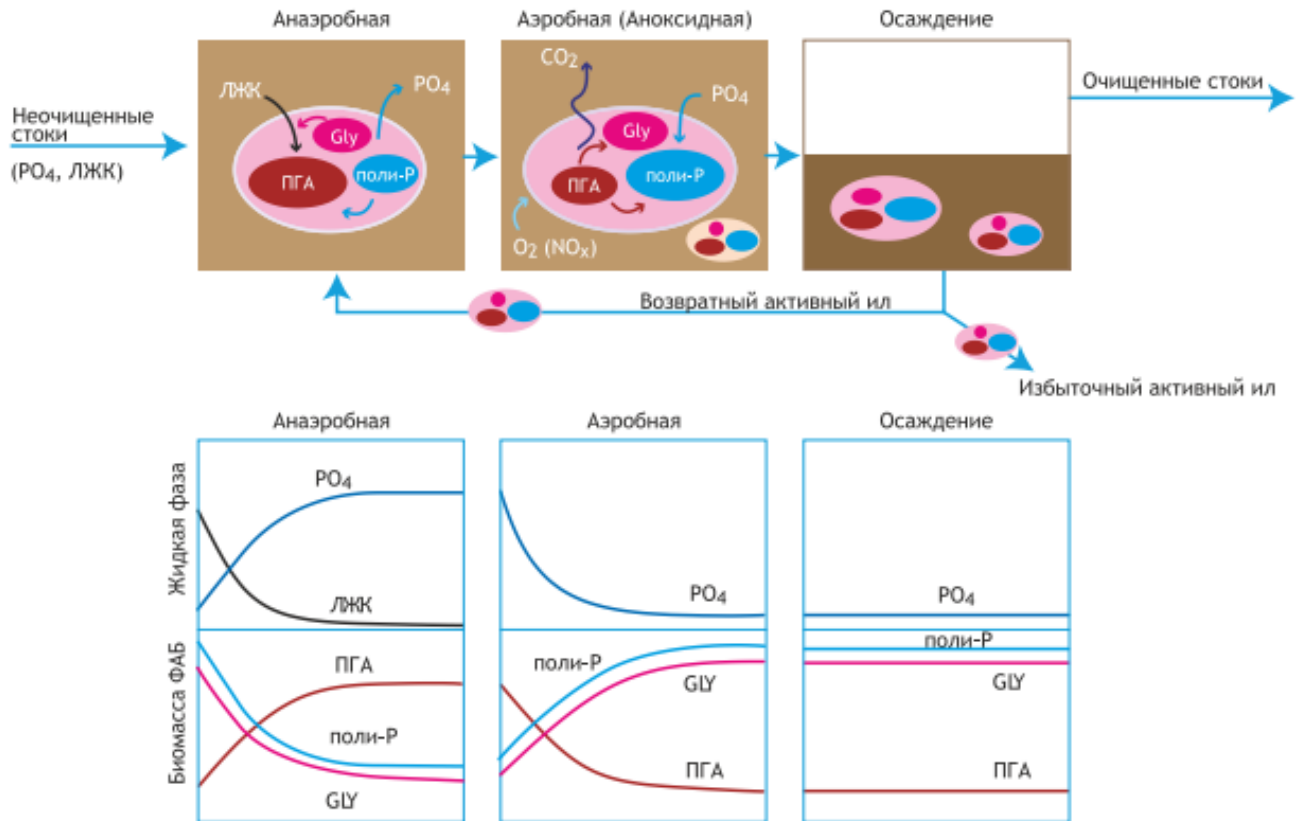


Рисунок 1.20 - Принципиальная схема метаболизма ФАО

Таким образом, анаэробное поглощение ЛЖК ФАО приводит к накоплению ПГА и одновременному гидролизу поли-Р и гликогена. Самыми распространенными полиоксиданканоатами, хранящимися в ФАО, являются поли- β -гидроксибутират, полигидроксивалерат и поли- β -гидрокси-2-метилвалерат. Их наличие и количество зависит от состава ЛЖК – ацетат или пропионат. Когда ацетат является преобладающей ЛЖК в среде, ФАО накапливают в основном поли- β -гидроксибутират (до 90% хранимых ПГА) [186], но когда пропионат является доминирующей ЛЖК, то ПГА существуют в основном как полигидроксивалерат и поли- β -гидрокси-2-метилвалерат [187].

В дополнение к поглощению ЛЖК, анаэробный гидролиз поли-Р и гликогена также обеспечивает необходимую энергию ФАО для их жизнедеятельности в анаэробных условиях без потребления углерода. Следовательно, гидролиз поли-Р приводит к высвобождению ортофосфатов (PO_4) в жидкую среду, что отражается в

увеличении концентрации ортофосфата в жидкой фазе во время анаэробной стадии (рисунок 1.20). В дополнение к потреблению ЛЖК, присутствующих в поступающих сточных водах на очистку активным илом, ФАО могут также хранить ЛЖК, генерируемые ферментативными организмами в анаэробной стадии из сбрасываемых органических веществ, присутствующих поступающих сточных водах. Как только ФАО достигают аэробной стадии, они расходуют ПГА, накопленные в анаэробной фазе как источник углерода и энергии, используя кислород в качестве акцептора электронов; энергия в этой реакции используется, чтобы изъять и усвоить большее количество PO_4 , чем ранее высвобождено в анаэробной стадии. Это приводит к аэробному поглощению и удалению фосфора из жидкой фазы. На аэробном этапе ПГА также используются для пополнения внутриклеточного запаса гликогена, поддержания роста биомассы и жизнедеятельности ФАО. Абсолютное удаление P из сточных вод достигается путем удаления избыточного активного ила в конце аэробной фазы, когда ил содержит высокую концентрацию поли-P. Как альтернатива существуют денитрифицирующие фосфор аккумулирующие организмы (ДФАО), которые также могут поглощать PO_4 в бескислородных условиях, используя нитрат или нитрит в качестве акцепторов электронов ([189-193]). Кроме того, ФАО, будучи гетеротрофными организмами, способны поглощать органический углерод в аэробных условиях, высвобождая ортофосфат при доступности углерода и извлекая PO_4 впоследствии [193,194]. Тем не менее, в конечном итоге ФАО может проиграть конкуренцию с ОНО из-за адаптации их метаболизма к стабильно аэробным условиям [195,196].

Количественный рост гликоген аккумулирующих организмов (ГАО) наблюдался в системах УБУФ при определенных условиях (например, когда ацетат или пропионат присутствуют в качестве единственного источника углерода, когда температура превышает $20^{\circ}C$, при pH ниже 7,0 или при концентрации растворенного кислорода выше 2 мг/л) [197]. ГАО имеет, метаболизм, похожий на метаболизм ФАО, но они полагаются исключительно на свои внутриклеточно хранящиеся запасы гликогена как источника энергии и восстановительных

эквивалентов, что запускает процесс анаэробного накопления ЛЖК в виде ПГА без какого-либо участия поли-Р. Их присутствие часто ассоциируется с недостаточным функционированием УБУФ, потому что они не участвуют в удалении фосфора, но конкурируют с ФАО за субстрат в анаэробных условиях, что приводит к ухудшению функционирования системы УБУФ [198, 199]. По этой причине ГАО является нежелательной популяцией.

Также следует отметить, что согласно классическому подходу (Рисунок 1.20), во вторичных отстойниках биологические процессы приостанавливаются. Это допущение, как было отмечено выше, весьма спорно и приводит к неверной оценке эффективности очистки в системах УБУФ.

1.4. Способы математического описания биохимических процессов

Для математического описания и расчета процессов биологической в настоящее время практикуется ряд методов, которые можно условно разделить на 2 группы: последовательные расчеты и моделирование процессов [200-202].

Методы последовательных расчетов заложены в ряд нормативов, действующих в европейских, североамериканских странах [63, 203-205], ряд отечественных разработок также базируются на способе последовательного расчета сооружений [83, 206, 207].

Данные методы основаны на определении максимальной нагрузки на активный ил, определении минимального возраста ила на основе эмпирических зависимостей. Такие подходы имеют достаточно частный характер и могут быть использованы для предварительных расчетов [98].

Более современным подходом, используемым в области научных исследований, является моделирование биохимических процессов [98, 168, 208, 209].

Моделирование подразумевает описание процессов биологической очистки сточных вод с помощью биохимических зависимостей (уравнения Моно) [13] с составлением и решением системы дифференциальных уравнений. В 80х годах

Международная водная ассоциация предложила один из наиболее распространенных в настоящее время подходов – ASM (Activated Sludge Model) [210].

Матричное выражение описанных функций позволяет систематизировать достаточно сложные биохимические преобразования для визуализации и упрощения понимания проходящих процессов [211].

Наибольшее распространение в настоящее время получили модели ASM2d [212,213] и ASM3+Bio-P [214, 215], которые описывают процессы органического разложения органического вещества ординарными микроорганизмами, нитрификации и денитрификации, улучшенного удаления фосфора. Процессы Annapтох, окисление через нитрит в этих системах не рассмотрены.

Количество биохимических уравнений в системе соответствует количеству рассматриваемых процессов. Биохимические процессы в ASM2d и ASM3+Bio-P представлены в таблице 1.9 [216].

Таблица 1.9 - Биохимические процессы ASM2d, ASM3.

№	Процесс	№	Процесс
1	2	3	4
1	Аэробный гидролиз органического вещества	1	Гидролиз
2	Аноксидный гидролиз органического вещества	2	Аэробное накопление X_{STO}
3	Анаэробный гидролиз органического вещества	3	Аноксидное накопление X_{STO}
4	Аэробный рост на органическом веществе (S_F)	4	Аэробный рост X_H
5	Аэробный рост на ацетате (S_A)	5	Аноксидный рост (денитрификация)
6	Аноксидный рост на органическом веществе (S_F)	6	Аэробное эндогенное дыхание гетеротрофов X_H
7	Аноксидный рост на ацетате (S_A)	7	Аноксидное эндогенное дыхание гетеротрофов X_H
8	Ферментация органического вещества в ацетат	8	Аэробное дыхание X_{STO}
9	Лизис ординарных организмов	9	Аноксидное дыхание X_{STO}
10	Накопление ПГА	10	Рост автотрофов X_{AUT} (нитрификация)
11	Аэробное накопление полифосфатов X_{PP}	11	Аэробное эндогенное дыхание автотрофов X_{AUT}
12	Аноксидное накопление полифосфатов X_{PP}	12	Аноксидное эндогенное дыхание автотрофов X_{AUT}
13	Аэробный рост ФАО X_{PAO}	P01	Накопление ПГА X_{PHA}
14	Аноксидный рост ФАО X_{PAO}	P02	Аэробное накопление полифосфатов X_{PP}

1	2	3	4
15	Лизис ФАО $X_{РАО}$	P03	Аноксидное накопление полифосфатов X_{PP}
16	Лизис полифосфатов X_{PP}	P04	Аэробный рост ФАО $X_{РАО}$
17	Лизис ПГА $X_{РНА}$	P05	Аноксидный рост ФАО $X_{РАО}$
18	Аэробный рост автотрофов $X_{АУТ}$	P06	Аэробное эндогенное дыхание ФАО $X_{РАО}$
19	Лизис автотрофов $X_{АУТ}$	P07	Аноксидное эндогенное дыхание ФАО $X_{РАО}$
20	Преципитация фосфатов	P08	Аэробное разложение полифосфатов X_{PP}
21	Растворение фосфатов	P09	Аноксидное разложение полифосфатов X_{PP}
		P10	Аэробное дыхание ПГА $X_{РНА}$
		P11	Аноксидное дыхание ПГА $X_{РНА}$

В результате приведенных процессов происходит взаимное преобразование компонентов системы. Для ASM2d и ASM3+Bio-P набор компонентов различается и приведен в таблице 1.10.

В ASM2d можно выделить наличие отдельного компонента ЛЖК (ацетата), чего нет в ASM3+Bio-P, и соответствующих процессов, связанных с ферментацией органического вещества до ацетата, ростом микроорганизмов за счет ЛЖК. Кроме того, в ASM2d приведены компоненты и процессы преципитации/растворения соединений фосфора, что могло бы быть полезно при одновременной преципитации. Однако компонента металла (железа/алюминия) в системе нет, что снижает значимость этих процессов в модели.

Таблица 1.10 - Компоненты систем ASM2d и ASM3+Bio-P.

Растворенные компоненты		
1	2	3
ASM2d	ASM3+Bio-P	Наименование
S_{O2}	S_O	растворенный кислород
S_F	S_S	легкоокисляемая растворенная органика
S_A	----	ЛЖК (ацетат)
S_{NH4}	S_{NH4}	азот аммонийный
S_{NO3}	S_{NO}	азот нитратов и нитритов
S_{N2}	S_{N2}	свободный азот
S_{PO4}	S_{PO4}	ортофосфаты
S_{ALK}	S_{HCO}	щелочность
S_I	S_I	инертная растворенная органика
Нерастворенные компоненты		
X_I	X_I	инертная нерастворенная органика
X_S	X_S	биоразлагаемая нерастворенная органика

1	2	3
X_H	X_H	гетеротрофная биомасса
---	X_{STO}	накопленный внутриклеточный продукт
X_{PAO}	X_{PAO}	биомасса ФАО
X_{PP}	X_{PP}	полифосфаты
X_{PHA}	X_{PHA}	ПГА
X_{AUT}	X_{AUT}	автотрофная биомасса
X_{TSS}	X_{TSS}	взвешенные вещества
X_{MeOH}	---	Металл-гидроксидные соединения
X_{MeP}	---	Металл-фосфатные соединения

Стехиометрические матрицы процессов приведены в Приложении А.

Особый интерес в контексте прогнозирования качества очищенных сточных вод без культивирования ФАО представляет стехиометрический коэффициент содержания фосфатов в нерастворенном органическом субстрате X_s . В моделях, не учитывающих культивацию ФАО (ASM1, ASM3), этот параметр в расчет не принимается, однако, исходя из незначительных величин сброса избыточного активного ила, может наблюдаться повышение фосфатов на выходе относительно фосфатов на входе в очистные сооружения. Так, согласно стехиометрии ASM2d, содержание S_{PO4} в нерастворенном субстрате X_s равно 0, в то же время, в модели ASM3+Bio-P это значение уже составляет 0,005. При биологическом разложении $100 \text{ г/м}^3 X_s$, будет наблюдаться высвобождение $0,5 \text{ г/м}^3 P-PO_4$, что уже представляет из себя величину ЦТП по фосфору фосфатов, что необходимо учитывать в расчетах.

Динамика изменения концентрации каждого компонента описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = \sum STK_{i,j} \cdot V_j, \quad (1.17)$$

где dc – элементарное приращение концентрации компонента, мг/л;

dt – дифференциал времени, сут.;

$STK_{i,j}$ – стехиометрический коэффициент для i -того компонента в j -той реакции;

V_j – скорость j -той реакции, $\text{г}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$.

Кинетические характеристики биохимических процессов приведены в приложении Б.

Таким образом, количество уравнений в системе будет соответствовать количеству компонентов, в единицах концентрации. Для ASM2d это 19 уравнений, а для ASM3+Bio-P – 17 уравнений.

Значение стехиометрического коэффициента STK может быть как положительным, так и отрицательным, что говорит о продуцировании или расходовании компонента в данном процессе.

Приведенные в кинетические зависимости достаточно громоздки, аналитическое написание уравнений 1.17 представляет из себя достаточно сложную зависимость, что оправдывает применение матричной формы написания ASM.

Данные зависимости положены в основу ряда специализированных компьютерных программ для расчета систем биологической очистки. Наиболее известные программы: ЭкоСим, GPS-X (компания «Hydromantis»), Biowin (компания «EnviroSim»), Stoa, West и др. [112], [217].

Основным недостатком данных моделей является отсутствие разделения окисленных форм азота на нитрат и нитрит, что затрудняет их применение при имитационном моделировании в отечественной практике очистки сточных вод.

1.5. Выводы по первой главе.

1. Действующие на территории РФ нормативы сброса очищенных сточных вод в водоемы являются компромиссом между экологической эффективностью и технико-экономическими возможностями имеющихся наилучших доступных технологий.

2. На основании действующих подходов к оценке эффективности работы станций биологической очистки, для предварительного анализа различных технологий можно использовать критерии: ИПКО (безразм.), время пребывания сточной жидкости в процессе очистки $T_{оч}$ (ч), удельный расход воздуха на очистку и перемешивание $I_{ок}$, m^3/m^3 , кратность превышения рециркуляционных потоков

над расходом исходного стока $S_{РЕЦ}$ и количество условных зон механического перемешивания $Z_{ПЕР}$.

3. Требования к современным станциям очистки сточных вод, включают в себя аспекты качества очистки, надежности, управляемости и экологической безопасности данного вида деятельности.

4. В настоящее время актуальна разработка новых технологических решений, снижающих капиталоёмкость перехода на наилучшие доступные технологии для станций малой и средней производительности (до 10.000 м³/сут).

5. Существующие схемы биологического удаления органических загрязнений и биогенных элементов (азота и фосфора) из сточных вод не всегда обеспечивают требуемое качество очистки. Причиной отклонений от расчетных значений часто является несовершенство вторичного илоразделения с выделением в очищенную воду вторичных загрязнений, а также неучтенное содержание фосфатов в нерастворенном органическом веществе.

6. Распространенные в мировой практике математические модели биологической очистки сточных вод не подразумевают разделения окисленных форм азота на нитрат и нитрит, а также содержание фосфора в биоразлагаемом субстрате (для моделей без культивирования ФАО), что затрудняет их применение при имитационном моделировании.

Глава 2.

ЗАДАЧИ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Задачи исследований

На основании критического анализа существующего положения, методов и аспектов биологической очистки сточных вод, сформирована цель данной работы – повышение эффективности удаления органических соединений и биогенных элементов из сточных вод средних и малых населенных пунктов путем оптимизации комплекса биологических и гидравлических процессов очистки, включая создание новых типов биореакторов и методов управления процессами.

Под новым типом биореакторов в озвученной цели понимаются сооружения с затопленной эрлифтной системой аэрации и встроенным илоотделением (Рисунок 2.1) – эрлифтные биореакторы. В рамках гипотез данной работы, в этих сооружениях протекают процессы одновременной нитри-денитрификации и илоотделение в самообновляющемся взвешенном слое активного ила. Эти сооружения относятся к аэротенкам-смесителям, что соответствует диапазону производительности до 10.000 м³/сут (станции очистки сточных вод малой и средней производительности).

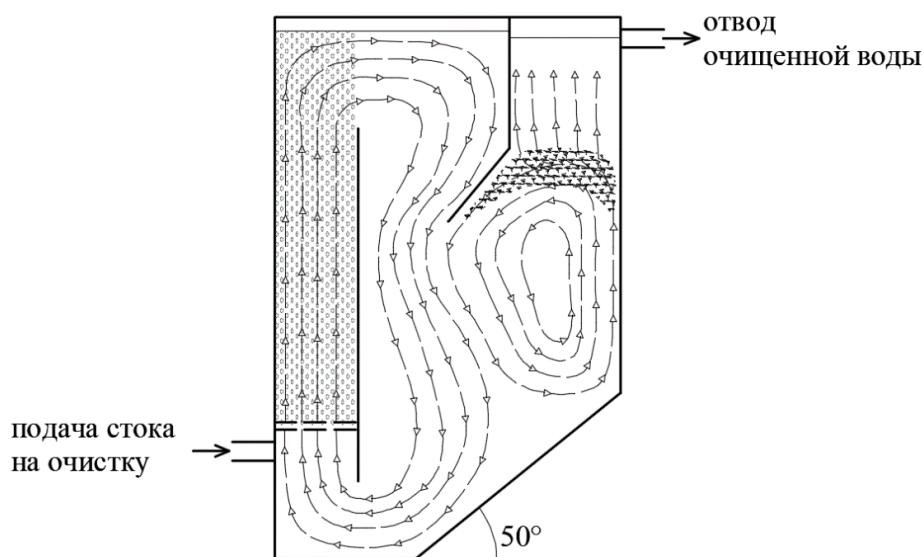


Рисунок 2.1 - Схема эрлифтного биореактора

До настоящего времени данные сооружения были исследованы недостаточно, а именно: отсутствуют данные о коэффициентах использования кислорода в затопленной эрлифтной системе аэрации; не обоснованы критерии существования самообновляющегося взвешенного слоя; отсутствуют сведения об эффективности удаления окисленных форм азота и фосфора в условиях одновременной нитри-денитрификации в этих сооружениях.

В связи с указанными гипотезами и сформулированными научными проблемами, задачами данной работы являются:

- усовершенствование схем биологической очистки сточных вод населенных пунктов от органических загрязнений и биогенных элементов путем включения в их состав эрлифтных биореакторов с одновременной нитри-денитрификацией и встроенным илоотделением;
- математическое описание гидродинамических параметров работы эрлифтных биореакторов: установление зависимостей скоростей в характерных точках сооружения от интенсивности аэрации, гидравлической нагрузки на осветлитель;
- исследование эффективности использования кислорода воздуха, подаваемого в затопленную эрлифтную систему аэрации, в зависимости от степени диспергирования воздуха, интенсивности аэрации и размеров сооружения;
- разработка и обоснование расчетной математической модели биологической очистки активным илом, которая учитывает диффузионные ограничения при одновременной нитри-денитрификации, преобразование форм азота и фосфора;
- выполнение опытно-промышленных и натурных исследований систем с эрлифтными биореакторами для определения параметров биологической очистки сточных вод;
- разработка рекомендаций на проектирование систем биологической очистки в сооружениях с одновременной нитри-денитрификацией и встроенным илоотделением для различного состава сточных вод и производительности сооружений очистки;

- оценка экономической эффективности предложенных схем биологической очистки для реконструируемых и вновь строящихся сооружений.

2.2. Методология научных исследований

В работе применены теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относится имитационное моделирование. Моделирование реализовано в программной среде CellDesigner разработки The Systems Biology Institute, Токио, Япония. Обработка данных производилась с помощью программного комплекса DataFit 9.1.32, производства Oakdale Engineering, Окдэл, США.

Экспериментальные исследования выполнены в лабораторных, полупромышленных, опытно-промышленных и в натуральных условиях работы эрлифтных биореакторов. Выполнялись инструментальные измерения (расход воздуха, жидкости, растворенный кислород, pH и др.) и химические анализы по известным действующим методикам. Применены современные экспериментальные методы очистки сточных вод (тесты активности ила, тесты на седиментацию, микроскопия).

2.2.1 Условия проведения лабораторных исследований

Лабораторные исследования степени использования кислорода при затопленной эрлифтной аэрации проведены на модели эрлифтного биореактора, выполненного из прозрачного оргстекла. 3D-модель установки и фото приведены на рисунке 2.2, схема установки приведена на рисунке 2.3. Исследования проводились на водопроводной воде с устройством мелкопузырчатой затопленной эрлифтной аэрации.

В первой серии экспериментов определялась скорость всплытия пузырька в зависимости от интенсивности эрлифтной аэрации способом сверхзамедленной съемки с помощью камеры Sony IMX555 с частотой 960 кадров/с. После этого

изображения просматривались в видеоредакторе с фиксацией временных отрезков и пройденного пузырьком пути. Скрин видеоредактора в режиме измерения МРС-НС (Microsoft) приведен на рисунке 2.4.



Рисунок 2.2 – 3D-модель и фото лабораторной установки по исследованию степени использования кислорода в эрлифтном биореакторе.

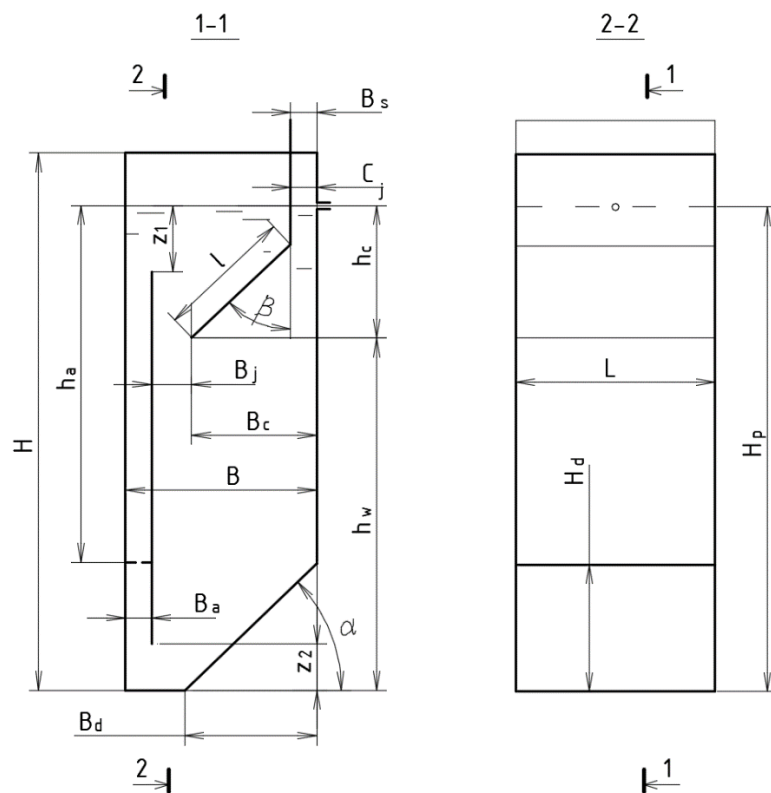


Рисунок 2.3 - Схема лабораторной модели эрлифтного биореактора.

Обозначения на рисунке 2.3:

H – рабочая глубина сооружения,
0,814м;

z_1 – глубина погружения верхней
кромки затопленного эрлифта, 0,1м;

B_a – ширина зоны аэрации, 0,038м;

B_s – ширина защитной зоны
осветлителя, 0,07м;

B_c – ширина зоны осветления,
0,288м;

L – длина биореактора, 0,302м;

B_j – ширина зазора между
эрлифтной перегородкой и
козырьком осветлителя, 0,06м;

α – угол наклона скоса днища, 50°;

h_a – глубина погружения аэраторов,
0,5м;

z_2 – глубина погружения верхней
кромки затопленного эрлифта, 0,14м;

B – ширина биореактора, 0,288м;

h_c – глубина защитной зоны
осветлителя, 0,3м;

H_p – рабочая глубина биореактора,
0,74м;

β – угол наклона козырька осветлителя
50°;

h_w – расстояние между нижним краем
козырька осветлителя и дном
сооружения, 0,44м.

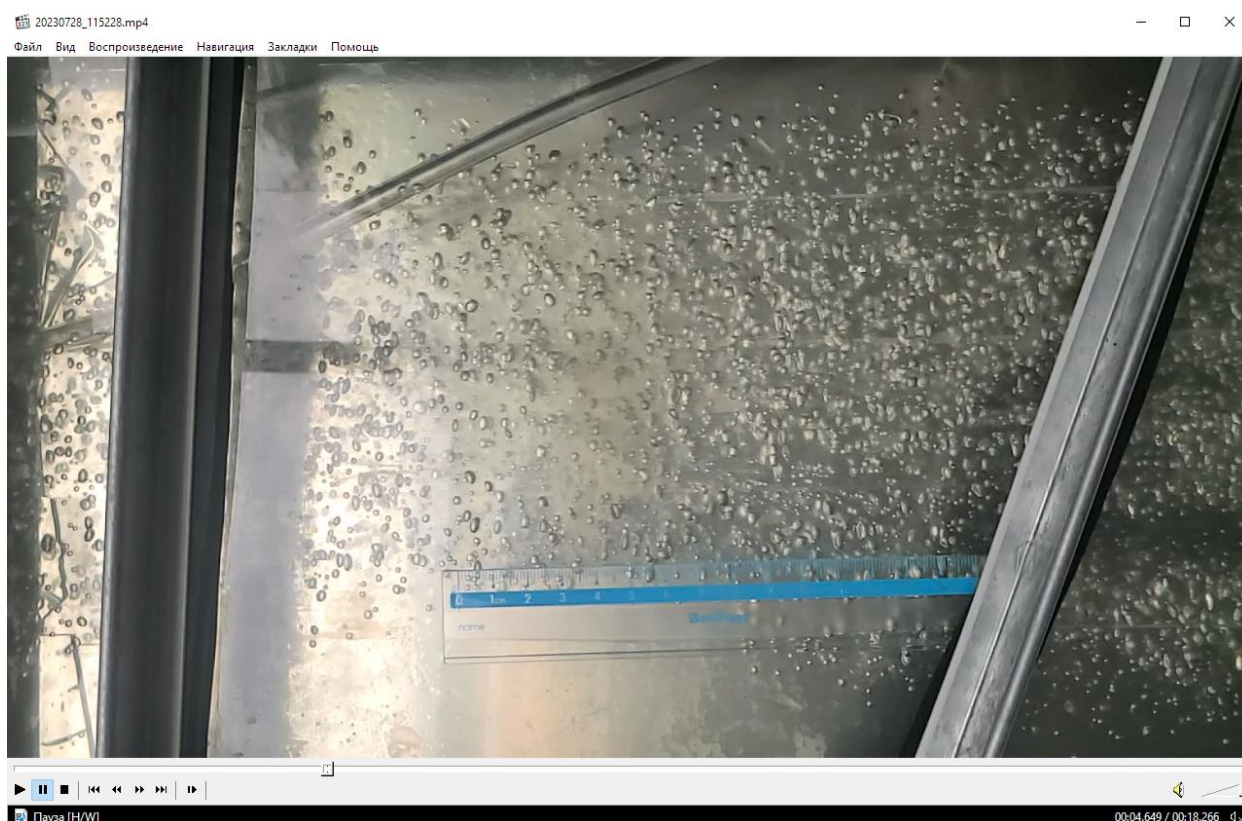


Рисунок 2.4 – Скрин видеоредактора для определения скорости всплытия пузырька.

Во второй серии лабораторных экспериментов с помощью кислородомера АЖА-101М (Рисунок 2.5) определялась концентрация растворенного кислорода в сооружении после окончания цикла аэрации с фиксацией начальной концентрации кислорода, атмосферного давления, температуры воздуха и воды, объема поданного в систему воздуха.

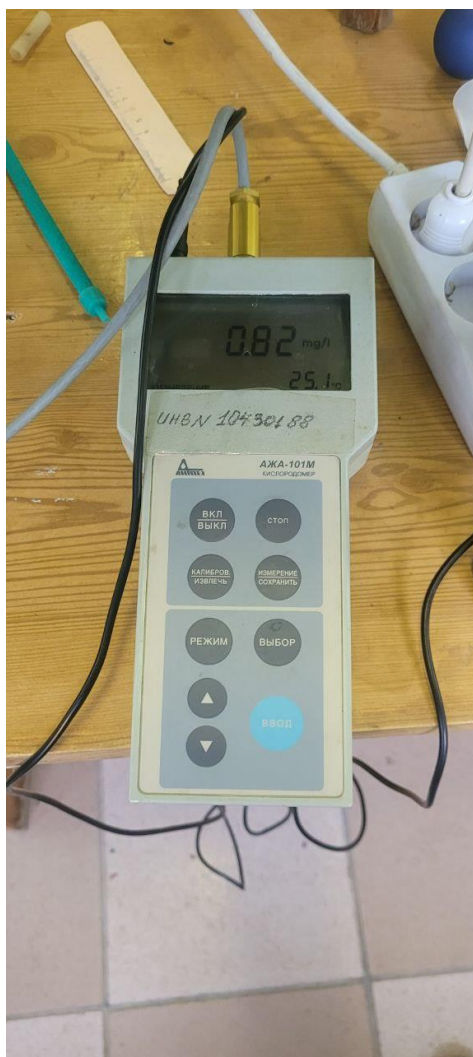


Рисунок 2.5 - Кислородомер АЖА-101М в работе.

Кислородомер калибровался перед каждой подсерией экспериментов в соответствии с рекомендациями и методикой производителя. Снижение концентрации растворенного кислорода между опытами выполнялось посредством добавления стехиометрически определенного количества гипосульфита натрия (Na_2SO_3 100%) соответствующего срока годности в присутствии катализатора – медного купороса (CuSO_4). Результаты испытаний приведены в главе 3 данной работы.

2.2.2 Условия проведения полупромышленных исследований

Полупромышленные исследования работы самообновляющегося взвешенного слоя активного ила (степени осветления) проводились на модели эрлифтного биореактора, описанного в подразделе 2.2.1 (Рисунок 2.3). В этом случае эрлифтный биореактор заполнялся реальной иловой смесью требуемой концентрации и работал под нагрузкой на осветление. 3D-модель и фото сооружения в этом случае показаны на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 - 3D-модель и фото лабораторной установки по исследованию степени осветления в эрлифтном биореакторе.

При исследованиях на полупромышленной модели выполнялось определение концентрации взвешенных веществ на выходе из сооружения в зависимости от концентрации активного ила в биореакторе, нагрузки на осветлитель и интенсивности эрлифтной циркуляции. Иловый индекс при исследованиях составлял 80-100 см³/г. Результаты испытаний приведены в главе 3 данной работы.

2.2.3 Условия проведения опытно-промышленных исследований

Опытно-промышленные испытания проводились на модельной установке биологической очистки сточных вод на КНС №52 г. Донецка.

Установка работала в проточном режиме на реальном стоке, отбираемом погружными насосами из приемного резервуара канализационной насосной станции. Схема установки, приведенная на рисунке 2.7, позволяет работать с различными вариантами рециклов и перетоков (обозначено на схеме).

Для определения параметров работы опытно-промышленной установки анализировалось содержание загрязняющих веществ в поступающей сточной жидкости, потоках между сооружениями, на выходе из сооружений. Анализировались фильтрованные и взболтанные пробы.

Расходы потоков определялись объемным методом.

Химические анализы выполнялись в лаборатории ТЕРЗ ГОУ ВПО ДОННАСА и на месте с использованием кислородомера АЖА-101.1М. (Инв. № 10430188), иономера Универсального ЭВ-74 (инв.№11370002185). Химические анализы выполнялись согласно известным методикам [218-220].

Контролируемыми параметрами при работе установки являлись:

1. Химическое потребление кислорода (ХПК), $\text{гO}_2/\text{м}^3$;
2. Концентрация взвешенных веществ (ВВ), $\text{г}/\text{м}^3$;
3. Концентрация нитратов NO_3^- , $\text{г}/\text{м}^3$;
4. Концентрация аммонийного азота NH_4^+ , $\text{г}/\text{м}^3$;
5. Концентрация фосфатов PO_4^{3-} , $\text{г}/\text{м}^3$;
6. Водородный показатель pH;
7. Окислительно-восстановительный потенциал Eh, мВ.
8. Концентрация кислорода O_2 , $\text{г}/\text{м}^3$.
9. Биологическое потребление кислорода (БПК₅), $\text{гO}_2/\text{м}^3$;

Протекание тех или иных биохимических процессов, состав и характеристики активного ила определялись тестами активности, седиментации, микроскопией [221].

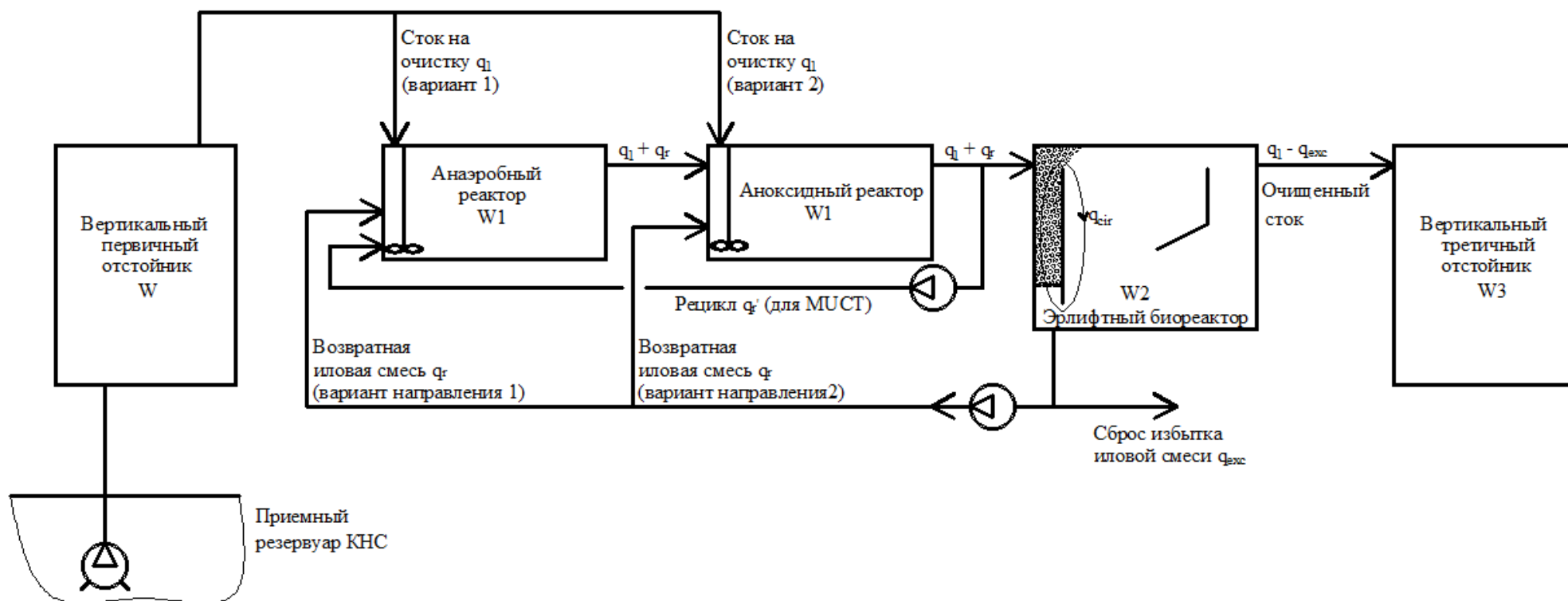
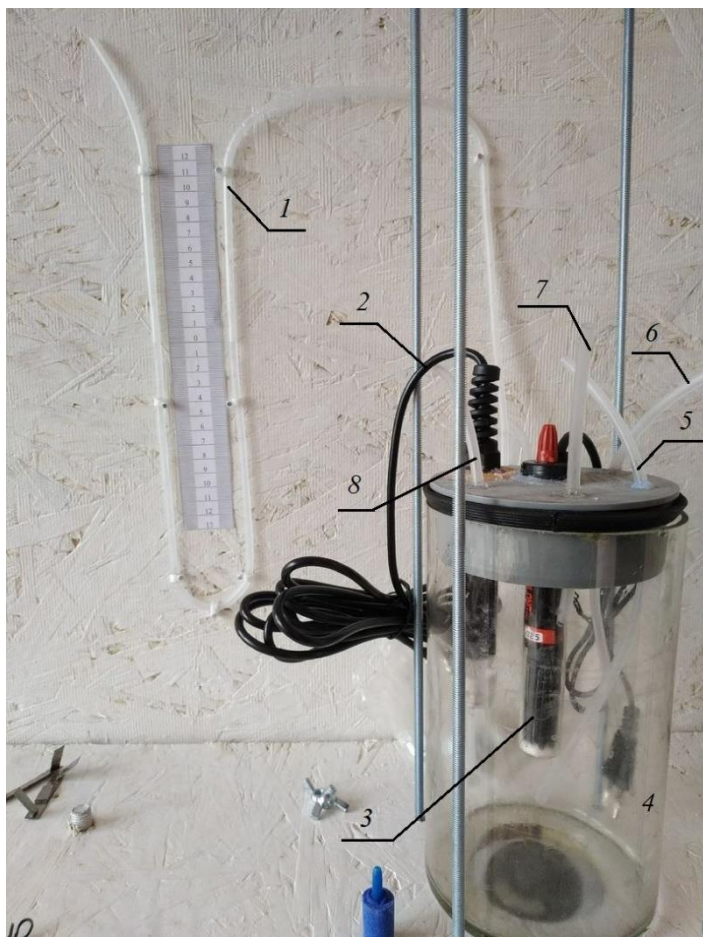


Рисунок 2.7 - Принципиальная схема опытно-промышленной установки очистки сточных вод БОСЭБ

2.2.4 Экспериментальные методы оценки биологических процессов

Выполнение тестов активности ила выполнялось в соответствии с методиками, рекомендованными [221], для чего сконструирован лабораторный реактор периодического действия (Рисунок 2.8).



- 1-U-образный манометр;
- 2-кислородомер;
- 3- погружной обогреватель;
- 4-магнитная мешалка;
- 5-трубка для отбора проб;
- 6-трубка для подачи газа на продувку;
- 7-трубка для отвода газа;
- 8- трубка для ввода реагентов.

Рисунок 2.8 - Лабораторный реактор периодического действия.

Реактор представляет собой герметичный сосуд цилиндрической формы объемом 2л, оснащенный магнитной мешалкой (частота вращения 24 об/мин), рН-метром, трубками для подачи и отвода газа (кислород/аргон), портами для отбора проб и добавления реагентов (контроль рН с помощью ручного добавления HCl и NaOH). Для контроля температуры используется погружной обогреватель Xilong XL-025, мощностью 50W с диапазоном температур: 17-35°C. Для измерения концентрации растворенного кислорода и температуры используется кислородомер DO840X 8403. Седиментационные свойства активного ила оценивались с помощью илового индекса по известной методике [221].

Для оценки показателей активности ила, лабораторные модельные эксперименты на порционном реакторе (Рисунок 2.8) проводятся в анаэробных, аэробных и аноксидных условиях, в зависимости от интересующих параметров и характеристик исследований.

Приведенные способы исследования позволяют в полной мере с достаточной достоверностью получать данные, необходимые для выполнения задач исследований.

2.3. Метод реализации имитационного моделирования

Для реализации теоретической модели комплекса сооружений биологической очистки нами предложено использовать программную среду Cell Designer разработки The Systems Biology Institute, Токио, Япония. Это довольно мощный инструмент биохимического моделирования, который используется в биотехнологии, биологии и медицине [222]. Для примера, процесс гидролиза нерастворенного субстрата по ASM3 в поле CellDesigner приведен на рисунке 2.9.

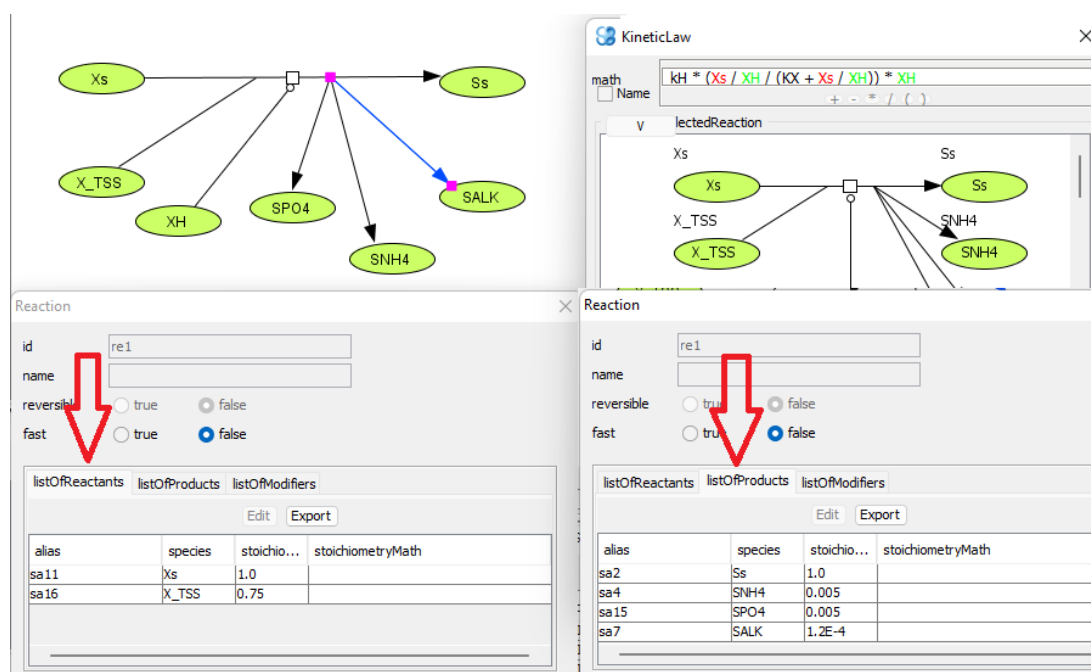


Рисунок 2.9 - Расчетная схема процесса гидролиза органического вещества по ASM3 в поле Cell Designer.

Стрелками на рисунке 2.9 указаны переключенные вкладки «реактанты» и «продукты», где задаются стехиометрические коэффициенты реакции. Поскольку

в кинетической закономерности процесса гидролиза присутствует концентрация гетеротрофной биомассы (X_H), но ни реактантом, ни продуктом данной реакции гетеротрофы не являются, в процесс они добавлены в качестве катализатора.

Классическим катализатором процесса гетеротрофы не являются, однако, исходя из сущности процесса (гетеротрофы выделяют экзоферменты, инициирующие процесс гидролиза) их каталитическая функция уже заложена в кинетике процесса. Следует отметить, что не все незадействованные компоненты будут выступать катализаторами. В ряде анаэробных (либо условно аноксидных) процессов кислород будет выступать в роли ингибитора, что уже отражено в уравнениях скоростей процессов на основе кинетики Моно.

Особенностью Cell Designer является форма описания изложенных уравнений системы. Если при решении в математических редакторах, программным способом, зачастую можно отследить только изменения концентраций (что не представляет никакого интереса при стабильно работающей системе), в Cell Designer система описывается набором процессов с возможностью оценить скорости каждого.

Кроме того, система отслеживает и сверяет соответствие заданных параметров в кинетических закономерностях и в стехиометрии, что значительно снижает вероятность ошибки при составлении имитационной модели.

Поступление сточных вод из математически безразмерного источника (Source) в программной среде Cell Designer будет иметь вид, приведенный на рисунке. 2.10. При этом для каждого из процессов приращения концентрации, задаются кинетические и стехиометрические параметры. (Как пример, для азота аммонийного, рисунок 2.11.)

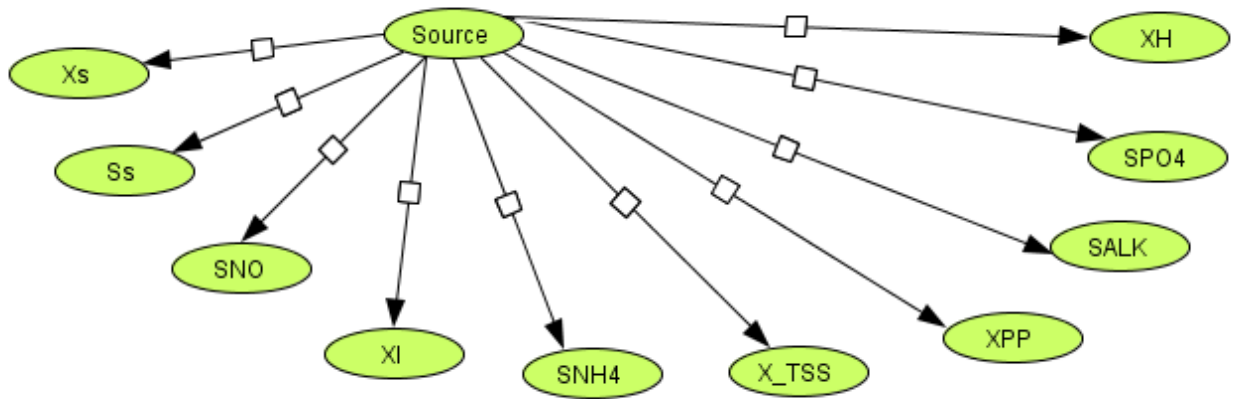


Рисунок 2.10 - Схема балансовых уравнений сточных вод, поступающих на очистку

alias	species	stoichio...	stoichiometryMath
sa511	SNH4		1 / W

class	id	name	speciesType	compar...	position..
SIMPLE...	SALK	SALK		default	inside
SIMPLE...	SALK1	SALK1		default	inside
SIMPLE...	SALK2	SALK2		default	inside

Рисунок 2.11 - Кинетика и стехиометрия поступления азота аммонийного с исходным стоком.

Приращение концентрации i -того компонента в реакторе за время t за счет притока в него исходного стока из бесконечного источника определяется по зависимости:

$$\Delta C^i = \frac{t \cdot C_{in}^i \cdot q_1}{W_1}, \quad \text{г/м}^3 \quad (2.1)$$

где t – расчетное время приращения концентрации, сут;

C_{in} – концентрация i -того компонента в исходном стоке, определенная прямым измерением/м³;

q_1 – расход сточных вод, поступающих на очистку, $\text{м}^3/\text{сут}$;

W_1 – объем первой расчетной зоны биологической очистки, м^3 .

Количество уравнений в системе по форме 2.1 соответствует количеству учитываемых компонентов в исходных сточных водах. В классическом прочтении схемы очистки воды – это 9 зависимостей для ASM2d и 8 зависимостей для ASM3+Bio-P.

Однако, в данную систему можно, при необходимости добавить еще некоторые исходные компоненты. Так, при достаточно протяженных сетях канализации и значительном времени пребывания в них сточных вод, на поверхности трубопроводов может развиваться биопленка, частично смываемая потоком сточных вод, и привносящая в систему некоторое количество гетеротрофных микроорганизмов, ФАО и накопленного в них продукта.

В случае ASM2d, возможна необходимость учета во входящем стоке металл-гидроксидных и металл-фосфатных соединений (X_{MeOH} , X_{MeP}), которые могут образовываться в системе за счет транспортировки сточных вод по металлическим трубопроводам.

Параметр с идентификатором компонента (X либо S) и суффиксом “_in” представляют из себя константу, определенную согласно анализу состава исходного стока либо методами калибровки. Аналогичным образом задаются все поступающие на очистку компоненты, нами принято 10 веществ.

В поле программной среды, в стороне от записанной зависимости притока, записываются всех биохимические процессы согласно выбранной имитационной модели. Компоненты при этом многократно повторяются в различных процессах, система «опознает» их по характерному идентификатору.

Важно отметить, что в данном случае знак «-» перед стехиометрией не ставится, поскольку программа сама привязывает данный стехиометрический коэффициент к реактантам. Аналогичным образом описываются все потоки системы.

При описании рециркуляции между зонами эрлифтного биореактора использован аналогичный подход с перетоком между зонами (рисунок 2.12), с указанием в кинетической зависимости расхода q_{cir} .

Аналогичным образом в систему вносятся все остальные рециркуляционные расходы, что в имитационной модели соответствует количеству компонентов.

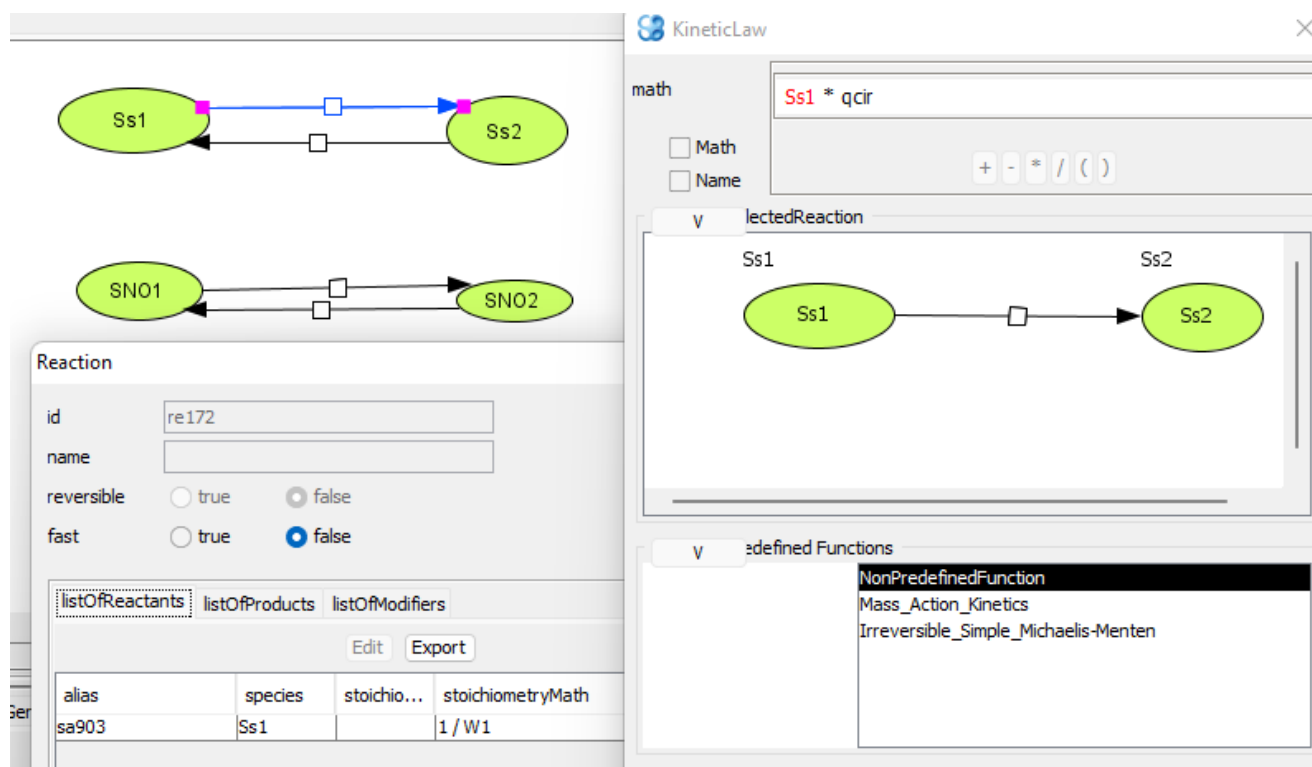


Рисунок 2.12 - Рециркуляция в эрлифтном биореакторе.

По аналогии с уравнением 2.1, вынос массы из сооружения в размерностях снижения концентрации и поступление этой массы в другое, следующее сооружение очистки описывается 2мя уравнениями.

Для сооружения, из которого выходит рассматриваемый j -тый поток, изменение концентрации составит:

$$\Delta C_j^i = - \frac{t \cdot C_{\text{ВЫХ}}^i \cdot q_j}{W_{\text{ВЫХ}}}, \quad \text{г/м}^3 \quad (2.2)$$

где $C_{\text{ВЫХ}}$ – концентрация i -того компонента в сооружении, откуда выходит рассматриваемый j -тый поток, г/м^3 ;

q_j – расход иловой смеси в j -том потоке, $\text{м}^3/\text{сут}$;

$W_{\text{ВЫХ}}$ – объем сооружения, откуда выходит поток, м^3 .

Знак минус в этой зависимости показывает, что данный поток выносит массу из сооружения. Для сооружения в который входит рассматриваемый j -тый поток, изменение концентрации составит:

$$\Delta C_j^i = \frac{t \cdot C_{\text{ВЫХ}}^i \cdot q_j}{W_{\text{ВХ}}}, \quad \text{г/м}^3 \quad (2.3)$$

где $C_{\text{ВХ}}$ – концентрация i -того компонента в сооружении, куда входит рассматриваемый j -тый поток, г/м^3 ;

$W_{\text{ВХ}}$ – объем сооружения, куда входит поток, м^3 .

Сами концентрации в сооружении входа и выхода потока будут являться искомыми величинами при решении общей системы биохимических и гидравлических уравнений. А изменение концентрации должно быть сведено для каждого сооружения согласно аналогу закона Кирхгофа, что исключает эту переменную из системы.

Внутри аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации происходит интенсивная внутренняя циркуляция, характеризующаяся в том числе сменой аэробных и анаэробных зон.

В этом случае также можно использовать уравнения 2.2, 2.3 для описания обмена масс между зонами, однако возникает вопрос определения циркуляционного расхода и объема этих зон в одном сооружении.

Поскольку биохимические процессы проходят с потреблением кислорода (по мере продвижения циркуляционного потока концентрация кислорода будет снижаться), в расчетной модели принято использовать 2 зоны: зона насыщения кислородом и зона потребления кислорода.

Вынос массы из системы представлен двумя блоками процессов – в безразмерный приемник “Sink” отводятся очищенные сточные воды, в безразмерный приемник “Sink2” – избыточный активный ил (Рисунок 2.13).

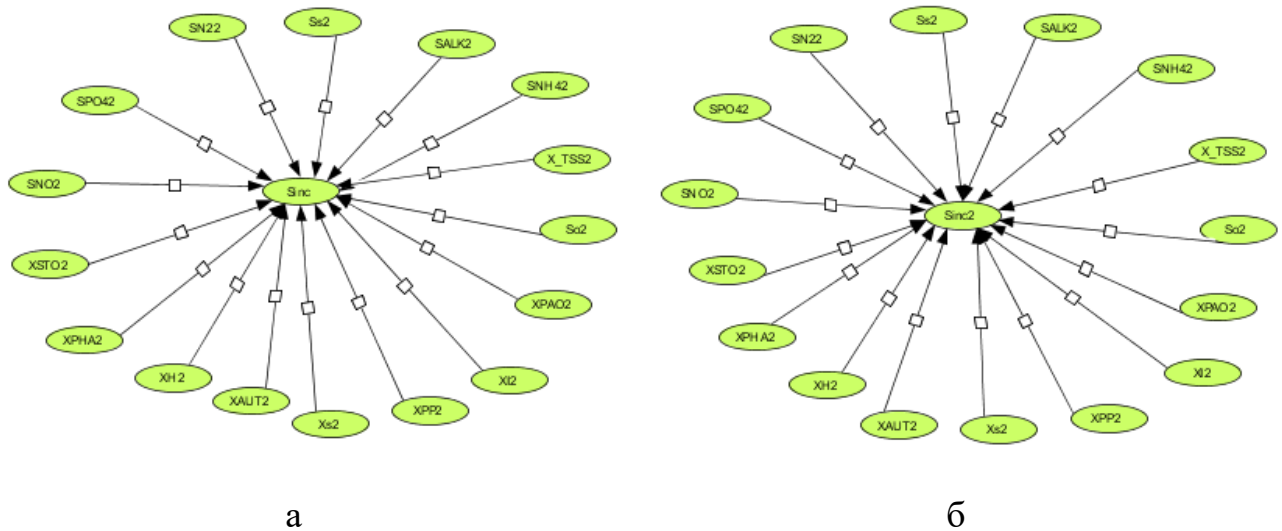


Рисунок 2.13 - Схема блоков выноса массы из системы: а) – вынос компонентов с очищенной сточной жидкостью; б) – вынос компонентов с избыточным активным илом

Нерастворенные компоненты (Рисунок 2.14) выносятся из системы с применением коэффициента gw_k , величина которого будет рассмотрена ниже, растворенные – без применения коэффициентов (Рисунок 2.15).

alias	species	stoichio...	stoichiometryMath
sa872	XSTO2		1/W2

Рисунок 2.14 - Применение коэффициента gw_k для описания выноса частиц после илоразделения на примере нерастворенного компонента.

диспергирования подаваемого в воду воздуха (размера пузырька), времени контакта воздушной и жидкой среды, температуры и др. [223-225].

Таким образом, расчетную зависимость в модель работы БОСЭБ можно записать в виде:

$$\frac{dS_O}{dt} = \frac{24Q_{air} \cdot M \cdot k_{исп}}{W_a}, \quad (2.5)$$

где M – концентрация кислорода в воздухе, г/м³;

W_a – объем зоны аэрации, м³.

Приведенное приращение концентрации кислорода выполняется только в зону аэрации. В дальнейшем, согласно схеме работы аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, кислород поступит в зону потребления, где его концентрации будут снижаться за счет биохимических процессов.

В систему также задаются величины констант, начальные параметры для расчета, которые не должны быть нулевыми из-за особенностей системы уравнений и биологического смысла процессов.

Глава 3.

НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ В СИСТЕМАХ БОСЭБ

Для расчета систем биологической очистки сточных вод необходимо учитывать как скорости биохимических процессов, так и гидравлические зависимости работы сооружений. В совместном решении этих задач лежит решение вопросов не только проектирования, но и эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод.

3.1. Концепция биологической очистки с эрлифтными биореакторами

Для решения поставленных в работе задач, предложена технология БОСЭБ [226] – биологическая очистка с эрлифтными биореакторами. Основным отличительным элементом технологии БОСЭБ являются аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации [227, 228].

Данные сооружения представляют из себя аэротенки-смесители, в которых система аэрации устроена по принципу затопленного эрлифта (верх аэрационной эрлифтной колонны находится ниже уровня воды). Такое решение позволяет организовать циркуляционные восходяще-нисходящие потоки в сооружении, как показано на рисунке 3.1.

Внутри аэрационной колонны затопленного эрлифта возникают восходящие потоки водовоздушной смеси. За стенкой затопленного эрлифта происходит нисходящее движение жидкости, которое при пересечении зазора козырька, создает разрежение в этой зоне. За счет указанного разрежения происходит самообновление взвешенного слоя в зоне осветления.

Основная эрлифтная циркуляция в сооружении обеспечивает перемещение иловой массы из зоны насыщения кислородом (внутри и над эрлифтом) в зону потребления кислорода (за эрлифтом). На рисунке 3.2. приведено условное распределение зон в сооружении.

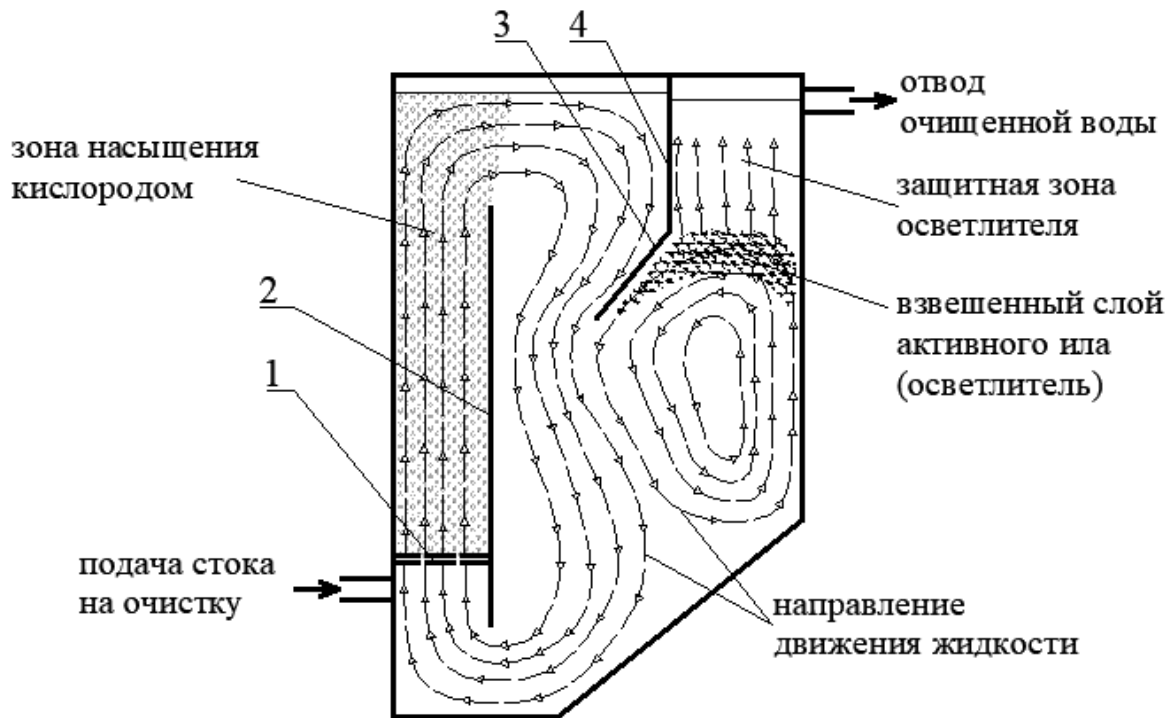


Рисунок 3.1 - Схема эрлифтного биореактора

1 – аэратор; 2 – вертикальная стенка затопленного эрлифта; 3 – наклонный козырёк; 4 – вертикальная разделительная перегородка.

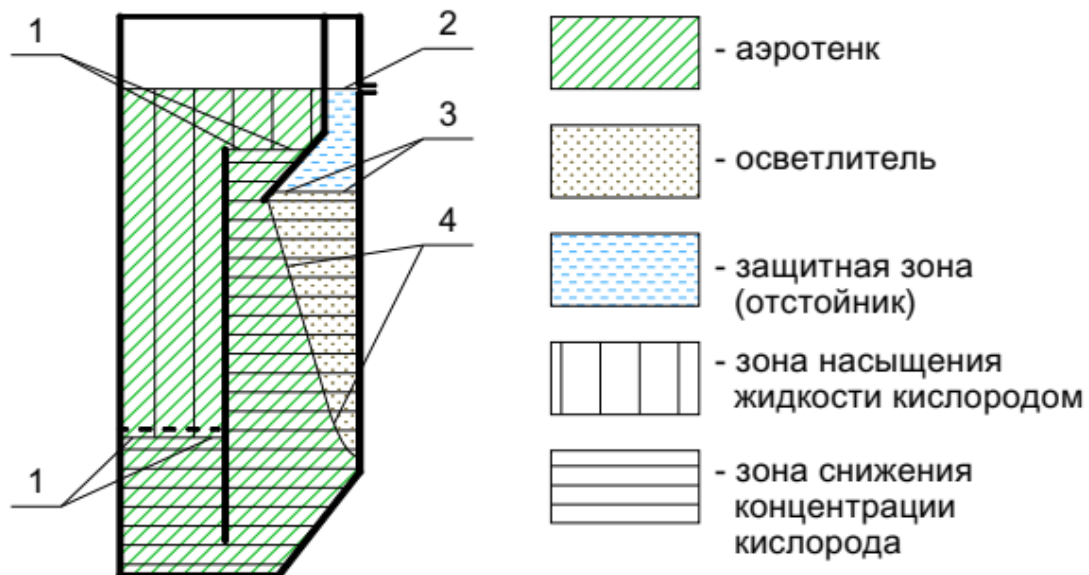


Рисунок 3.2 - Кислородное зонирование аэротенка-осветлителя

1 – границы зоны насыщения (уровень аэрационной системы и верха эрлифта); 2 – уровень жидкости в сооружении; 3 – верхняя граница взвешенного слоя; 4 – граница зоны илоразделения (водоворотной зоны).

В зоне аэрации происходят одновременно процессы насыщения жидкости кислородом воздуха и потребление кислорода микроорганизмами, в зоне потребления кислорода насыщение прекращается, и, по мере продвижения иловой смеси по циркуляционному контуру, концентрация кислорода падает (Рисунок 3.3).

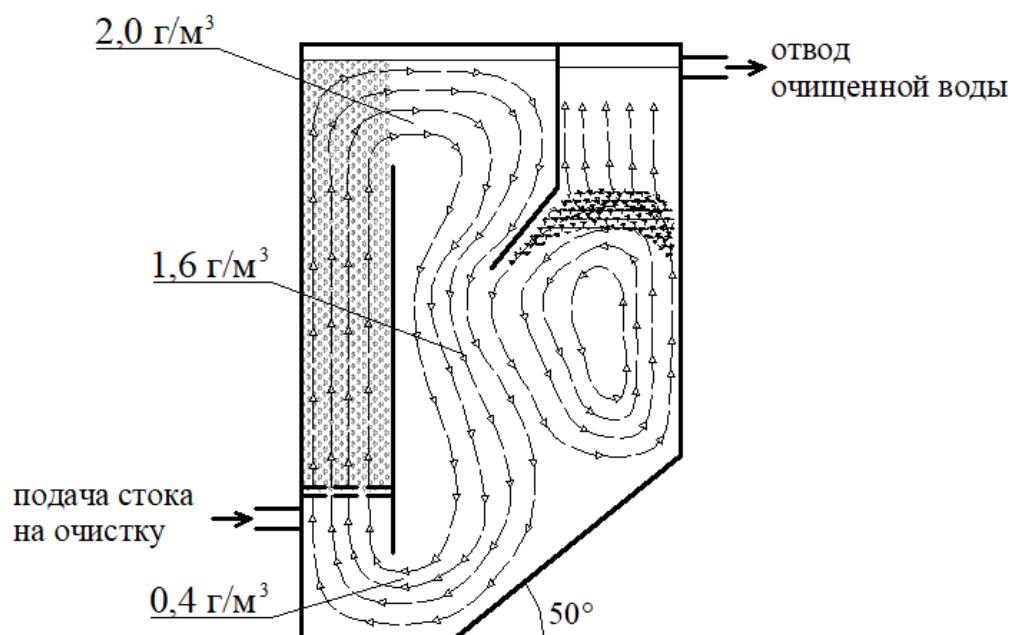


Рисунок 3.3 – Распределение кислорода по глубине эрлифтного биореактора.

В таких сооружениях, за счет смены аэробных и анаэробных условий, протекают одновременные процессы нитри-денитрификации, что позволяет отказаться от нитратного рецикла в общей схеме биологической очистки. Установленное изменение кислорода по глубине сооружения позволяет предполагать протекание процессов денитрификации внутри хлопка ила в нижней части аэротенка, что подтверждается оптимальными для этого процесса концентрациями кислорода.

В зависимости от состава сточных вод, поступающих на очистку, состав сооружений в технологических схемах БОСЭБ может быть различным. Основные технологические схемы представлены на рисунке 3.4. В зависимости от

соотношения органических загрязнений, азота и фосфора (БПК:N:P) могут быть использованы процессы БОСЭБ: «ЭБ», «А-ЭБ», «А-А-ЭБ», «А/А-ЭБ».

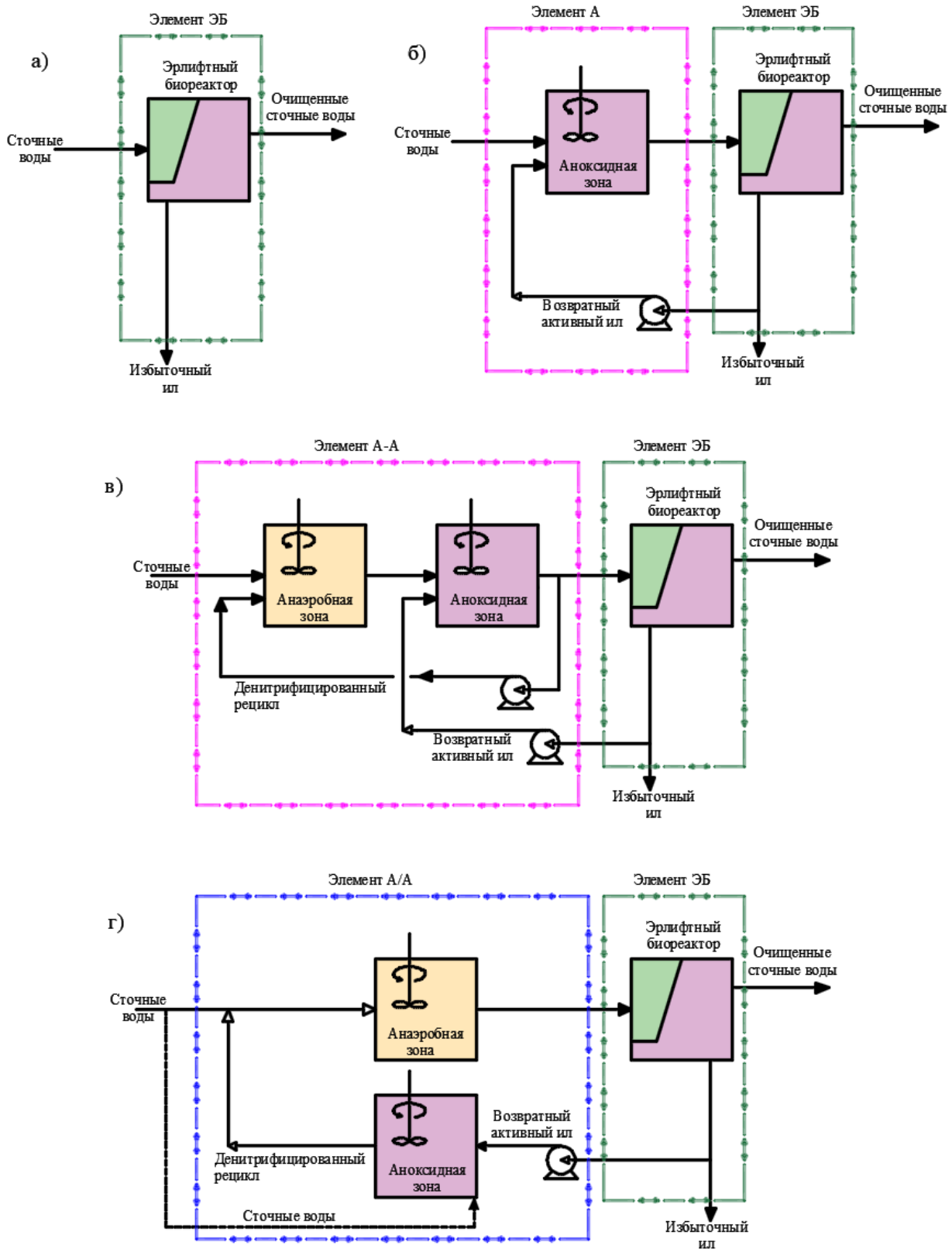


Рисунок 3.4 - Схемы биологической очистки от соединений азота и фосфора в рамках концепции БОСЭБ: а) – схема «ЭБ»; б) – схема «А-ЭБ»; в) – схема «А-А-ЭБ»; г) – схема «А/А-ЭБ».

Определение области применения той или иной схемы является одной из задач данной работы и приведены в пятой главе.

В сравнении с классическими схемами, приведенными в первой главе, предложенные решения выгодно отличаются по следующим показателям:

- исключается нитратный рецикл, который, согласно различным источникам, составляет до 300% от расхода сточных вод;
- перемешивание в аноксидной зоне выполняется за счет потока жидкости, созданного эрлифтной циркуляцией в сооружении, что исключает необходимость использования в этой зоне оборудования для механического перемешивания;
- из схемы исключается вторичный отстойник, функции по илоразделению которого выполняет взвешенный слой активного ила внутри аэротенка-осветлителя. Ввиду вихревой рециркуляции взвешенного слоя ил не пребывает долгое время в аноксидных условиях, что исключает характерное для гравитационного отстаивания вторичное загрязнение при илоотделении.

На основании изложенного, концепцию технологии БОСЭБ (биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами) можно сформулировать следующим образом: при очистке сточных вод малых и средних населенных пунктов для удаления органических загрязнений, соединений азота и вторичного илоразделения, предложено использовать биореакторы с затопленной эрлифтной системой аэрации и встроенным самообновляющимся взвешенным слоем. В случае необходимости биологического удаления фосфора, а также при низком соотношении БПК:N в схему с эрлифтными биореакторами могут включаться дополнительные биореакторы-смесители с устройством перегородок и рециклов.

Для описания всех биологических и гидравлических процессов в приведенных системах выполнены теоретические и экспериментальные исследования.

3.2. Математическое описание гидродинамических процессов в эрлифтных биореакторах

В соответствии с основными концептуальными положениями БОСЭБ (подраздел 3.1.), процессы циркуляции иловой смеси между различными зонами эрлифтного биореактора, а также сомообновление взвешенного слоя происходит за счет организации различных потоков в сооружении. Описание направления этих потоков, а также скоростей в характерных точках сооружения (на входе в затопленный эрлифт, на границе взвешенного слоя) во многом определяет прогнозируемость процессов биологической очистки и илоразделения.

Для описания гидродинамики сооружения предложено использовать методы математического моделирования гидродинамических процессов в виде уравнений Навье-Стокса для вертикальной \bar{v} и горизонтальной \bar{u} составляющих размерных скоростей:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \bar{\nu} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right), \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \bar{\nu} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right), \quad (3.2)$$

где \bar{t} – время, с;

\bar{x} , \bar{y} – координаты, м;

$\bar{\rho}$ – плотность жидкости, кг/м³;

$\bar{\nu}$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;

\bar{P} – давление, Па.

Верхним подчеркиванием в данном случае обозначены размерные величины, использующиеся в безразмерном виде. В приведенных уравнениях (3.1) и (3.2) имеется три неизвестных: \bar{u} , \bar{v} , \bar{P} . Для замыкания системы, уравнения Навье-Стокса дополняются уравнением неразрывности потока:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0. \quad (3.3)$$

Исключив давление из системы, продифференцировав (3.1) по y и (3.2) по x , и определив вихрь как

$$\bar{\zeta} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}}, \quad (3.4)$$

получим уравнение переноса вихря

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}} - \bar{v} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}} + \bar{v} \left(\frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (3.5)$$

Это же уравнение в консервативной форме, обеспечивающей выполнение интегральных законов сохранения, справедливых для исходных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\frac{\partial(\bar{u}\bar{\zeta})}{\partial \bar{x}} - \frac{\partial(\bar{v}\bar{\zeta})}{\partial \bar{y}} + \bar{v} \left(\frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (3.6)$$

Функцию тока $\bar{\psi}$ при этом определим соотношениями:

$$\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{y}} = \bar{u}, \quad \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}} = -\bar{v}, \quad (3.7)$$

тогда уравнение (3.4) можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{y}^2} = \bar{\zeta}, \quad (3.8)$$

где $\bar{\psi}$ – функция тока, м²/с.

Введя безразмерные величины $u = \bar{u}/\bar{U}_0$, $v = \bar{v}/\bar{U}_0$, $x = \bar{x}/\bar{L}$, $y = \bar{y}/\bar{L}$, $\zeta = \bar{\zeta} \cdot \bar{L}/\bar{U}_0$, $t = \bar{t} \cdot \bar{U}_0/\bar{L}$, можно привести уравнения (3.4) и (3.6) к безразмерному виду:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right), \quad (3.9)$$

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (3.10)$$

где \bar{U}_0 – характерная скорость, м/с;

\bar{L} – характерный размер;

Re – число Рейнольдса.

Итерационный процесс при решении задачи реализуется методом Гаусса–Зайделя. Направление обхода узлов координатной сетки циклически изменяется, как показано на рисунке 3.5.

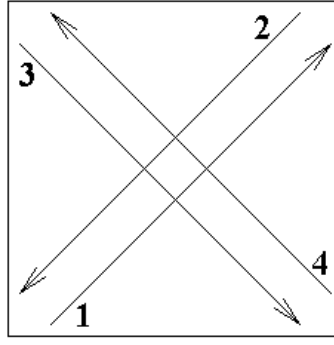


Рисунок 3.5 - Последовательность обхода узлов координатной сетки

Уравнение (3.9) в конечных разностях (верхний индекс при ζ , ψ , u , v – номер шага времени, нижние индексы – номера координатных ячеек: первый (i) – по горизонтали, второй (j) – по вертикали):

при $i \uparrow$, $j \uparrow$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{Re} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\eta^2} \right); \quad (3.11)$$

при $i \downarrow$, $j \downarrow$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{Re} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^n}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^n}{\eta^2} \right); \quad (3.12)$$

при $i \uparrow$, $j \downarrow$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{Re} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^n}{\eta^2} \right); \quad (3.13)$$

при $i \downarrow$, $j \uparrow$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = [\zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{Re} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^n}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\eta^2} \right)], \quad (3.14)$$

где τ – шаг итераций по времени, с;

$\bar{\eta}$ – шаг координаты по вертикали, м;

$\bar{\xi}$ – шаг координаты по горизонтали, м.

Функцию тока ψ находим итерационным методом Ричардсона:

$$\psi_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2(1+\beta^2)} (\psi_{i+1,j}^k + \psi_{i-1,j}^k + \beta^2 \psi_{i,j+1}^k + \beta^2 \psi_{i,j-1}^k - \xi^2 \zeta_{i,j}), \quad (3.15)$$

где $\beta = \xi/\eta$ – отношение размеров ячеек сетки.

Полученная задача решается методом последовательных приближений, для чего создана компьютерная программа в среде Delphi на языке Object Pascal. Интерфейс программы приведен на рисунке 3.6.

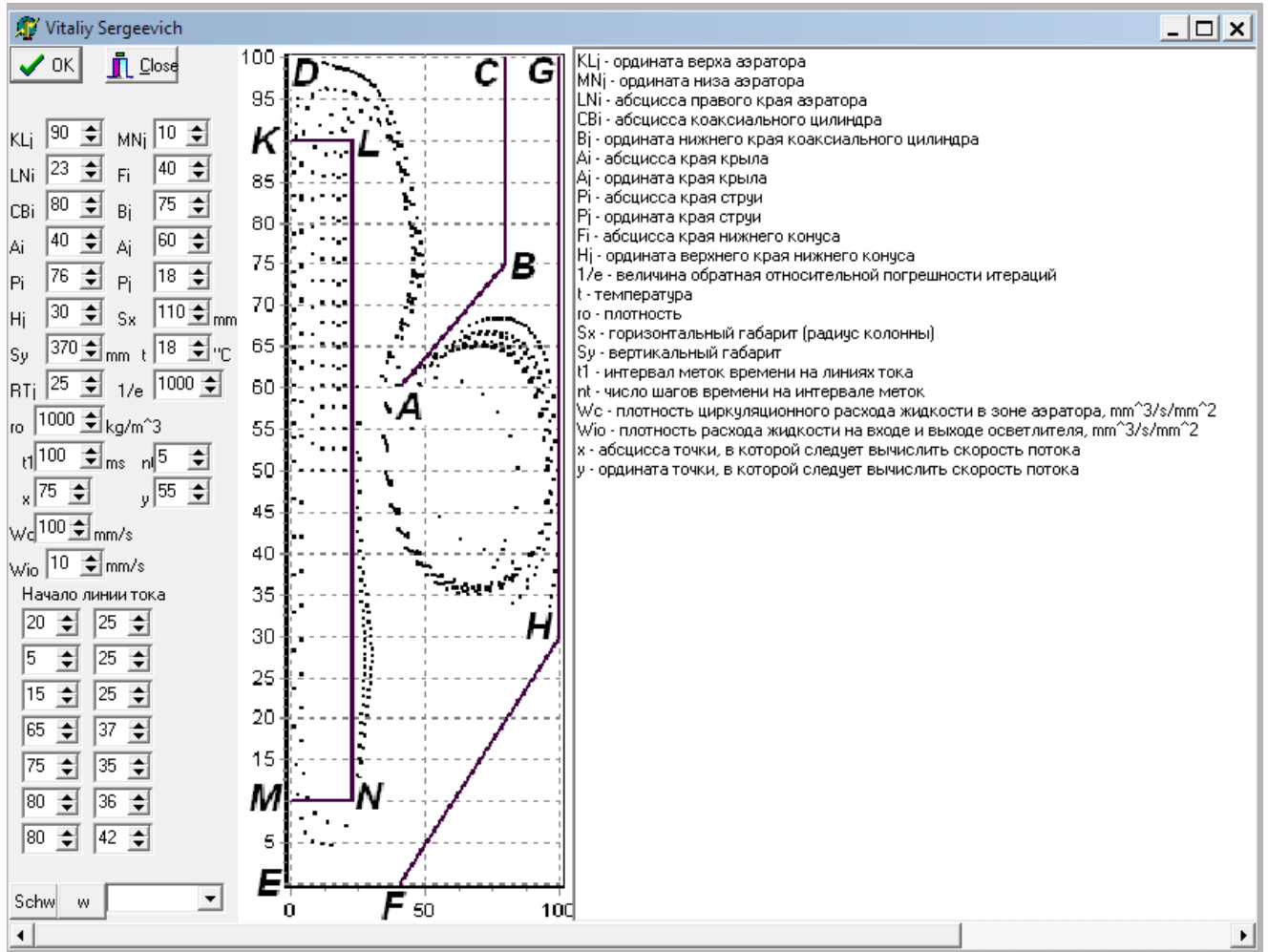


Рисунок 3.6 - Интерфейс программы для моделирования гидродинамических процессов в эрлифтном биореакторе.

Таким образом, для определения вертикальной и горизонтальной составляющей скорости в любой точке сооружения, кроме геометрических размеров сооружения, требуется задавать W_c и W_{io} (мм/с) – приведенные к площади эрлифта расходы воздуха и жидкости в затопленном эрлифте. Определение зависимости расхода жидкости от расхода воздуха численными методами затруднено, поскольку двухфазная система крайне сложна для описания

и требует несуществующих на данный момент аналитических решений уравнений Навье-Стокса.

Для установления искомой функции q_{cir} (Рисунок 3.7) – циркуляционного расхода в сооружении (m^3/c) от расхода воздуха, подаваемого в систему аэрации Q_{air} (m^3/c) предложено использовать интеграл Бернулли [227]. Правомерность использования данного подхода обеспечивается следующими допущениями:

- при постоянной подаче воздуха обеспечивается ровное поле скоростей в сооружении;
- увеличение объема пузырька по мере его всплытия не учитывается.

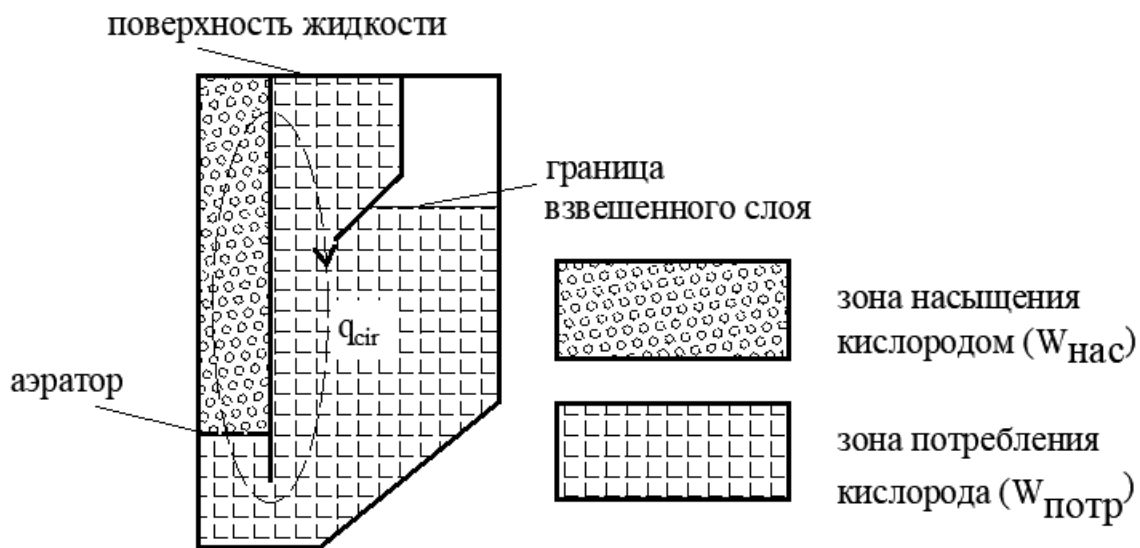


Рисунок 3.7 - Расчетные зоны в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Связывая уравнением Бернулли потоки до и после аэратора, с использованием уравнения неразрывности, получим систему уравнений с двумя неизвестными

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_a = \frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{Q_{air}}{v_{ж} + V_{п}} \\ h_a - \frac{(h_a - z_1)}{\omega_a} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{\gamma_{г} \cdot Q_{air}}{\gamma_{ж} \cdot (v_{ж} + V_{п})} \right) - \left[W_{ц} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{\gamma_{г} \cdot Q_{air}}{\gamma_{ж} \cdot (v_{ж} + V_{п})} \right) + \frac{W_{к} - W_{ц}}{W_{к}} \right] z_1 +, \quad (3.16) \\ + \frac{\alpha}{2g} \cdot \left(\frac{q_{cir} + Q_{air}}{\omega_a} \right)^2 = \frac{\alpha_{в}}{2g} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{\omega_a} \right)^2 + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{q_{cir}^2}{2g} \end{array} \right.$$

где q_{cir} – расход иловой смеси, циркулирующей через затопленный эрлифт, m^3/c ;

h_a – глубина погружения аэратора, м;

$W_{\text{ц}}$ – объём газожидкостной смеси в затопленном эрлифте, м^3 ;

$W_{\text{к}}$ – объём газожидкостной смеси над затопленным эрлифтом, м^3

$\omega_{\text{а}}$ – площадь поперечного сечения затопленного эрлифта, м^2 ;

Q_{air} – расход воздуха, поступающий в затопленную эрлифтную систему аэрации, $\text{м}^3/\text{с}$;

z_1 – глубина погружения верха эрлифтной трубы под уровень свободной поверхности жидкости в биологическом реакторе, м ;

$\gamma_{\text{ж}}$ – удельный вес иловой смеси в аэротенке, $\text{Н}/\text{м}^3$;

$v_{\text{ж}}$ – средняя скорость течения жидкой фазы газожидкостной смеси в эрлифте, $\text{м}/\text{с}$;

$v_{\text{п}}$ – средняя скорость всплытия пузырька воздуха в эрлифте, $\text{м}/\text{с}$;

ζ_i – соответствующий коэффициент местного сопротивления на пути циркулирующего потока от выхода из сечения, в котором расположены аэраторы, до входа в это сечение;

ω_i – занимаемая жидкой фазой часть поперечной площади потока, м^2 , в сечении с местным сопротивлением, коэффициент которого составляет ζ_i ,

α – коэффициент Кориолиса для потока смеси в эрлифте;

$\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент Кориолиса для потока на входе в затопленный эрлифт.

Неизвестными величинами в системе уравнений 3.16 являются расход иловой смеси $q_{\text{сиг}}$ и скорость течения жидкой фазы в эрлифте $v_{\text{ж}}$. В данной работе, задача решалась в программе MathCAD Prime 9.0.

После определения циркуляционного расхода жидкости по формуле (3.16), полученные значения подставляются в программу численного моделирования (Рисунок 3.6), что позволяет определить скорости и их направление в любой точке сооружения, что будет использовано в следующих подразделах.

3.3. Исследование процесса аэрации в эрлифтных биореакторах

Эффективность использования кислорода воздуха, подаваемого в систему аэрации, является одним из решающих факторов при расчете систем

биологической очистки. В эрлифтных биореакторах условия аэрации существенно отличаются от таковых в других сооружениях биологической очистки.

Так, в затопленной эрлифтной системе аэрации эжекционный эффект постоянен по всей высоте затопленного эрлифта, в то время как в классических системах существует подмес иловой смеси, распределенный по высоте сооружения (Рисунок 3.8).

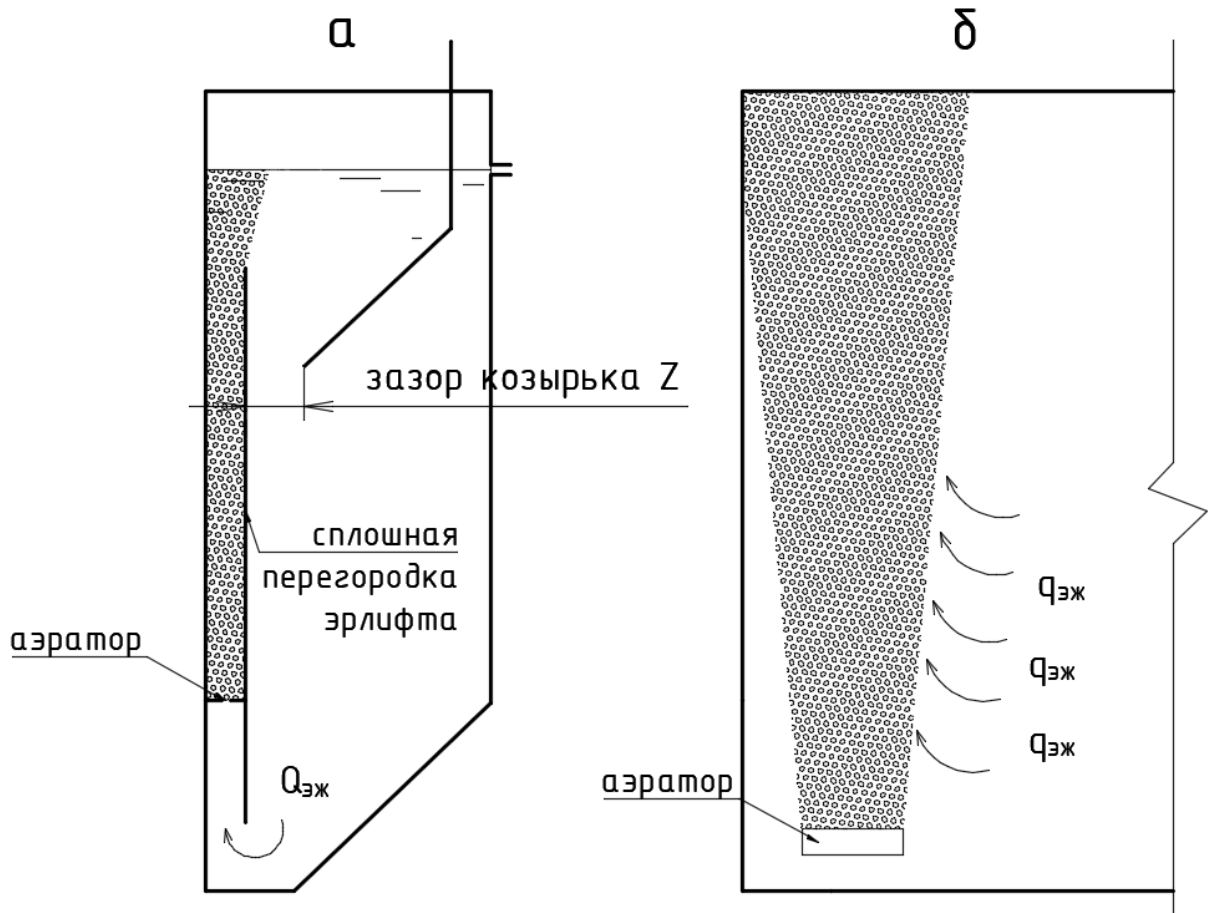


Рисунок 3.8 – Принципиальная схема механизмов эжекции при аэрации: а) – в эрлифтном биореакторе; б) – в классическом аэротенке.

Таким образом, известные эмпирические зависимости, учитывающие эжекционный эффект при аэрации в аэротенках, не будут адекватно описывать данное явление в эрлифтных биореакторах, что требует исследования такого типа аэрации.

Одним из наиболее распространенных показателей эффективности процесса аэрации в практике очистки сточных вод, является коэффициент использования кислорода $K_{и}$, представляющий из себя отношение концентрации кислорода,

растворенного в воде ΔC_{Π} , к концентрации кислорода в воздухе, поданном в систему аэрации C_{KB} . Величина коэффициента использования кислорода, полученная при стандартных условиях, представляет из себя стандартную эффективность переноса кислорода SOTE.

Для определения величины $K_{И}$, с достаточной для инженерных расчетов точностью, можно использовать известную форму зависимости (с уточнениями Андреева С.Ю.):

$$K_{И} = \frac{\Delta C_{\Pi}}{C_{KB}} = \frac{1}{\delta_{\Pi}} \sqrt{D_T \cdot \zeta \frac{\rho \cdot V_{\Pi}^3}{2 \cdot \sigma \cdot K_{\Phi}}} \cdot \frac{C_H - C}{C_{KB}} \cdot \Delta T, \quad (3.17)$$

где ΔC_{Π} – концентрация кислорода, переданного жидкости, кг/м³;

C_{KB} – концентрация кислорода, в воздухе, кг/м³;

δ_{Π} – дисперсионный размер пузырька, м;

D_T – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с;

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления всплытию пузырька;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

V_{Π} – скорость всплывания пузырька воздуха, м/с;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м²;

K_{Φ} – коэффициент формы пузырька воздуха;

C_H – концентрация насыщения жидкости кислородом, кг/м³;

C – концентрация растворенного в жидкости кислорода, кг/м³;

ΔT – время контакта воздуха с водой, с.

Дисперсионный размер пузырька δ_{Π} , м, определяется по формуле

$$\delta_{\Pi} = \frac{W_{\Pi}}{S_{\Pi}}, \quad (3.18)$$

где W_{Π} – объем пузырька воздуха, м³;

S_{Π} – площадь поверхности пузырька, м².

Коэффициент формы пузырька определяется по формуле

$$K_{\Phi} = \frac{S_{\Pi}}{f_{\Pi}}, \quad (3.19)$$

где f_{Π} – площадь поперечного сечения пузырька воздуха, м².

Коэффициент гидравлического сопротивления ζ всплытию пузырька зависит от режима всплытия и для общего случая мелко- и среднепузырчатой аэрации может определен по формуле

$$\zeta = 24/Re, \quad (3.20)$$

где Re – число Рейнольдса.

Скорость всплытия пузырька V_{Π} , м/с, также является функцией линейного размера пузырька и с достаточной точностью может быть определена по формуле Маленкова для всего спектра турбулентного всплытия:

$$V_{\Pi} = 0,8944 \cdot \left(1,625 \frac{2\sigma}{D_{\Pi}(\rho - \rho_{\Gamma})} + g \cdot D_{\Pi} \frac{\rho - \rho_{\Gamma}}{2\rho} \right)^{0.5}, \quad (3.21)$$

где 0,8944 и 1,625 – размерные коэффициенты;

D_{Π} – диаметр пузырька, м;

ρ и ρ_{Γ} – соответственно плотности жидкости и газа, кг/м³.

Таким образом, единственным неизвестным множителем при определении коэффициента использования кислорода в эрлифтном биореакторе является время контакта воздуха с водой. Очевидно, что за счет эрлифтного эффекта скорость всплытия относительно стенок реактора будет увеличиваться относительно V_{Π} . При этом, правило сложения скоростей жидкости и пузырька в этом случае не применимо, поскольку пузырьки не переносятся объемом воды, а всплывают в нем.

Для установления истинной величины времени контакта воды с воздухом, в зависимости от интенсивности подачи воздуха, проведена серия лабораторных экспериментов по методике, описанной в подразделе 2.2.1.

Варьируемыми параметрами в данной серии экспериментов являлись зазор козырька Z , м, (Рисунок 3.8.), а также интенсивность аэрации, которая представляет из себя отношение расхода воздуха, подаваемого в аэратор (Q_{air} в м³/ч) к площади затопленного эрлифта w_a , м²:

$$I_a = \frac{Q_{air}}{w_a}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (3.22)$$

Зазор между козырьком и эрлифтной колонной Z изменялся в трех положениях: $Z = 0,03\text{м}$, $0,07\text{м}$ и без устройства козырька, когда зазор фактически

соответствовал габариту сооружения $Z = 0.25\text{м}$. Интенсивность аэрации варьировалась ступенчато в 3 позиции в диапазоне $10\text{-}22\text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$.

Для получения более точного результата, в каждом стационарном эксперименте фиксировалось 3 видеокadra с частотой съемки 960 кадров/с. При обработке результатов в каждом из трех видеофайлов выбиралось три пузырька, для которых фиксировались расстояние и тайминг (время) прохождения этого расстояния. Количество кадров в замедленной съемке составляло 30 кадров/с, таким образом, для пересчета времени всплытия тайминг видеоредактора применялся с коэффициентом $30/960 = 32$. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.1. Конечным результатом эксперимента является абсолютная (относительно неподвижного наблюдателя) скорость всплытия пузырька воздуха.

Зависимость абсолютной скорости всплытия $V_{\text{абс.п.}}$ от интенсивности аэрации и величины зазора эрлифтного биореактора приведен на рисунке 3.9.

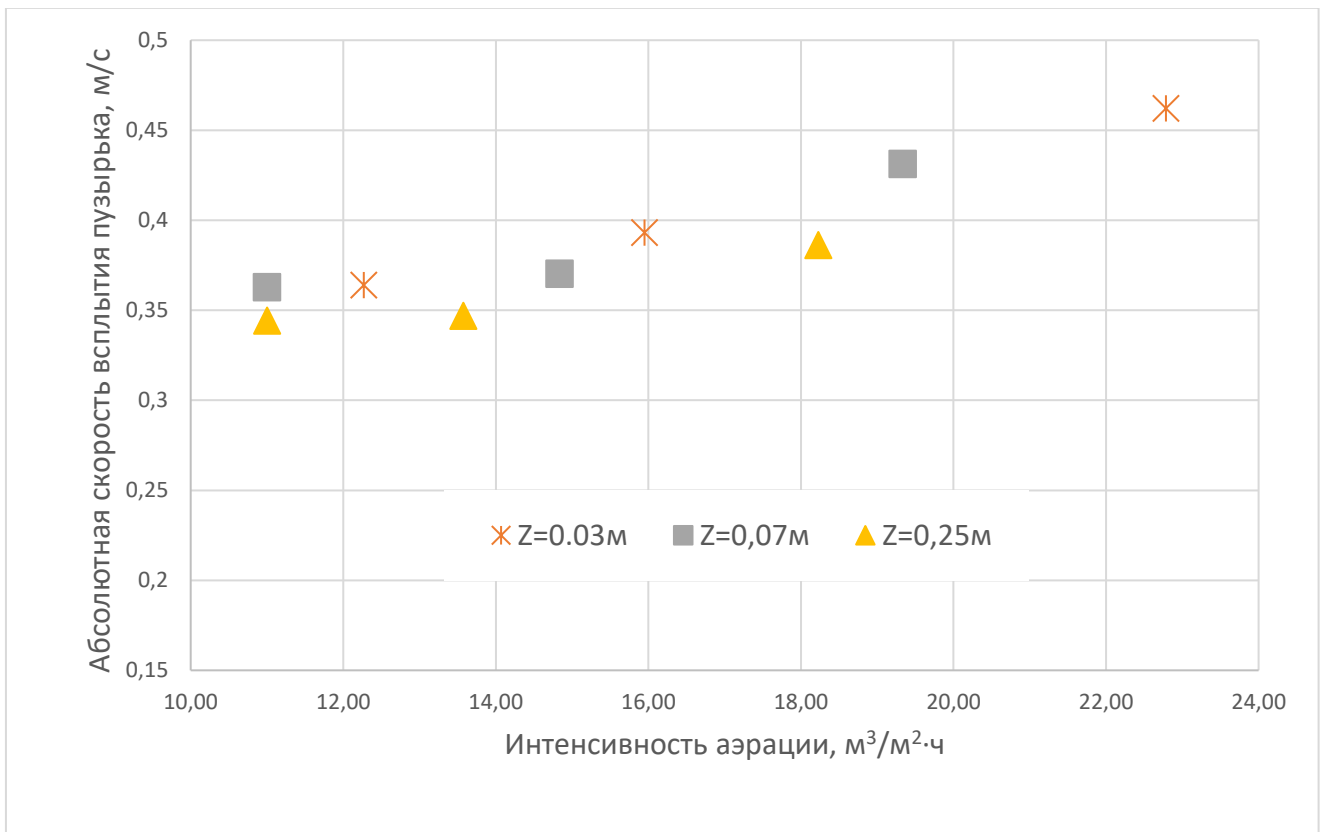


Рисунок 3.9. Зависимость абсолютной скорости всплытия $V_{\text{абс.п.}}$ от интенсивности аэрации и величины зазора эрлифтного биореактора.

Таблица 3.1. Результаты экспериментов по определению скорости всплытия пузырька.

№ п/п	Зазор, м	Интенс. аэр. м ³ /м ² ·ч	Измеренный путь 1, м	Тайминг начала отсчета 1, с	Тайминг конца отсчета 1, с	Время всплытия 1, с	Скорость всплытия 1, м/с	Измеренный путь 2, м	Тайминг начала отсчета 2, с	Тайминг конца отсчета 2, с	Время всплытия 2, с	Скорость всплытия 2, м/с	Измеренный путь 3, м	Тайминг начала отсчета 3, с	Тайминг конца отсчета 3, с	Время всплытия 3, с	Скорость всплытия 3, м/с	Средняя абсолютная скорость всплытия, м/с
1	0,03	12,27	8,5	1,401	8,843	0,233	0,365	6,7	5,317	11,529	0,194	0,345	7,2	6,384	12,851	0,202	0,356	0,364
2	0,03	12,27	7	1,45	6,886	0,170	0,412	5,5	6,433	11,612	0,162	0,340	6,5	8,566	13,687	0,160	0,406	
3	0,03	12,27	6,8	1,344	7,755	0,200	0,339	8	4,251	11,596	0,230	0,349	8	7,451	14,522	0,221	0,362	
4	0,03	15,95	9	1,359	8,6	0,226	0,398	5,6	3,184	8,05	0,152	0,368	6,2	6,384	12,379	0,187	0,331	0,393
5	0,03	15,95	6,8	1,383	7,794	0,200	0,339	7,5	5,317	11,215	0,184	0,407	6,5	7,451	12,888	0,170	0,383	
6	0,03	15,95	6,2	1,503	6,653	0,161	0,385	8	4,266	9,974	0,178	0,448	5,5	9,599	13,287	0,115	0,477	
7	0,03	22,79	7	1,521	6,843	0,166	0,421	6,2	4,266	8,07	0,119	0,522	6,2	8,07	12,19	0,129	0,482	0,462
8	0,03	22,79	7,8	1,645	6,652	0,156	0,499	5,4	3,184	6,816	0,114	0,476	6,6	6,816	12,971	0,192	0,343	
9	0,03	22,79	6,2	1,921	6,928	0,156	0,396	5,6	3,199	6,888	0,115	0,486	6,7	5,333	9,337	0,125	0,535	
10	0,07	19,33	7,6	2,265	7,263	0,156	0,487	5,5	5,317	9,694	0,137	0,402	5,8	7,45	10,996	0,111	0,523	0,431
11	0,07	19,33	5	5,317	8,834	0,110	0,455	5,3	6,384	10,761	0,137	0,387	5,7	8,517	13,153	0,145	0,393	
12	0,07	19,33	7,2	1,682	7,033	0,167	0,431	7,4	5,333	11,745	0,200	0,369	7,4	6,4	11,882	0,171	0,432	
13	0,07	14,84	7,7	1,447	6,67	0,163	0,472	6,2	4,25	9,631	0,168	0,369	3,8	7,45	12,286	0,151	0,251	0,370
14	0,07	14,84	7	1,516	6,446	0,154	0,454	7,5	3,199	8,981	0,181	0,415	7,2	4,266	10,134	0,183	0,393	
15	0,07	14,84	6,7	1,442	7,137	0,178	0,376	5,3	4,266	10,191	0,185	0,286	6,3	5,333	11,75	0,201	0,314	
16	0,07	11,00	6,7	1,347	7,989	0,208	0,323	5,5	4,251	9,635	0,168	0,327	5	6,384	10,82	0,139	0,361	0,363
17	0,07	11,00	6,2	1,503	7,515	0,188	0,330	6	3,184	8,598	0,169	0,355	5,5	6,384	11,764	0,168	0,327	
18	0,07	11,00	6,8	1,47	6,64	0,162	0,421	8,1	4,25	10,79	0,204	0,396	4,9	6,384	10,075	0,115	0,425	
19	0,25	11,00	7,1	1,319	8,614	0,228	0,311	8,4	5,333	11,972	0,207	0,405	5,8	7,466	11,724	0,133	0,436	0,344
20	0,25	11,00	5,9	1,416	6,705	0,165	0,357	5,2	3,2	8,146	0,155	0,336	5,2	6,4	11,346	0,155	0,336	
21	0,25	11,00	6,2	1,735	7,551	0,182	0,341	4,7	3,199	8,406	0,163	0,289	3,7	7,466	11,61	0,130	0,286	
22	0,25	18,23	5,9	1,496	6,323	0,151	0,391	6,3	4,266	9,414	0,161	0,392	6,5	5,333	10,309	0,156	0,418	0,386
23	0,25	18,23	5,6	1,358	5,388	0,126	0,445	5,5	3,2	8,061	0,152	0,362	4,9	5,334	9,653	0,135	0,363	
24	0,25	18,23	6,6	1,496	6,959	0,171	0,387	6,3	4,266	10,302	0,189	0,334	6	7,466	12,472	0,156	0,384	
25	0,25	13,57	6	1,575	7,525	0,186	0,323	6,7	5,333	11,529	0,194	0,346	5	5,333	10,453	0,160	0,313	0,347
26	0,25	13,57	5,7	1,591	7,255	0,177	0,322	4,9	5,317	10,094	0,149	0,328	6,6	6,384	11,675	0,165	0,399	
27	0,25	13,57	6,5	1,353	6,186	0,151	0,430	6,7	4,25	10,946	0,209	0,320	6,8	5,317	11,7	0,199	0,341	

Как видно из рисунка 3.9, абсолютная скорость всплытия пузырька не зависит от величины зазора между козырьком и затопленным эрлифтом и зависит только от интенсивности аэрации. Поскольку скорость всплытия одиночного пузырька V_{Π} , согласно общему подходу, зависит от диаметра пузыря и определяется по формуле 3.21, имеет смысл ввести понятие эжекционной прибавки скорости $V_{\text{эж}}$ (м/с), которая будет представлять из себя разность абсолютной скорости всплытия и скорости всплытия одиночного пузырька:

$$V_{\text{эж}} = V_{\text{абс.п.}} - V_{\Pi} . \quad (3.22)$$

Зависимость эжекционной прибавки скорости от интенсивности аэрации при подобных приведенным в подразделе 2.2.1 размерам сооружений будет идентична, что следует из законов подобия (теории размерностей), значит можно получить зависимость эжекционной прибавки скорости путем статистической обработки приведенных данных. Статистическая обработка выполнена в программе DataFit, результаты приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Результаты статистической обработки результатов экспериментов по определению зависимости эжекционной прибавки скорости от интенсивности аэрации.

Model Definition:		
$Y = a \cdot b^x$		
Residual tolerance = 0,0000000001		
Sum of Residuals = -1,32565139259716E-04		
Average Residual = -2,20941898766193E-05		
Residual Sum of Squares (Absolute) = 2,64316249664711E-04		
Residual Sum of Squares (Relative) = 2,64316249664711E-04		
Standard Error of the Estimate = 8,12890290360131E-03		
Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9688079974		
Proportion of Variance Explained = 96,88079974%		
Adjusted coefficient of multiple determination (R_a^2) = 0,9610099967		
Durbin-Watson statistic = 3,16372098423389		
Regression Variable Results		
99% Confidence Intervals		
Variable	Value	99% (+/-)
a	2,57890133788228E-02	1,73220163080558E-02
b	1,08692863586728	3,79168929503424E-02

Таким образом, путем обработки экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость эжекционной прибавки скорости от интенсивности аэрации вида:

$$V_{\text{эж}} = 0,0258 \cdot 1,087^{I_a}. \quad (3.23)$$

Полученная скорость, при суммировании со скоростью всплытия пузырька по формуле 3.21, может быть применена для определения времени контакта воздуха с водой ΔT в формуле для определения коэффициента использования кислорода (3.17) в эрлифтных биореакторах.

Для проверки адекватности предложенной зависимости 3.23 проведены лабораторные исследования по определению фактического коэффициента использования кислорода с использованием кислородомера АЖА-101.М (подраздел 2.2.1) (Рисунок 3.10).



Рисунок 3.10. Проведение экспериментов по определению коэффициента использования кислорода.

Предварительные поисковые исследования, а также анализ формулы (3.17) показал, что наиболее значимым параметром в определении коэффициента использования кислорода является концентрация растворенного в жидкости кислорода C , поэтому именно этот параметр использовался при варьировании.

Варьирование концентрации кислорода в жидкости выполнялось в диапазоне от 0 до 4 г/м³. 2 серии экспериментов проводились на разных глубинах погружения аэратора h_a – 0,5 и 0,2м. При расчете коэффициента использования кислорода учитывались температура воды и воздуха, барометрическое давление. Кислородомер располагался с наружной стороны затопленного эрлифта на глубине порядка 0,5м. При измерении учитывалась некоторая инертность датчика кислорода – показания снимались при установлении показаний концентрации. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Результаты экспериментов по определению коэффициента использования кислорода в эрлифтном биореакторе при интенсивности аэрации 18 м³/м²·ч.

h _a =0,5м			h _a =0,2м		
№ опыта	C, г/м ³	100 K _н	№ опыта	C, г/м ³	100 K _н
1	0	3,73	1	1,43	1,23
2	0	3,451	2	2,16	1,05
3	0	3,4	3	2,65	1,07
4	0	3,49	4	3,23	1,08
5	0	3,96	5	3,73	0,83
6	0,4	3,435	6	4,04	0,79
7	0,94	3,61	7	3,73	0,81
8	1,38	3,007	8	4,10	0,70
9	1,74	2,849	9	2,90	1,01
10	1,9	2,925	10	3,10	0,92
11	2,59	2,773	11	3,48	0,89
12	2,66	2,57			
13	2,79	2,632			
14	3,76	1,981			
15	2,91	2,64			
16	3,35	2,286			
17	3,58	1,937			

Сопоставлением полученных данных с расчетными по формуле (3.17) установлено, что при подстановке в качестве скорости всплытия V_{Π} как расчетной скорости по (3.21), так и абсолютной скорости с учетом эжекционной прибавки по (3.23) не дает удовлетворительной сходимости теоретических и расчетных данных. Это объясняется тем, что множитель V_{Π}^3 в формуле (3.17) является элементом

работы, совершаемой на границе раздела фаз. Отсюда очевидно, что ни скорость всплытия одиночного пузырька, ни абсолютная скорость всплытия не будут соответствовать критерию адекватности при определении работы на границе жидкости и газа.

Методом перебора установлено, в приемлемую сходимость можно получить при подстановке в уравнение 3.17 вместо величины V_{Π} приведенной скорости $V_{\Pi P}$, определенной по формуле:

$$V_{\Pi P} = V_{\Pi} + \frac{V_{\text{ЭЖ}}}{2}. \quad (3.24)$$

Таким образом, формула (3.17) при описании коэффициента использования кислорода в эрлифтных биореакторах (с учетом формул 3.22-3.24) примет вид:

$$K_{\text{И}} = \frac{\Delta C_{\Pi}}{C_{\text{КВ}}} = \frac{1}{\delta_{\Pi}} \sqrt{D_T \cdot \zeta \frac{\rho \cdot \left(V_{\Pi} + \frac{V_{\text{ЭЖ}}}{2}\right)^3}{2 \cdot \sigma \cdot K_{\phi}} \cdot \frac{C_{\text{Н}} - C}{C_{\text{КВ}}} \cdot \frac{h_a}{V_{\Pi} + 0,0258 \cdot 1,087 I_a}}. \quad (3.25)$$

Результаты расчета коэффициента использования кислорода по формуле (3.25) приведены в таблице 3.4. В качестве расчетной принята интенсивность аэрации $18 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, что соответствует аналогичному параметру в экспериментальных исследованиях. Значение коэффициента турбулентной диффузии принято по данным Данкверста в зависимости от температуры. В качестве характерного размера при определении числа Рейнольдса принят диаметр пузырька D_{Π} .

Таблица 3.4 Расчет значений коэффициента использования кислорода по формуле 3.25

Диаметр пузырька	Dп	м	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Объем пузырька	Wп	м ³	8,17708E-09	8,17708E-09	8,177E-09	8,177E-09	8,177E-09	8,1771E-09	8,1771E-09	8,177E-09	8,177E-09	8,177E-09
Площадь поверхности	Sp	м ²	0,000019625	0,000019625	1,963E-05	1,963E-05	1,963E-05	1,9625E-05	1,9625E-05	1,963E-05	1,963E-05	1,963E-05
Дисперсный размер	δп	м	0,0004167	0,0004167	0,0004167	0,0004167	0,0004167	0,0004167	0,0004167	0,0004167	0,0004167	0,0004167
Плотность жидкости	ρ	кг/м ³	998	998	998	998	998	998	998	998	998	998
Коэффициент пов. натяжения	σ	Н/м	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073
Коэф. турб. диффузии	Dт	м ² /с	1,85E-09	1,85E-09	1,85E-09	1,85E-09	1,85E-09	1,85E-09	1,85E-09	1,85E-09	1,85E-09	1,85E-09
Число Рейнольдса	Re		697,22	697,22	697,22	697,22	697,22	697,22	697,22	697,22	697,22	697,22
Коэффициент сопротивления	ζ		0,538422311	0,538422311	0,5384223	0,5384223	0,5384223	0,53842231	0,53842231	0,5384223	0,5384223	0,5384223
Поперечник пузырька	fп	м ²	9,8125E-06	9,8125E-06	9,813E-06	9,813E-06	9,813E-06	9,8125E-06	9,8125E-06	9,813E-06	9,813E-06	9,813E-06
Коэффициент формы	Kф		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Концентрация насыщения	Cн	кг/м ³	0,00887	0,00887	0,00887	0,00887	0,00887	0,00887	0,00887	0,00887	0,00887	0,00887
Концентрация растворенн. кислорода	C	кг/м ³	0,0002	0,0008	0,0017	0,0026	0,0033	0,0002	0,0008	0,0017	0,0026	0,0033
Концентрация кислорода в возд.	Cкв	кг/м ³	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277	0,277
Интенсивность аэрации	Iа	м ³ /м ² ·ч	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Глубина аэратора	hа	м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Скорость всплытия	Vабс	м/с	0,413934223	0,413794486	0,4137945	0,4137945	0,4137945	0,41393422	0,41379449	0,4137945	0,4137945	0,4137945
Приведенная скорость	Vприв	м/с	0,353467111	0,353397243	0,3533972	0,3533972	0,3533972	0,35346711	0,35339724	0,3533972	0,3533972	0,3533972
Время всплытия	ΔT	с	1,207921386	1,208329298	1,2083293	1,2083293	1,2083293	0,48316855	0,48333172	0,4833317	0,4833317	0,4833317
Коэффициент использования кислорода	Ки		0,035183091	0,032749621	0,0290972	0,0254449	0,0226041	0,01407324	0,01309985	0,0116389	0,0101779	0,0090417
		%	3,518309083	3,27496212	2,9097247	2,5444873	2,2604138	1,40732363	1,30998485	1,1638899	1,0177949	0,9041655

Сопоставление расчетных значений коэффициента использования кислорода по формуле 3.25 и экспериментальных данных таблицы 3.3 приведено на рисунках 3.11, 3.12.

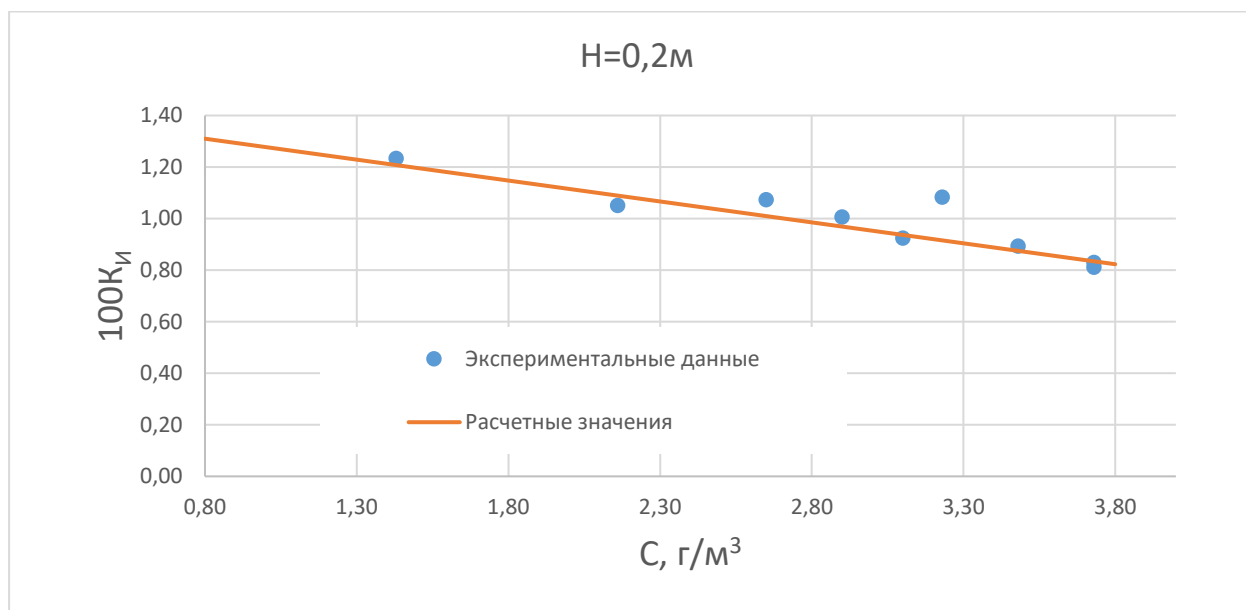


Рисунок 3.11. Коэффициент использования кислорода при глубине погружения аэратора 0,2 м.

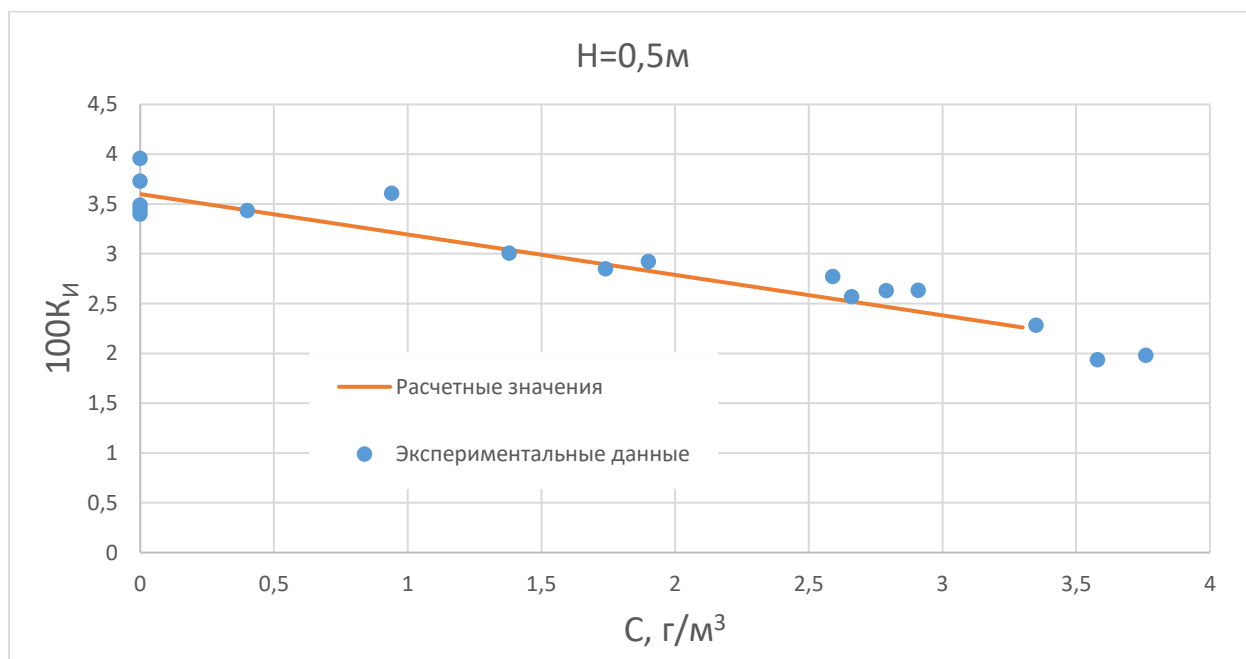


Рисунок 3.12. Коэффициент использования кислорода при глубине погружения аэратора 0,5 м.

Таким образом получены расчетные зависимости, позволяющие рассчитать коэффициент использования кислорода в эрлифтных биореакторах.

3.4. Илоотделение в самообновляющемся взвешенном слое

3.4.1 Исследование эффективности илоразделения в эрлифтных биореакторах.

Для описания работы осветлителя, на основании теорий Минца и Шуберта, сформулированы основные положения теоретического расчета взвешенного слоя активного ила [229].

За основу расчета принято положение, что потери гидродинамического давления в сформировавшемся взвешенном слое остаются неизменными – при росте скорости потока увеличивается объем взвешенного слоя.

Предложена теоретическая зависимость определения максимальной скорости восходящего потока во взвешенном слое (V_{max}):

$$V_{max} = \sqrt{\frac{d \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1)}{2 \cdot \rho_1 \cdot \xi}}, \text{ м/с} \quad (3.26)$$

где d – эквивалентный диаметр частиц ила, м;

ρ_1 и ρ_2 – плотность жидкости и плотность частиц ила соответственно, кг/м³;

ξ – коэффициент сопротивления, определяемый по формуле:

$$\xi = \frac{4 \cdot Ar}{3 \cdot Re^2}, \quad (3.27)$$

где Ar – критерий Архимеда;

Re – число Рейнольдса.

Для условий взвешенного слоя активного ила предложены следующие зависимости определения указанных безразмерных критериев:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \rho_1}{\mu^2}, \quad (3.28)$$

$$Re = \frac{\rho_2 \cdot V \cdot d}{\nu_M}, \quad (3.29)$$

где μ – динамическая вязкость жидкого компонента гетерофазной системы «вода – ил», Па·с;

ν_M – динамическая молярная вязкость системы «вода – ил», Па·с, определяемая в зависимости от объемной концентрации ила во взвешенном слое (C_v , %) по формуле:

$$\nu_M = \mu \cdot \left(1 + 2 \cdot C_v \cdot \left(\frac{1+C_v}{1-C_v} \right)^2 \right), \quad (3.30)$$

В контексте работы эрлифтных биореакторов, полученные зависимости нуждаются в уточнении [230]. Особенностью этого сооружения является самообновление взвешенного слоя осадка за счет циркуляционных токов внутри сооружения, создаваемых только за счет аэрации.

За счет устройства наклонного козырька (Рисунок 3.3), разделяющего зоны аэрации и осветления, в зазоре между наклонным козырьком и аэрационной колонной создается разряжение потока. Возникающий при этом эжекционный эффект способствует перемещению иловой массы из зоны осветления вниз, сонаправлено основному циркуляционному потоку.

Описанное выше гидравлическое явление создает в зоне осветления циркуляционный контур, который способствует постоянному обновлению активного ила во взвешенном слое, не разрушая его.

Для изучения процесса осветления в самообновляющемся взвешенном слое активного ила проведена серия полупромышленных испытаний работы эрлифтного биореактора на модельной установке. Опыты выполнялись с использованием активного ила аэротенков-вытеснителей канализационной очистной станции г. Макеевка.

Эффективность осветления во взвешенном слое активного ила в эрлифтном биореакторе зависит от циркуляционного расхода в затопленном эрлифте, нагрузки на зеркало осветлителя и концентрации активного ила в сооружении.

Для нахождения расхода иловой смеси в контуре сооружения с затопленной эрлифтной системой аэрации, используется понятие *интенсивности циркуляции* $I_{\text{ц}}$ ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$), и определяется по формуле:

$$I_{\text{ц}} = \frac{q_{\text{cir}}}{\omega_j}, \quad (3.31)$$

где ω_j – площадь зазора между эрлифтной колонной и наклонным козырьком, м.

При проведении опытно-промышленных исследований, интенсивность циркуляции варьировалась в пределах 135-359 м³/(м²·ч). Концентрация активного ила в биореакторе (a_i) изменялась от 2,72 до 4,35 г/дм³, а гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны осветлителя (q_s) – от 1,59 до 4,77 м³/(м²·ч). Функцией отклика в данном эксперименте являлась концентрация взвешенных веществ на выходе из эрлифтного биореактора C_{в.в} г/м³. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты экспериментов по определению концентрации взвешенных веществ на выходе из эрлифтного биореактора

Значения варьируемых факторов			Концентрации взвешенных веществ на выходе, мг/л			
			C _{в.в.i}			Среднее значение C _{в.в.ср}
a _i , г/л	q _s , м ³ /(м ² ·ч)	I _ц , м ³ /(м ² ·ч)	№ измерения			
			1	2	3	
2,72	1,59	262	19,45	20,6	21,5	20,52
2,72	3,18	262	33,75	34	29,3	32,35
2,72	4,77	262	41,55	44,2	41,7	42,48
3,27	1,59	247	10,3	8,75	10,5	9,85
3,27	1,59	318	18,1	14,9	18,3	17,10
3,27	1,59	359	39,4	40,7	40,8	40,30
4,35	1,59	135	10,8	6,8	9,2	8,93
4,35	2,58	170	11,5	8,9	12,3	10,90
4,35	3,38	170	19,2	20,1	17,1	18,80
6,97	1,59	247	8,5	8,8	6,9	8,07

Обработка полученных результатов с помощью программного комплекса DataFit позволила получить зависимость величины допустимой гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны осветлителя:

$$q_s = 0,377 \cdot \frac{C_{в.в}^{1,19} \cdot a_i^{0,451}}{1,0078^{1,19} I_{ц}} \quad (3.32)$$

На рисунке 3.13 представлены графическое отображение зависимости допустимой гидравлической нагрузки от интенсивности циркуляции для различных концентраций активного ила в эрлифтном биореакторе. Графики

построены на основании вычислений, выполненных по формуле 3.41 при расчётной концентрации взвешенных веществ в очищенной жидкости 15 мг/л.

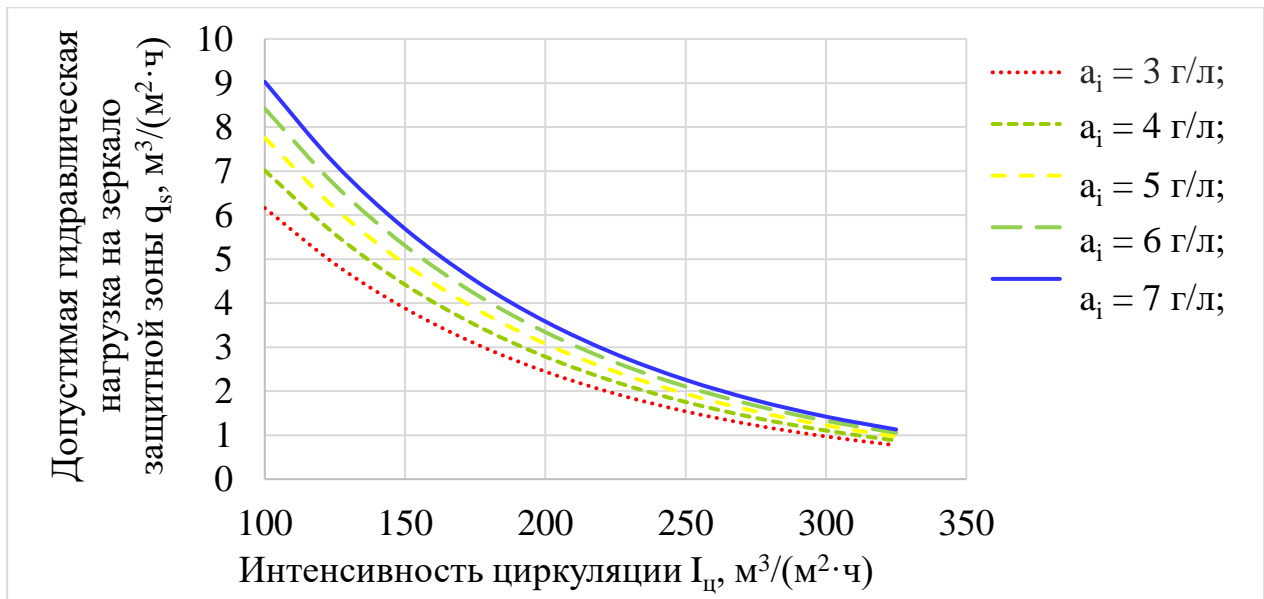


Рисунок 3.13 – Расчётные значения максимальной гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны

Минимальная интенсивность циркуляции при этом определяется по формуле:

$$I_{\text{ц.мин}} = 15900 \cdot v_{\text{ос}} \cdot H^{0,22} \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot h_w}{B_j} + 0,41}, \quad (3.33)$$

где $v_{\text{ос}}$ – скорость осаждения частиц активного ила, принимаемая около 0,0002–0,0005 м/с, в зависимости от концентрации ила;

H – рабочая глубина аэротенка, м;

h_w – высота нижней кромки козырька от дна аэротенка, м;

B_j – ширина зазора между стенкой эрлифта и наклонным козырьком, м.

В приведенных уравнениях есть величина, способная в 2 раза изменить лимитирующий фактор $I_{\text{ц.мин}}$ – это скорость осаждения частиц активного ила. Поскольку речь идет о концентрациях более 3 г/л, будет происходить осаждение II–III типа – стесненное осаждение флоккул и частиц, имеющих тенденцию к хлопьеобразованию.

Фактическая скорость осаждения зависит от большого количества факторов: фракционного состава активного ила, биологического разнообразия,

биохимических процессов и т.д. В практике расчета систем седиментации в зависимости, описывающие системы осаждения ила вводят коэффициент надежности R , который может достигать значения 5 единиц, то есть фактические скорости осаждения временами могут быть в 5 раз меньше расчетных, что нивелирует любые теоретические зависимости, которые могут быть получены. Вопрос нижнего порога интенсивности циркуляции, в связи с этим, предлагается решать по факту действующих сооружений.

Приведенные зависимости позволяют дополнить общую математическую модель БОСЭБ уравнениями обмена масс между зонами насыщения и потребления кислорода с применением циркуляционного расхода q_{cir} .

Кроме того, зависимость 3.41 связывает гидравлические параметры работы сооружения с эффективностью вторичного илоразделения, что позволяет внести в имитационную модель (подраздел 2.3) покомпонентные уравнения для нерастворенных веществ, основанные на коэффициенте илоразделения:

$$gwk = \frac{C_{\text{B.B}}}{1000a_i} = \frac{X_i^{\text{out}}}{X_i^{\text{ins}}}, \quad (3.42)$$

где X_i^{out} - концентрация i -того нерастворенного компонента ASM в осветленном очищенном стоке, г/м³;

X_i^{ins} - концентрация i -того нерастворенного компонента ASM в биореакторе, г/м³.

Полученные зависимости рекомендуется использовать при расчете эрлифтных биореакторов с самообновляющимся взвешенным слоем активного ила.

3.4.2 Определение мнимой максимальной гидравлической крупности при осветлении (полуэмпирическая теория самообновляющегося взвешенного слоя)

Полученные в подразделе 3.4.1. зависимости позволяют определить усредненные параметры скоростей осветления во взвешенном слое. Так, максимальные скорости восходящего потока, рассчитанные по уравнениям (3.26-

3.30) сводятся к значениям 0,7-1,2 мм/с для параметров работы эрлифтных биореакторов, что соответствует нагрузке 2,5-4,3 м³/(м²·ч) на площадь осветления.

Эмпирическая зависимость (3.32) указывает на диапазон нагрузок 3-7 м³/(м²·ч) на зеркало защитной зоны, что в пересчете на площадь осветления составляет 0,6-1,4 м³/(м²·ч) (соотношение площади осветления и защитной зоны в эрлифтном биореакторе принято 5:1), что соответствует скоростям 0,16-0,38 мм/с.

В то же время, визуально можно наблюдать, что не вся зона осветления работает в режиме восходящего потока. Численное решение задач гидродинамики сооружения (подраздел 3.2.) указывают на следующую эпюру вертикальных скоростей в сооружении – рисунок 3.14.

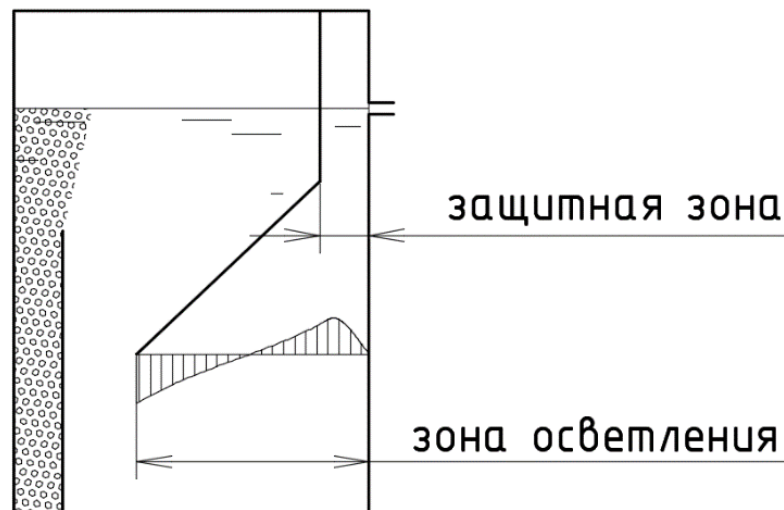


Рисунок 3.14 – Схема эюры скоростей в зоне осветления.

Приведенный характер распределения вертикальных скоростей в зоне осветления подтверждается полупромышленными исследованиями и наблюдался визуально. Это указывает на необходимость нахождения максимальной вертикальной скорости в осветлителе, поскольку именно она будет оказывать наибольшее влияние на вынос частиц ила из сооружения.

Для нахождения максимальных скоростей в зоне осветления выполнено численное моделирование (подраздел 3.2.) работы эрлифтного биореактора при различных интенсивностях аэрации и нагрузках по очищаемому стоку. Интенсивность аэрации I_a варьировалась в диапазоне 10 – 20 м³/(м²·ч), нагрузка на

зеркало защитной зоны q_s – в пределах $2,2 - 11 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Результаты численного моделирования приведены таблице 3.6.

Полученные результаты позволяют определить зависимость максимальной вертикальной скорости в осветлителе как функцию интенсивности циркуляции $I_{\text{ц}}$ и нагрузки на зеркало защитной зоны осветлителя. В программном комплексе Data Fit получена зависимость вида:

$$V_s = 1,125 \cdot 1,013^{I_{\text{ц}}} \cdot q_s^{0,17}, \quad (3.43)$$

где V_s – максимальная вертикальная скорость в осветлителе эрлифтного биореактора.

Графическое отображение зависимости приведено на рисунке 3.15.

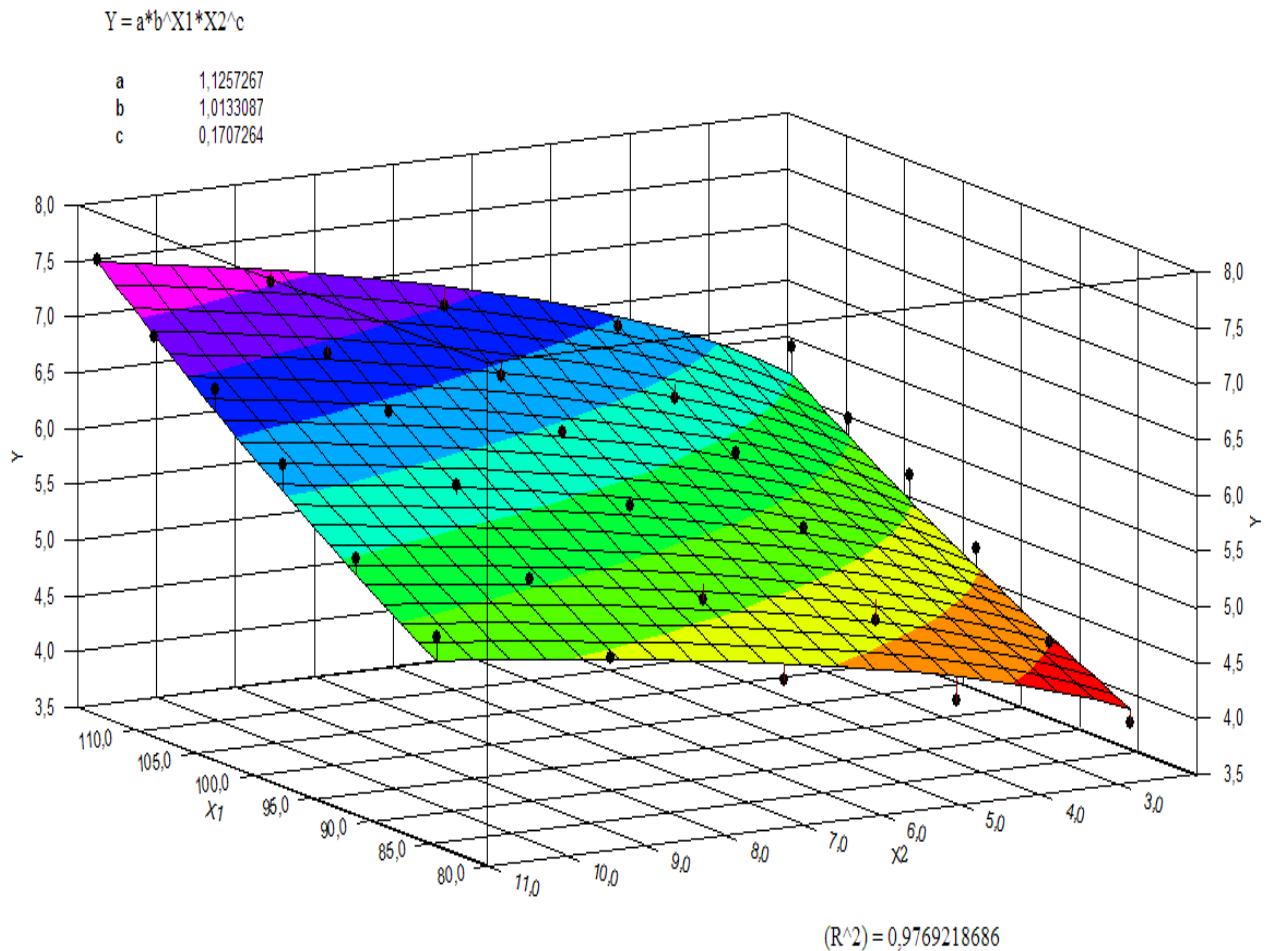


Рисунок 3.15 - Графическое отображение зависимости 3.43.

Таблица 3.6. Результаты численного моделирования скоростей в характерных точках осветителя.

Ia	qсiг, м³/с	Иц, м/ч	Wс, мм/с	Wio, мм/с	qс, м/ч	Скорости в т. 60;85		Скорости в т. 60; 90	
						Восх	по X	Восх	по X
10	0,0005	84	44	1	2,2	3,81	-4,43	2,5	-1,8
		84		2	4,4	4,2	-3,81	2,98	-1,53
		84		3	6,6	4,59	-3,19	3,46	-1,26
		84		4	8,8	4,99	-2,57	3,94	-0,99
		84		5	11	5,38	-1,94	4,42	-0,73
12	0,000541	91	47	1	2,2	4,25	-4,77	2,84	-1,94
		91		2	4,4	4,64	-4,15	3,32	-1,67
		91		3	6,6	5,03	-3,53	3,8	-1,4
		91		4	8,8	5,42	-2,91	4,28	-1,13
		91		5	11	5,81	-2,29	4,76	-0,87
14	0,000578	97	51	1	2,2	4,83	-5,23	3,3	-2,13
		97		2	4,4	5,22	-4,61	3,78	-1,86
		97		3	6,6	5,62	-3,99	4,26	-1,59
		97		4	8,8	6,01	-3,37	4,74	-1,32
		97		5	11	6,4	-2,75	5,22	-1,05
16	0,000612	103	54	1	2,2	5,27	-5,58	3,64	-2,27
		103		2	4,4	5,66	-4,96	4,12	-2
		103		3	6,6	6,05	-4,34	4,6	-1,73
		103		4	8,8	6,44	-3,71	5,08	-1,46
		103		5	11	6,84	-3,09	5,56	-1,2
18	0,000643	108	56	1	2,2	5,56	-5,81	3,87	-2,36
		108		2	4,4	5,95	-5,19	4,35	-2,09
		108		3	6,6	6,34	-4,56	4,83	-1,83
		108		4	8,8	6,74	-3,94	5,31	-1,56
		108		5	11	7,1	-3,32	5,79	-1,29
20	0,000672	113	59	1	2,2	6	-6,5	4,21	-2,5
		113		2	4,4	6,39	-5,53	4,69	-2,23
		113		3	6,6	6,78	-4,91	5,17	-1,97
		113		4	8,8	7,2	-4,29	5,65	-1,7
		113		5	11	7,6	-3,67	6,13	-1,43

Решая совместно зависимости (3.32) и (3.43), получим уравнение для определения максимальной вертикальной скорости:

$$V_s = 0,95 \cdot C_{\text{вв}}^{0,2023} \cdot a_i^{0,0767} \cdot e^{0,0112I_{\text{ц}}}. \quad (3.44)$$

Данная зависимость расширяет возможности использования формулы (3.32) и, по сути, представляет из себя мнимую максимальную гидравлическую

крупность частиц активного ила, выносимых из самообновляющегося взвешенного слоя при иловом индексе 80-100 см³/г.

Для учета возможного изменения седиментационных свойств активного ила (выраженных через иловый индекс), проведена дополнительная серия экспериментов на разных типах ила – из экспериментальной установки КНС№52 г. Донецка и из Макеевских КОС. Для разной величины илового индекса варьировалась интенсивность аэрации с измерением величины выноса активного ила. Результаты экспериментов приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7. Результаты экспериментов по определению влияния илового индекса на эффективность осветления во взвешенном слое.

Иловый индекс, I см ³ /г	Концентрация взвешенных веществ на выходе из осветлителя, г/м ³ , при интенсивности аэрации, м ³ /(м ² ·ч):			
	12	15	18	20
95	14	18	24	26
100	14	20	24	27
105	16	22	26	34
120	17	24	27	35

Как видно из таблицы 3.7 для величины илового индекса 95 и 100 см³/г эффект осветления практически не изменялся. Для оценки влияния седиментационных свойств на мнимую гидравлическую крупность частиц активного ила, выносимых из самообновляющегося взвешенного слоя, воспользуемся формулой 3.44.

Результаты расчета приведены на рисунке 3.16. Как видно, при увеличении илового индекса мнимая гидравлическая крупность выносимых частиц растет, что требует уменьшения нагрузки на осветлитель до достижения величин скорости меньших, чем полученные при расчете.

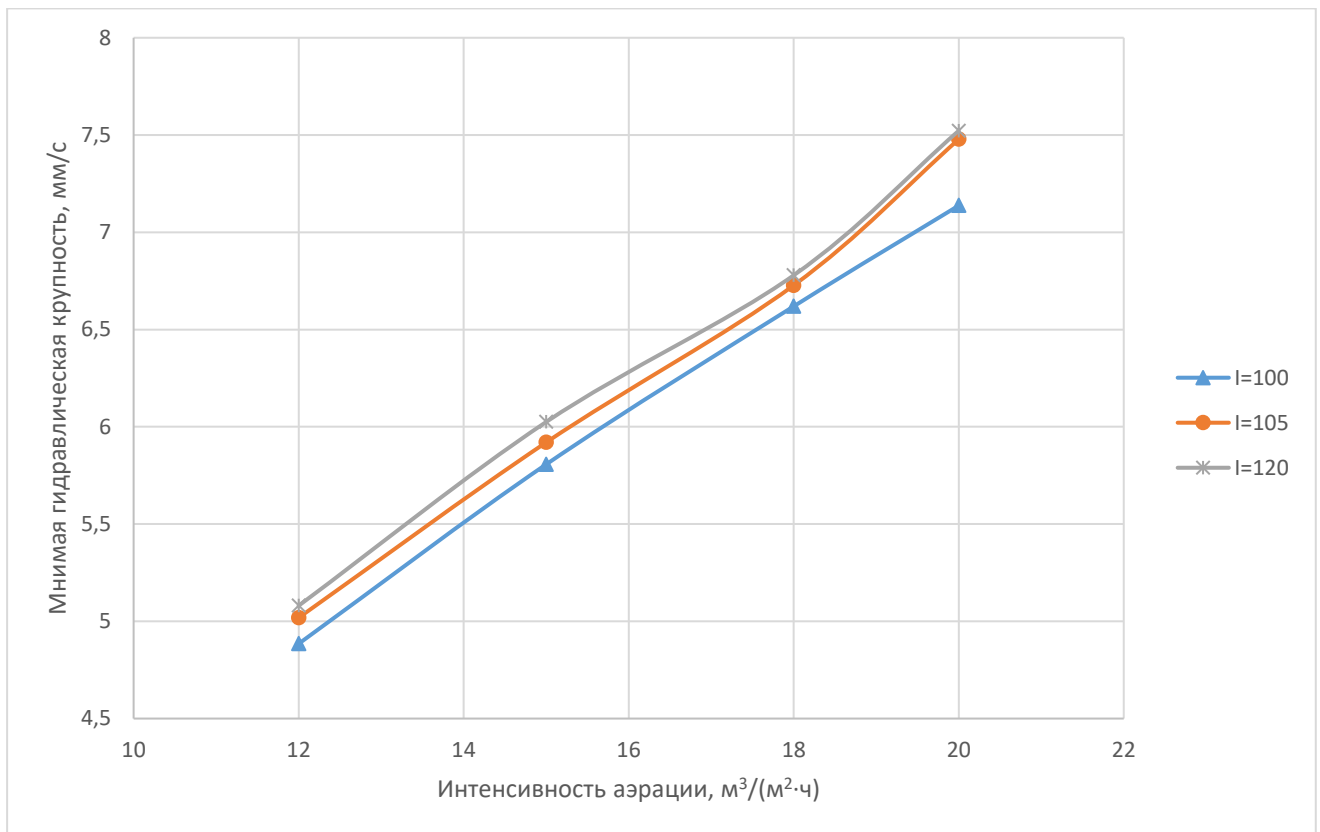


Рисунок 3.16. Зависимость мнимой гидравлической крупности выносимых частиц из самообновляющегося взвешенного слоя от интенсивности аэрации и илового индекса.

Положения данного раздела, а также раздела 3.2. представляют из себя **полуэмпирическую теорию самообновляющегося взвешенного слоя**, в которой предложено описание илоразделения в эрлифтных биореакторах на основании численного решения уравнений Навье-Стокса и экспериментальных данных.

Полученные зависимости достаточно полно описывают процессы в самообновляющемся взвешенном слое активного ила в эрлифтном биореакторе и позволяют с достаточной степенью достоверности прогнозировать задержание нерастворенных компонентов при илоотделении в этих сооружениях.

3.5. Имитационная модель одновременной нитри-денитрификации с учетом преобразования соединений фосфора ASM3P-2SND

Существующие имитационные модели, рассмотренные в первой главе, характеризуются рядом недостатков, которые затрудняют их применение для

описания биологических процессов в системах с одновременной нитри-денитрификацией. Ни одна из существующих моделей не учитывает диффузионные ограничения субстрата, кислорода и биогенных элементов в системах с активным илом, что становится актуально при моделировании процессов SND (ОНД – одновременной нитри-денитрификации). Большинство распространенных моделей не разделяют нитрат и нитрит, а учитывающие двухступенчатость процессов нитри-денитрификации не учитывают преобразования фосфора в этих процессах. Так, высвобождение фосфора при гидролизе нерастворенного субстрата X_s , согласно моделям ASM3+Bio-P, New General, УСТРНО+, ASM2d+TUD составляет 0,005-0,01 г/м³ при гидролизе 1 г/м³ нерастворенного органического субстрата. Другие модели (ASM1, ASM3) не учитывают преобразования соединений фосфора.

Отсутствие такие решений дает результативные ошибки как при имитационном моделировании, так и при проектировании систем водоотведения. Очевидно, что в процессе биологической очистки, концентрация фосфатов на выходе может оказаться выше концентрации на входе из-за гидролизного разложения нерастворенного субстрата.

Реализация технологии УБУФ (улучшенного биологического удаления фосфора) на станциях малой производительности (до 5000 м³/сут) обоснованно считается не рациональной, на станциях средней производительности (5000-10000 м³/сут) нуждается в соответствующем технико-экономическом обосновании. В связи с этим, в научном поле имитационного моделирования в настоящее время отсутствует модель, соответствующая следующим требованиям:

- модель должна учитывать преобразования соединений фосфора при жизнедеятельности ординарных гетеротрофов и нитри-денитрификации, даже без культивирования ФАО (фосфор-аккумулирующих микроорганизмов);
- модель должна описывать взаимные преобразования окисленных форм азота – отдельно нитратов и нитритов, поскольку эти вещества отдельно состоят в списке ЦТП и нормируются действующим законодательством;

- модель должна учитывать диффузионные ограничения проникновения субстратов и кислорода в хлопок активного ила при одновременной нитри-денитрификации.

В настоящее время, имитационной модели, соответствующей всем указанным требованиям, не существует и ее создание является одной из задач данной работы. Для решения этого вопроса предложена новая модель активного ила – **ASM3P-2SND**:

- «ASM3» в написании модели обозначает, что использована теория эндогенного дыхания микроорганизмов без разделения растворенного субстрата на ЛЖК (летучие жирные кислоты) и иную органику (что характерно для подхода ASM2d, New General, UCTPHO+);
- индекс «P» обозначает, что модель учитывает преобразования соединений фосфора при жизнедеятельности ординарных гетеротрофов и нитри-денитрификации (в отличие от модели Bio-P, где учитываются процессы УБУФ);
- «2..ND» – обозначает, что модель учитывает двухступенчатую нитри-денитрификацию (2 окислительных и 2 восстановительных процесса), а именно: автотрофные процессы нитритации и нитратации, гетеротрофные процессы восстановления нитрата и нитрита;
- индекс «S» в «2SND» обозначает, что учитываются диффузионные ограничения одновременности процессов нитри-денитрификации.

На основании рассмотренных в первой главе биологических процессов в системах с активным илом, предложено включить в модель ASM3P-2SND 19 процессов. Скорости этих реакций на основании кинетики Моно приведены в таблице 3.8, отличия от существующих моделей выделены жирным шрифтом.

Таблица 3.8. Процессы ASM3P-2SND и выражения скорости реакций.

№	Процесс	Скорость
1	Гидролиз	$k_H^*(X_S/X_H)/(K_X+X_S/X_H)*X_H$
2	Аэробное накопление X_{STO}	$k_{STO}*[S_O/(K_{O,H}+S_{O2})]*[S_S/(K_{SS,H}+S_S)]*X_H$
3	Аноксидное накопление X_{STO} при NO_3-NO_2	$k_{STO}*\eta_{NO3}*[K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O}*S_{O2})]*[S_{NO3}/(K_{NO3,H}+S_{NO3})]*[K_{D,SS}*S_S/(K_{SS,H}+K_{D,SS}*S_S)]*X_H$
4	Аноксидное накопление X_{STO} при NO_2-N_2	$k_{STO}*\eta_{NO2}*[K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O}*S_{O2})]*[S_{NO2}/(K_{NO2,H}+S_{NO2})]*[K_{D,SS}*S_S/(K_{SS,H}+K_{D,SS}*S_S)]*X_H$
5	Аэробный рост X_H	$\mu_H^*[S_{O2}/(K_{O,H}+S_{O2})]*[S_{NH4}/(K_{NH4,H}+S_{NH4})]*[S_{ALK}/(K_{HCO,H}+S_{ALK})]*[S_{PO4}/(K_{PO4,H}+S_{PO4})]*[(X_{STO}/X_H)/(K_{STO}+X_{STO}/X_H)]*X_H$
6	Аноксидный рост X_H (денитрификация) NO_3-NO_2	$\mu_H^*\eta_{NO3}*[K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O}*S_{O2})]*[S_{NO3}/(K_{NO3,H}+S_{NO3})]*[S_{NH4,H}/(K_{NH4,H}+S_{NH4})]*[S_{ALK}/(K_{HCO,H}+S_{ALK})]*[S_{PO4}/(K_{PO4,H}+S_{PO4})]*[(X_{STO}/X_H)/(K_{STO}+X_{STO}/X_H)]*X_H$
7	Аноксидный рост X_H (денитрификация) NO_2-N_2	$\mu_H^*\eta_{NO2}*[K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O}*S_{O2})]*[S_{NO2}/(K_{NO2,H}+S_{NO2})]*[S_{NH4}/(K_{NH4,H}+S_{NH4})]*[S_{ALK}/(K_{HCO,H}+S_{ALK})]*[S_{PO4}/(K_{PO4,H}+S_{PO4})]*[(X_{STO}/X_H)/(K_{STO}+X_{STO}/X_H)]*X_H$
8	Аэробное эндогенное дыхание X_H	$b_{H,O2}*[S_{O2}/(K_{O,H}+S_{O2})]*X_H$
9	Аноксидное эндогенное дыхание X_H NO_3-NO_2	$b_{H,O2}*\eta_{H,endNO3}*[K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O}*S_{O2})]*[S_{NO3}/(K_{NO3,H}+S_{NO3})]*X_H$
10	Аноксидное эндогенное дыхание X_H NO_2-N_2	$b_{H,O2}*\eta_{H,endNO2}*[K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O}*S_{O2})]*[S_{NO2}/(K_{NO2,H}+S_{NO2})]*X_H$
11	Аэробное разложение X_{STO}	$b_{STO,O2}*[S_{O2}/(K_{O,H}+S_{O2})]*X_{STO}$
12	Аноксидное разложение X_{STO} NO_3-NO_2	$b_{STO,O2}*\eta_{H,endNO3}*[K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O}*S_{O2})]*[S_{NO3}/(K_{NO3,H}+S_{NO3})]*X_{STO}$
13	Аноксидное разложение X_{STO} NO_2-N_2	$b_{STO,O2}*\eta_{H,endNO2}*[K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O}*S_{O2})]*[S_{NO2}/(K_{NO2,H}+S_{NO2})]*X_{STO}$
14	Рост X_{AOB} (Нитритация)	$\mu_{AOB}*[S_{O2}/(K_{O,AOB}+S_{O2})]*[S_{NH4}/(K_{NH4,AOB}+S_{NH4})]*[S_{PO4}/(K_{PO4,A}+S_{PO4})]*[S_{ALK}/(K_{HCO,A}+S_{ALK})]*X_{AOB}$
15	Аэробное эндогенное дыхание X_{AOB}	$b_{AOB}*[S_{O2}/(K_{O,AOB}+S_{O2})]*X_{AOB}$
16	Аноксидное эндогенное дыхание X_{AOB}	$b_{AOB}*\eta_{AOB}[K_{O,AOB}/(K_{O,AOB}+S_{O2})]*[S_{NO3}/(K_{NO3,H}+S_{NO3})]*X_{AOB}$
17	Рост X_{NOB} (Нитратация)	$\mu_{NOB}*[S_{O2}/(K_{O,NOB}+S_{O2})]*[S_{NH4}/(K_{NH4,H}+S_{NH4})]*[S_{NO2}/(K_{NO2,NOB}+S_{NO2})]*[S_{PO4}/(K_{PO4,A}+S_{PO4})]*[S_{ALK}/(K_{HCO,A}+S_{ALK})]*X_{NOB}$
18	Аэробное эндогенное дыхание X_{NOB}	$b_{NOB}*[S_{O2}/(K_{O,NOB}+S_{O2})]*X_{NOB}$
19	Аноксидное эндогенное дыхание X_{NOB}	$b_{NOB}*\eta_{NOB}*[K_{O,NOB}/(K_{O,NOB}+S_{O2})]*[S_{NO3}/(K_{NO3,H}+S_{NO3})]*X_{NOB}$

Компоненты и параметры предлагаемой имитационной модели представлены в таблице 3.9. При этом отсутствие значения параметра (жирный шрифт) указывает на необходимость его обязательной калибровки в рамках данной работы. Скорости роста микроорганизмов также могут калиброваться, хоть и приняты по справочной литературе для температуры 20°C.

Таблица 3.9. Компоненты и параметры модели ASM3P-2SND.

Группа	Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Знач. при T=20°C
1	2	3	4	5
Компоненты системы	Растворенный кислород	S_O	- г ХПК.м ⁻³	
	Растворенная биоразлагаемая органика	S_S	г ХПК.м ⁻³	
	Аммонийные соединения (NH ₄ ⁺ + NH ₃)	S_{NH}	г N.м ⁻³	
	Нитрит (NO ₂)	S_{NO2}	г N.м ⁻³	
	Нитрат (NO ₃)	S_{NO3}	г N.м ⁻³	
	Растворенный газообразный азот	S_{N2}	г N.м ⁻³	
	Фосфат	S_{PO4}	г P.м ⁻³	
	Щелочность (HCO ₃ ⁻)	S_{ALK}	моль HCO ₃ ⁻ .м ⁻³	
	Растворенная не биоразлагаемая органика	S_I	г ХПК.м ⁻³	
	Нерастворенная не биоразлагаемая органика	X_I	г ХПК.м ⁻³	
	Нерастворенная биоразлагаемая органика	X_S	г ХПК.м ⁻³	
	Ординарные гетеротрофы	X_H	г ХПК.м ⁻³	
	Накопленный продукт в ординарных гетеротрофах	X_{STO}	г ХПК.м ⁻³	
	Автотрофные нитрификаторы (NH ⁺ в NO ₂) АОВ	X_{AOB}	г ХПК.м ⁻³	
	Автотрофные нитрификаторы (NO ₂ в NO ₃) НОВ	X_{NOB}	г ХПК.м ⁻³	
Взвешенные вещества	X_{TSS}	г м ⁻³		
Стехиометрия из ASM3	Количество инертного ХПК, производимого при гидролизе	f_{SI}	г Si. г X _S ⁻¹	0
	Продуктивность роста X _H на единицу накопленного продукта X _{STO} (Аэробные условия)	$Y_{H,O2}$	г X _H . г X _{STO} ⁻¹	0,63
	Продуктивность получения X _{STO} на единицу S _S (Аэробные условия)	$Y_{STO,O2}$	г X _{STO} .г S _S ⁻¹	0,85
	Количество нерастворенной инертной органики, производимой при разложении X _H	f_{Xi}	г X _i .г X _H ⁻¹	0,2
	Содержание N в S _S	$i_{N,SS}$	г N.г S _S ⁻¹	0,03
	Содержание N в S _I	$i_{N,SI}$	г N.г S _I ⁻¹	0,01
	Содержание N в X _I	$i_{N,XI}$	г N.г X _I ⁻¹	0,02
	Содержание N в X _S	$i_{N,XS}$	г N.г X _S ⁻¹	0,04
	Содержание N в биомассе (всех организмов)	$i_{N,BM}$	г N.г X _{H,AOB,NOB} ⁻¹	0,07
	Перевод X _I в a _i	$i_{SS,XI}$	г. г X _I ⁻¹	0,75
	Перевод X _S в a _i	$i_{SS,XS}$	г. г X _S ⁻¹	0,75
	Перевод X _{STO} в a _i	$i_{SS,BM}$	г. г X _{STO} ⁻¹	0,9
	Перевод X _{H, AOB,NOB} в a _i	$i_{SS,STO}$	г. г X _{H, AOB,NOB} ⁻¹	0,6

1	2	3	4	5
Кинетика из ASM3	Максимальная удельная скорость гидролиза	k_H	$г X_s.г X_H^{-1}.сут^{-1}$	9
	Коэффициент полунасыщения гетеротрофов	K_X	$г X_s.г X_H^{-1}$	1
	Константа скорости накопления	k_{STO}	$г X_s.г X_H^{-1}.сут^{-1}$	12
	Максимальная скорость роста гетеротрофов	μ_H	$сут^{-1}$	3
	Коэффициент полунасыщения Ss	$K_{SS,H}$	$г S_s.M^{-3}$	2
	Коэффициент полунасыщения накопленного продукта	K_{STO}	$г X_{Sto}.г X_{OHO}^{-1}$	1
	Коэффициент эндогенного дыхания гетеротрофов	b_{H,O_2}	$сут^{-1}$	0,3
	Коэффициент эндогенного дыхания накопленного продукта (Аэробный)	b_{STO,O_2}	$сут^{-1}$	0,2
	Коэффициент полунасыщения кислорода S_{O_2}	$K_{O,H}$	$г S_{O_2}.M^{-3}$	0,2
	Коэффициент полунасыщения ахота аммонийного S_{NH}	$K_{NH_4,H}$	$г S_{NH}.M^{-3}$	0,01
	Коэффициент полунасыщения щелочностью S_{Alk}	$K_{HCO_3,H}$	моль $HCO_3^- .M^{-3}$	0,1
	Параметры 2SND	Продуктивность аноксидного роста гетеротрофов NO_3-NO_2	$Y_{H:NO_3}$	$г ХПК.г ХПК^{-1}$
Продуктивность аноксидного роста гетеротрофов NO_2-N_2		$Y_{H:NO_2}$	$г ХПК.г ХПК^{-1}$	0,65
Продуктивность накопления X_{STO} при аноксидном росте NO_3-NO_2		$Y_{STO:NO_3}$	$г ХПК.г ХПК^{-1}$	0,7
Продуктивность накопления X_{STO} при аноксидном росте NO_2-N_2		$Y_{STO:NO_2}$	$г ХПК.г ХПК^{-1}$	0,7
Понижающий коэффициент денитрификации NO_3-NO_2		η_{NO_3}		калибр
Понижающий коэффициент денитрификации NO_2-N_2		η_{NO_2}		калибр
Понижающий коэффициент b_H , в аноксидных условиях NO_3-NO_2		$\eta_{H,endNO_3}$		0,4
Понижающий коэффициент b_H , в аноксидных условиях NO_2-N_2		$\eta_{H,endNO_2}$		0,5
Продуктивность X_{AOB}		Y_{AOB}	$г ХПК.г N^{-1}$	0,18
Продуктивность X_{NOB}		Y_{NOB}	$г ХПК.г N^{-1}$	0,06
Максимальная скорость роста X_{AOB}		μ_{AOB}	$сут^{-1}$	калибр
Максимальная скорость роста X_{NOB}		μ_{NOB}	$сут^{-1}$	калибр
Коэффициент эндогенного дыхания X_{AOB}		b_{AOB}	$сут^{-1}$	0,15
Коэффициент эндогенного дыхания X_{NOB}		b_{NOB}	$сут^{-1}$	0,22
Коэффициент полунасыщения нитратом		$K_{NO_3,H}$	$г N.M^{-3}$	0,5
Коэффициент полунасыщения нитритом		$K_{NO_2,H}$	$г N.M^{-3}$	0,5
Коэффициент полунасыщения кислородом AOB		$K_{O,AOB}$	$г S_{O_2}.M^{-3}$	0,8
Коэффициент полунасыщения кислородом NOB		$K_{O,NOB}$	$г S_{O_2}.M^{-3}$	0,8
Коэффициент полунасыщения азотом аммонийным при автотрофном росте		$K_{NH_4,AOB}$	$г N.M^{-3}$	0,14
Коэффициент полунасыщения азотом нитритов при автотрофном росте		$K_{NO_2,NOB}$	$г N.M^{-3}$	0,28
Коэффициент полунасыщения щелочностью при автотрофном росте		$K_{HCO_3,A}$	моль $HCO_3^- .M^{-3}$	0,5
Понижающий коэффициент для b_{AOB} , в аноксидных условиях		η_{AOB}		0,1
Понижающий коэффициент для b_{NOB} , в аноксидных условиях	η_{NOB}		0,1	

1	2	3	4	5
Р-параметры	Содержание Р в S_s	$i_{P,SS}$	$\Gamma \text{ P.} \Gamma S_s^{-1}$	0
	Содержание Р в S_I	$i_{P,SI}$	$\Gamma \text{ P.} \Gamma S_I^{-1}$	0
	Содержание Р в X_I	$i_{P,XI}$	$\Gamma \text{ P.} \Gamma X_I^{-1}$	0,01
	Содержание Р в X_s	$i_{P,XS}$	$\Gamma \text{ P.} \Gamma X_s^{-1}$	
	Содержание Р в биомассе (X_H, X_{AOB}, X_{NOB})	$i_{P,BM}$	$\Gamma \text{ P.} \Gamma X_{H,AOB,NOB}^{-1}$	0,02
	Коэффициент полунасыщения SPO_4 для гетеротрофов	$K_{PO_4,H}$	$\Gamma S_{PO_4} \cdot M^{-3}$	0,01
	Коэффициент полунасыщения SPO_4 для автотрофов	$K_{PO_4,A}$	$\Gamma S_{PO_4} \cdot M^{-3}$	0,01
Диффуз. ограничения	Коэффициент понижения S_o за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,O}$		калибр
	Коэффициент понижения S_s за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,SS}$		калибр

Стехиометрические коэффициенты, предложенные в таблице 3.9, используются для построения стехиометрической матрицы имитационной модели ASM3P-2SND (таблица 3.10). Некоторые величины при этом заданы числовыми константами (например, расходование кислорода при нитратации) – это простые переводные коэффициенты атомных масс различных элементов и веществ. Коэффициенты диффузионных ограничений будут более детально рассмотрены ниже.

Согласно представленной матрице, калибруемый стехиометрический параметр $i_{P,XS}$, представляющий из себя содержание фосфора по Р в нерастворенном органическом субстрате X_s , влияет на продуцирование фосфатов в процессе 1 – гидролизе. Этот и другие стехиометрические коэффициенты могут определяться экспериментально лабораторными методами и зачастую не нуждаются в корректировке при калибровке модели. Также из матрицы таблицы 3.10 видно, что разделенные окисленные формы азота (нитрат и нитрит) участвуют не только в процессах роста и эндогенного дыхания гетеротрофов и автотрофов (процессы 5-9, 14, 16, 17, 19), но и в процессах накопления и разложения X_{STO} – накопленного продукта (процессы 3, 4, 9, 10). Автотрофные процессы нитратации и нитритации, согласно представленной матрице, проводятся соответствующими группами микроорганизмов - X_{AOB} и X_{NOB} .

Таблица 3.10. Стехиометрическая матрица модели ASM3P-2SND

№	Процесс	S_O	S_S	S_{NH}	S_{NO2}	S_{NO3}	S_{N2}	S_{PO4}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Гидролиз		$1-f_{SI}$	$-(1-f_{SI}) * i_{N,SS} - f_{SI} * i_{N,SI} + i_{N,XS}$				$-(1-f_{SI}) * i_{P,SS} - f_{SI} * i_{P,SI} + i_{P,XS}$
2	Аэробное накопление X_{STO}	$-(1-Y_{STO,O2})$	-1	$i_{N,SS}$				$i_{P,SS}$
3	Аноксидное накопление X_{STO} при NO_3-NO_2		-1	$i_{N,SS}$	$(1-Y_{STO,NO3}) / (1,14)$	$-(1-Y_{STO,NO3}) / (1,14)$		$i_{P,SS}$
4	Аноксидное накопление X_{STO} при NO_2-N_2		-1	$i_{N,SS}$	$-(1-Y_{STO,NO2}) / 1,72$		$(1-Y_{STO,NO2}) / 1,72$	$i_{P,SS}$
5	Аэробный рост X_H	$-(1-Y_{H,O2}) / Y_{H,O2}$		$-i_{N,BM}$				$-i_{P,BM}$
6	Аноксидный рост X_H (денитрификация) NO_3-NO_2			$-i_{N,BM}$	$(1-Y_{H,NO3}) / (Y_{H,NO3} * 1,14)$	$-(1-Y_{H,NO3}) / (Y_{H,NO3} * 1,14)$		$-i_{P,BM}$
7	Аноксидный рост X_H (денитрификация) NO_2-N_2			$-i_{N,BM}$	$-(1-Y_{H,NO2}) / (Y_{H,NO2} * 1,72)$		$(1-Y_{H,NO2}) / (Y_{H,NO2} * 1,72)$	$-i_{P,BM}$
8	Аэробное эндогенное дыхание X_H	$-(1-f_{XI})$		$-f_{XI} * i_{N,XI} + i_{N,BM}$				$i_{P,BM} - f_{XI} * i_{P,XI}$
9	Аноксидное эндогенное дыхание X_H NO_3-NO_2			$-f_{XI} * i_{N,XI} + i_{N,BM}$	$(1-f_{XI}) / 1,14$	$-(1-f_{XI}) / 1,14$		$i_{P,BM} - f_{XI} * i_{P,XI}$
10	Аноксидное эндогенное дыхание X_H NO_2-N_2			$-f_{XI} * i_{N,XI} + i_{N,BM}$	$-(1-f_{XI}) / 1,72$		$(1-f_{XI}) / 1,72$	$i_{P,BM} - f_{XI} * i_{P,XI}$
11	Аэробное разложение X_{STO}	-1						
12	Аноксидное разложение X_{STO} NO_3-NO_2				1/1,14	-1/1,14		
13	Аноксидное разложение X_{STO} NO_2-N_2				-1/1,72		1/1,72	
14	Рост X_{AOB} (Нитритация)	$1 - 48 / (14 * Y_{AOB})$		$-1 / Y_{AOB} - i_{N,BM}$	$1 / Y_{AOB}$			$-i_{P,BM}$
15	Аэробное эндогенное дыхание X_{AOB}	$-(1-f_{XI})$		$-f_{XI} * i_{N,XI} + i_{N,BM}$				$i_{P,BM} - f_{XI} * i_{P,XI}$
16	Аноксидное эндогенное дыхание X_{AOB}			$-f_{XI} * i_{N,XI} + i_{N,BM}$		$-(1-f_{XI}) / 2,86$	$(1-f_{XI}) / 2,86$	$i_{P,BM} - f_{XI} * i_{P,XI}$
17	Рост X_{NOB} (Нитратация)	$1 - 16 / (14 * Y_{NOB})$		$-i_{N,BM}$	$-1 / Y_{NOB}$	$1 / Y_{NOB}$		$-i_{P,BM}$
18	Аэробное эндогенное дыхание X_{NOB}	$-(1-f_{XI})$		$-f_{XI} * i_{N,XI} + i_{N,BM}$				$i_{P,BM} - f_{XI} * i_{P,XI}$
19	Аноксидное эндогенное дыхание X_{NOB}			$-f_{XI} * i_{N,XI} + i_{N,BM}$		$-(1-f_{XI}) / 2,86$	$(1-f_{XI}) / 2,86$	$i_{P,BM} - f_{XI} * i_{P,XI}$

Продолжение таблицы 3.10.

№	Процесс	S_{ALK}	S_I	X_I	X_S	X_H	X_{STO}	X_{AOB}	X_{NOB}	X_{TSS}
1	2	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Гидролиз	$(i_{N,xs} \cdot f_{SI} \cdot i_{N,SI} - (1 - f_{SI}) \cdot i_{N,SS}) / 14$	f_{SI}		-1					$-i_{SS,XS}$
2	Аэробное накопление X_{STO}	$i_{N,SS} / 14$					$Y_{STO,O2}$			$Y_{STO,O2} \cdot i_{SS,STO}$
3	Аноксидное накопление X_{STO} при NO_3 - NO_2	$i_{N,SS} / 14$					$Y_{STO,NO3}$			$Y_{STO,NO3} \cdot i_{SS,STO}$
4	Аноксидное накопление X_{STO} при NO_2 - N_2	$(i_{N,SS} - (Y_{STO,NO2} - 1) / 1,72) / 14$					$Y_{STO,NO2}$			$Y_{STO,NO2} \cdot i_{SS,STO}$
5	Аэробный рост X_H	$i_{N,BM} / 14$				1	$-1 / Y_{H,O2}$			$(-1 / Y_{H,O2}) \cdot i_{SS,STO} + i_{SS,BM}$
6	Аноксидный рост X_H (денитрификация) NO_3 - NO_2	$i_{N,BM} / 14$				1	$-1 / Y_{H,NO3}$			$(-1 / Y_{H,NO3}) \cdot i_{SS,STO} + i_{SS,BM}$
7	Аноксидный рост X_H (денитрификация) NO_2 - N_2	$((Y_{H,NO2} - 1) / (1,72 \cdot Y_{H,NO2}) + i_{N,BM}) / 14$				1	$-1 / Y_{H,NO2}$			$(-1 / Y_{H,NO2}) \cdot i_{SS,STO} + i_{SS,BM}$
8	Аэробное эндогенное дыхание X_H	$(-f_{XI} \cdot i_{N,XI} + i_{N,BM}) / 14$		f_{XI}		-1				$-i_{SS,BM} + f_{XI} \cdot i_{SS,XI}$
9	Аноксидное эндогенное дыхание X_H NO_3 - NO_2	$(-f_{XI} \cdot i_{N,XI} + i_{N,BM}) / 14$		f_{XI}		-1				$-i_{SS,BM} + f_{XI} \cdot i_{SS,XI}$
10	Аноксидное эндогенное дыхание X_H NO_2 - N_2	$((i_{N,BM} \cdot f_{XI} \cdot i_{N,XI} - (f_{XI} - 1) / 1,72) / 14$		f_{XI}		-1				$-i_{SS,BM} + f_{XI} \cdot i_{SS,XI}$
11	Аэробное разложение X_{STO}						-1,00			$-i_{SS,STO}$
12	Аноксидное разложение X_{STO} NO_3 - NO_2						-1,00			$-i_{SS,STO}$
13	Аноксидное разложение X_{STO} NO_2 - N_2	1/24,08					-1,00			$-i_{SS,STO}$
14	Рост X_{AOB} (Нитритация)	$-(1/14) \cdot (2/Y_{AOB} + i_{N,BM})$						1		$i_{SS,BM}$
15	Аэробное эндогенное дыхание X_{AOB}	$(-f_{XI} \cdot i_{N,XI} + i_{N,BM}) / 14$		f_{XI}				-1		$-i_{SS,BM} + f_{XI} \cdot i_{SS,XI}$
16	Аноксидное эндогенное дыхание X_{AOB}	$((i_{N,BM} \cdot f_{XI} \cdot i_{N,XI} - (f_{XI} - 1) / 2,86) / 14$		f_{XI}				-1		$-i_{SS,BM} + f_{XI} \cdot i_{SS,XI}$
17	Рост X_{NOB} (Нитратация)	$-i_{N,BM} / 14$							1	$i_{SS,BM}$
18	Аэробное эндогенное дыхание X_{NOB}	$(-f_{XI} \cdot i_{N,XI} + i_{N,BM}) / 14$		f_{XI}					-1	$-i_{SS,BM} + f_{XI} \cdot i_{SS,XI}$
19	Аноксидное эндогенное дыхание X_{NOB}	$((i_{N,BM} \cdot f_{XI} \cdot i_{N,XI} - (f_{XI} - 1) / 2,86) / 14$		f_{XI}					-1	$-i_{SS,BM} + f_{XI} \cdot i_{SS,XI}$

Подставляя в матрицу ASM3P-2SND значения стехиометрических коэффициентов из таблицы 3.9, можно получить эту таблицу в расчетных значениях (Таблица 3.11). Здесь не указан коэффициент образования фосфатов при гидролизе из соображений, приведенных выше.

В предложенной имитационной модели (в таблице 3.8) коэффициенты, учитывающие диффузионные ограничения при одновременной нитри-денитрификации введены только для кислорода и органического субстрата (соответственно, коэффициенты $K_{D,O}$ и $K_{D,SS}$). Оставлены без внимания диффузионные ограничения для соединений азота S_{NH} S_{NO2} S_{NO3} . Это связано с допущением, что в процессе одновременной нитри-денитрификации нитрат и нитрит образуются в верхних слоях хлопка ила с проникновением в более глубокие слои ила. В то же время кислород и органический субстрат для проникновения вглубь хлопка должны диффундировать через верхние слои, образованные как автотрофами (потребляют кислород), так и ординарными гетеротрофами (потребляют и кислород, и органический растворенный субстрат). Схема предложенного допущения приведена на рисунке 3.17.

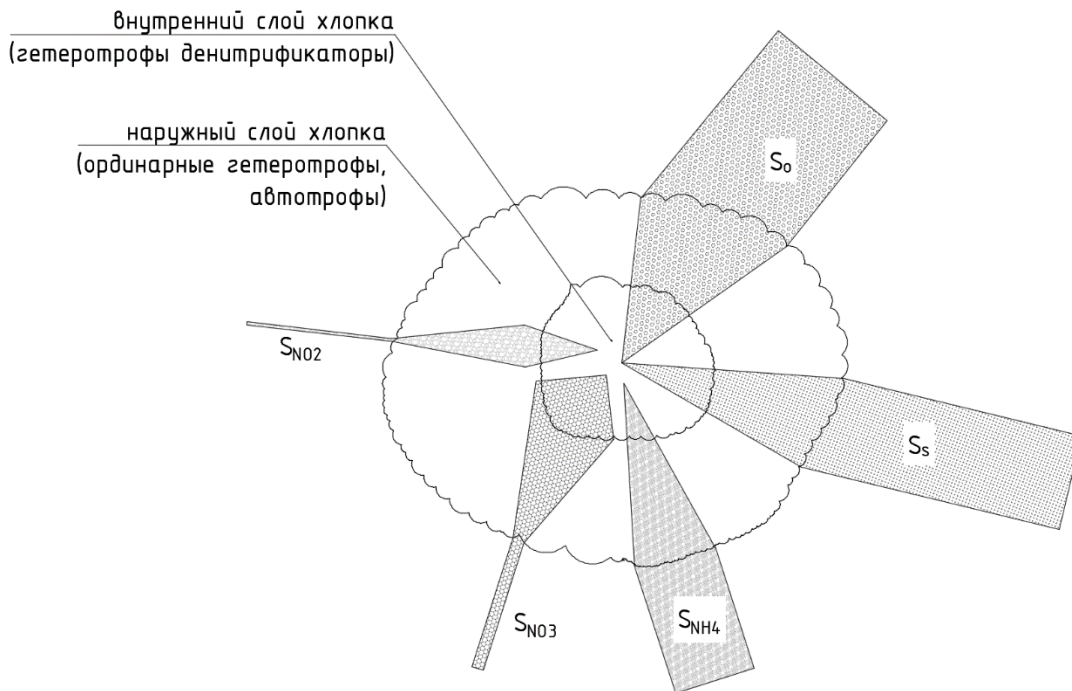


Рисунок 3.17 - Схематичное отображение допущений по диффузионным ограничениям в ASM3P-2SND

Таблица 3.10. Стехиометрическая матрица модели ASM3P-2SND в расчетных значениях.

Процесс	S_O	S_S	S_{NH}	S_{NO2}	S_{NO3}	S_{N2}	S_{PO4}	S_{ALK}	X_I	X_S	X_H	X_{STO}	X_{AOB}	X_{NOB}	X_{TSS}
Гидролиз	0	1,00	0,010				---*	0,00057		-1		0			-0,75
Аэробное накопление X_{STO}	-0,15	-1,00	0,030					0,00214				0,85			0,51
Аноксидное накопление X_{STO} при NO_3-NO_2		-1,00	0,030	0,26	-0,26			0,00214				0,70			0,42
Аноксидное накопление X_{STO} при NO_2-N_2		-1,00	0,030	-0,17		0,17		0,01460				0,70			0,42
Аэробный рост X_H	-0,59		-0,070				-0,020	0,005			1	-1,59			-0,05
Аноксидный рост X_H (денитрификация) NO_3-NO_2			-0,070	0,47	-0,47		-0,020	0,005			1	-1,43			-0,02
Аноксидный рост X_H (денитрификация) NO_2-N_2			-0,070	-0,31		0,27	-0,020	0,0173			1	-1,54			-0,02
Аэробное эндогенное дыхание X_H	-0,80		0,066				0,018	0,00471	0,20		-1,00				-0,75
Аноксидное эндогенное дыхание X_H NO_3-NO_2			0,066	0,70	-0,70		0,018	0,00471	0,20		-1,00				-0,75
Аноксидное эндогенное дыхание X_H NO_2-N_2			0,066	-0,47		0,47	0,018	0,03794	0,20		-1,00				-0,75
Аэробное разложение X_{STO}	-1,00			0,00								-1,00			-0,60
Аноксидное разложение X_{STO} NO_3-NO_2				0,88	-0,88							-1,00			-0,60
Аноксидное разложение X_{STO} NO_2-N_2				-0,58		0,58		0,04032				-1,00			-0,60
Рост X_{AOB} (Нитритация)	-18,05		-5,626	5,56			-0,020	-0,0307					1		0,90
Аэробное эндогенное дыхание X_{AOB}	-0,80		0,066				0,018	0,00471	0,20				-1		-0,75
Аноксидное эндогенное дыхание X_{AOB}			0,066		-0,28	0,28	0,018	0,02469	0,20				-1		-0,75
Рост X_{NOB} (Нитратация)	-18,05		-0,070	-16,67	16,67		-0,020	-0,005						1	0,90
Аэробное эндогенное дыхание X_{NOB}	-0,80		0,066				0,018	0,00471	0,20					-1	-0,75
Аноксидное эндогенное дыхание X_{NOB}			0,066		-0,28	0,28	0,018	0,02469	0,20					-1	-0,75

* - обсуждаемый в данной работе коэффициент.

Данная модель нуждается в проверке сходимости, настройке и калибровке. Проверка сходимости заключается в решаемости системы уравнений различными математическими способами с получением одного и того же результата. Настройка имитационной модели заключается в задании параметров конкретных очистных сооружений, поиск и устранение ошибок в записании биологических и гидравлических процессов переноса массы. Калибровка заключается в уточнении фракционирования ХПК исходного стока и корректировке констант биологических реакций.

3.6. Выводы к третьей главе

1. Предложена концепция биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами (БОСЭБ), которая базируется на использовании сооружений с затопленной эрлифтной системой аэрации и илоразделением в самообновляющемся взвешенном слое. Эрлифтные биореакторы являются сооружениями для одновременной нитри-денитрификации, совмещенной с вторичным илоразделением.
2. Разработан метод расчета гидравлических параметров эрлифтных биореакторов, основанный на совместном аналитическом решении уравнений гидродинамики и численном моделировании скоростей в различных точках сооружения.
3. В лабораторных условиях определены зависимости для определения скорости всплытия пузырька воздуха в затопленной эрлифтной системе аэрации. Полученные закономерности применимы при определении коэффициента использования кислорода (SOTE) для эрлифтных биореакторов, что подтвердилось серией соответствующих лабораторных экспериментов.
4. Разработана полуэмпирическая теория самообновляющегося взвешенного слоя, в которой предложено описание илоразделения в эрлифтных биореакторах на основании численного решения уравнений Навье-Стокса и

полученных в полупромышленных условиях экспериментальных данных. Установлена зависимость для «мнимой» гидравлической крупности выносимых частиц ила, которая зависит от концентрации ила в биореакторе, интенсивности циркуляции и концентрации взвешенных веществ на выходе из сооружения.

5. Предложена математическая имитационная модель одновременной нитри-денитрификации с учетом преобразования соединений фосфора ASM3P-2SND для городских сточных вод. Указанная модель учитывает преобразования соединений фосфора при жизнедеятельности гетеротрофов и автотрофов, описывает взаимные преобразования окисленных форм азота – нитратов и нитритов, а также учитывает диффузионные ограничения проникновения субстрата и кислорода в хлопок активного ила при одновременной нитри-денитрификации.

Глава 4.**ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ С ЭРЛИФТНЫМИ
БИОРЕАКТОРАМ.**

Задачей опытно-промышленных и натуральных исследований является определение параметров работы эрлифтных биореакторов, а также подтверждение основных научных положений технологии БОСЭБ (третья глава). В натуральных условиях действующих сооружений устанавливаются значения предложенных коэффициентов диффузионных ограничений $K_{D,O}$ и $K_{D,SS}$ совместно с проверкой сходимости, настройкой и калибровкой предложенной имитационной модели ASM3P-2SND. В опытно-промышленных условиях устанавливается комплексное соответствие разработанных в третьей главе подходов к описанию системы аэрации, самообновляющегося взвешенного слоя и биологических процессов условиям реальной биологической очистки.

4.1. Натурные исследования биологической очистки с одновременной нитри-денитрификаций в аэротенке с затопленной эрлифтной аэрацией.

Натурные исследования процесса биологической очистки с одновременной нитри-денитрификацией и затопленной эрлифтной системой аэрации выполнялись на очистных сооружениях п.г.т. Новый Свет Старобешевского района ДНР.

4.1.1 Описание условий проведения натуральных исследований.

В настоящее время очистные сооружения п.г.т. Новый Свет функционируют в штатном режиме с производительностью 55-75% от проектной мощности. Режим водоснабжения населенного пункта – круглосуточный, поселок запитан из местных подземных источников водоснабжения. Технологическая схема очистных сооружений приведена на рисунке 4.1.

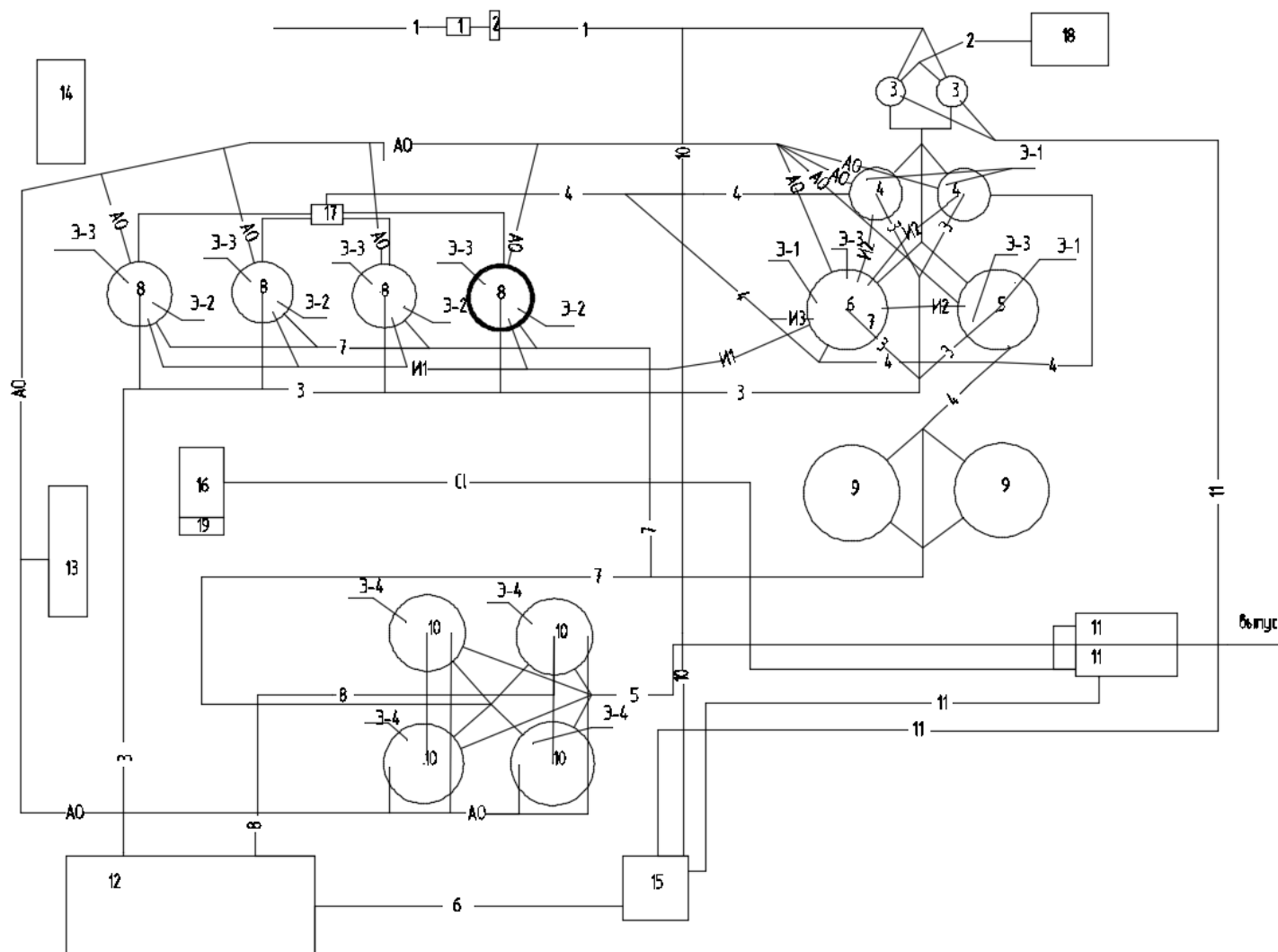


Рисунок 4.1 – Технологическая схема очистных сооружений п.г.т. Новый Свет.

Сточные воды по трем напорным трубопроводам поступают из канализационных насосных станций населенного пункта в приемную камеру (поз.1). После этого, по открытым лоткам исходный сток поступает на решетки (поз.2) с прозорами 16мм.

Количество поступающих сточных вод измеряют устройством типа лотка Вентури с автоматизированной передачей данных на пульт управления. После водоизмерительного устройства сточные воды поступают на песколовки с круговым движением воды (поз.3). Там происходит отделение тяжелых минеральных примесей. Осадок из песколовок удаляется гидроэлеватором на песковые площадки (поз.18). Рабочая жидкость гидроэлеватора подается насосом из насосной станции (поз.15).

Далее поток сточных вод разделяется. Первый поток проходит через первичный вертикальный отстойник диаметром 8м (поз.4) и первичный двухъярусный отстойник диаметром 12м.

Желоба двухъярусного отстойника переоборудованы в первичный горизонтальный отстойник (поз.6), а осадочная часть в - аэробный стабилизатор (поз.7). Осветленная вода после вертикального отстаивания направляется через распределительную камеру (поз.17) в биореакторы диаметром 8м и 6м (поз.8), в котором установлены аэрационно-циркуляционные колонны (затопленные эрлифты) и эрлифты Э-3 диаметром 50мм для отвода избыточного активного ила на аэробный стабилизатор (поз.7).

Непосредственно в биореакторах (поз. 8) происходит биологическая очистка с одновременной нитри-денитрификацией. Для натурных исследований выбран аэротенк-отстойник №4 (на технологической схеме рисунке 4.1. выделен жирной линией).

Далее биологически очищенная сточная жидкость после аэротенков-отстойников (поз.8) направляются на 4 фильтра-биореактора диаметром 9м (поз.10), для доочистки. Обеззараживается очищенная вода путем подачи хлорной воды из хлораторной (поз.16), дозой 3 г/л. Очищенная и обеззараженная вода направляется в существующий сбросной канал.

Размещение объекта натуральных исследований – аэротенка-отстойника № 4 на снимке местности показано на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 - Размещение аэротенка-отстойника № 4 на снимке местности.

Аэротенк-отстойник №4 представляет из себя цилиндрический резервуар диаметром 8м с коническим дном, внутри которого установлен затопленный эрлифт. Размеры затопленного эрлифта в плане – 2,6х2,6м. Внутри аэрационной колонны установлена гребенка тканевых аэраторов диаметром 100мм (Рисунок 4.3). В верхней части сооружения установлены осадочные желоба, в которых происходит накопление и сползание осадка. Именно этот элемент отличает аэротенк-отстойник с затопленной эрлифтной системой аэрации от эрлифтного биореактора.

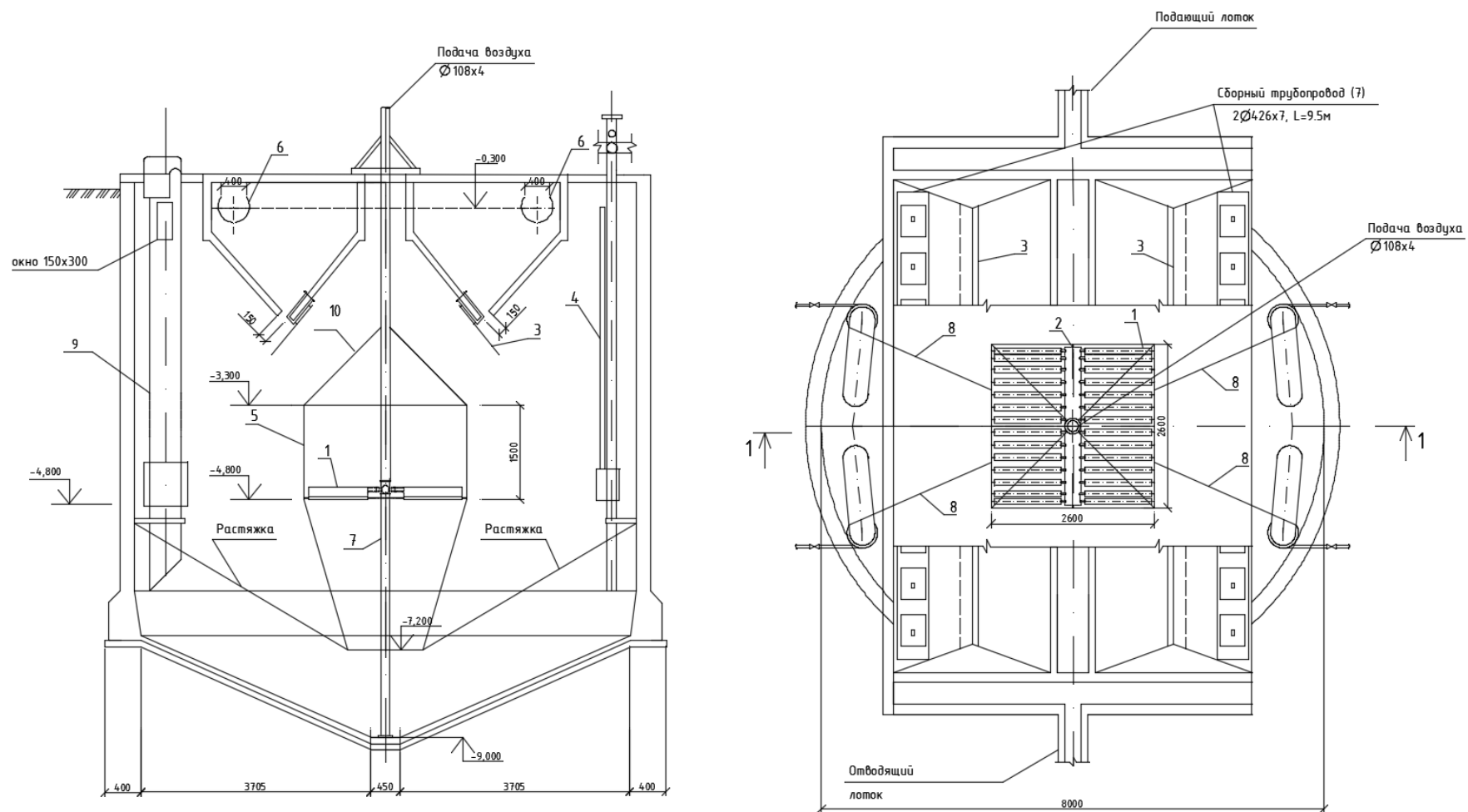


Рисунок 4.3 - Чертеж азротенка-отстойника с затопленной эрлифтной системой азрации.

Фотоиллюстрация действующего аэротенка-отстойника на момент 25.06.2023 г. приведена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Фото исследуемого аэротенка-отстойника №4.

Исходя из особенности илоотделения действующих биореакторов, в натуральных условиях исследуются только биологические аспекты очистки сточных вод с одновременной нитри-денитрификацией. В аэротенке-отстойнике самообновляющегося взвешенного слоя не создается.

4.1.2 Описание натуральных исследований биологической очистки с одновременной нитри-денитрификацией и результаты.

Исследования биологической очистки с одновременной нитри-денитрификацией на аэротенке-отстойнике №4 проводились в период с 5.07.2023 г. по 25.07.2023 г. В этот период фиксировались расходные характеристики подаваемых на сооружение сточных вод (q_1 , м³/сут, м³/ч), отводимого избыточного активного ила (q_{exc} , м³/сут), расход воздуха, подаваемого на сооружение (Q_{air} , м³/сут).

Кроме того, силами персонала станции, лаборатории Филиала «Старобешевская ТЭС» ГУП ДНР «Энергия Донбасса» проводились химические анализы до/после очистки по показателям, представленным в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Контролируемые параметры до/после очистки в аэротенке-отстойнике №4.

Параметр	Обознач.	Ед. изм.
ХПК во взболтанной пробе	ХПК	гО ₂ /м ³
ХПК в фильтрованной пробе *	ХПК _ф	гО ₂ /м ³
БПК ₅ во взболтанной пробе	БПК ₅	гО ₂ /м ³
Концентрация азота аммонийного в пересчете на N	S _{NH4}	гN/м ³
Концентрация азота нитратов в пересчете на N	S _{NO3}	гN/м ³
Концентрация азота нитритов в пересчете на N	S _{NO2}	гN/м ³
Концентрация фосфатов в пересчете на P**	S _{PO4}	гP/м ³
Концентрация активного ила в биореакторе	a _i	г/м ³
Концентрация взвешенных веществ в очищенной воде	C _{ВВ}	г/м ³

* – ХПК в фильтрованной пробе определяются только для очищенных сточных вод для расчета S_I (инертного растворённого органического вещества) при фракционировании ХПК. При этом фильтрование проводилось через фильтр синяя лента, исходя из гипотезы, что все нерастворенное органическое вещество в очищенном стоке адсорбируется хлопьями активного ила и удаляется при фильтровании.

** – концентрация фосфатов в исходном стоке определялась двумя методами по ГОСТ 18309—2014: по методу «Б» для определения соединений фосфора в форме ортофосфатов, и по методу «В» для определения общего фосфора, что в результате последующей калибровки модели позволит определить содержание фосфора в нерастворенном биоразлагаемом субстрате.

В ходе исследований фиксировался почасовой приток на сооружение с помощью мерного лотка на выходе их аэротенка-осветлителя. Кроме того, с помощью автоматизированной системы сбора данных о притоке на станцию в целом контролировалась неравномерность поступления исходных сточных вод.

Графики суточной и часовой неравномерности притока приведены на рисунке 4.5, 4.6.

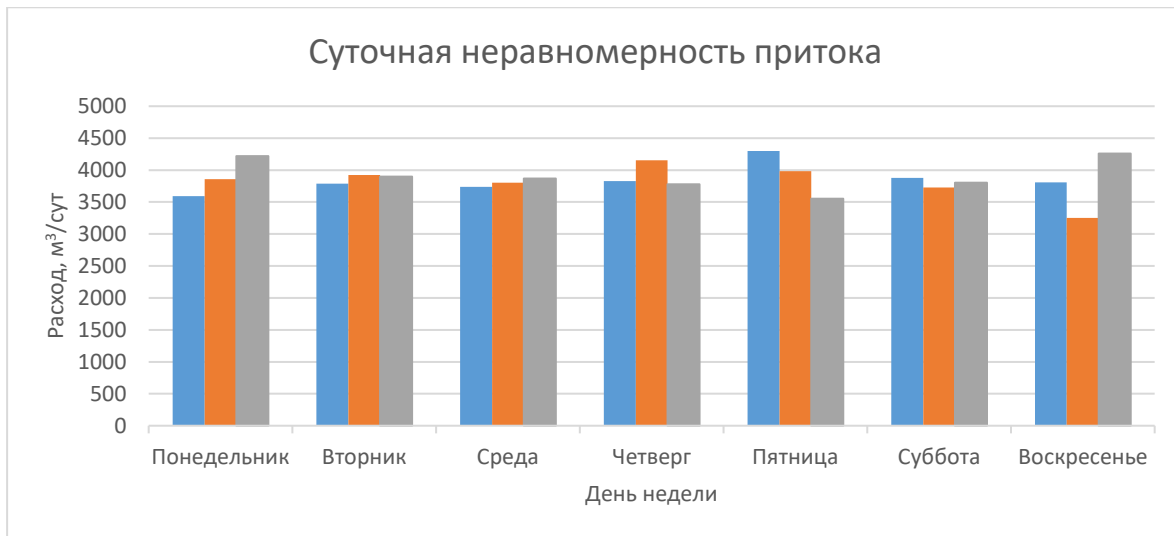


Рисунок 4.5 – График суточной неравномерности притока на станцию за 3 недели наблюдений.

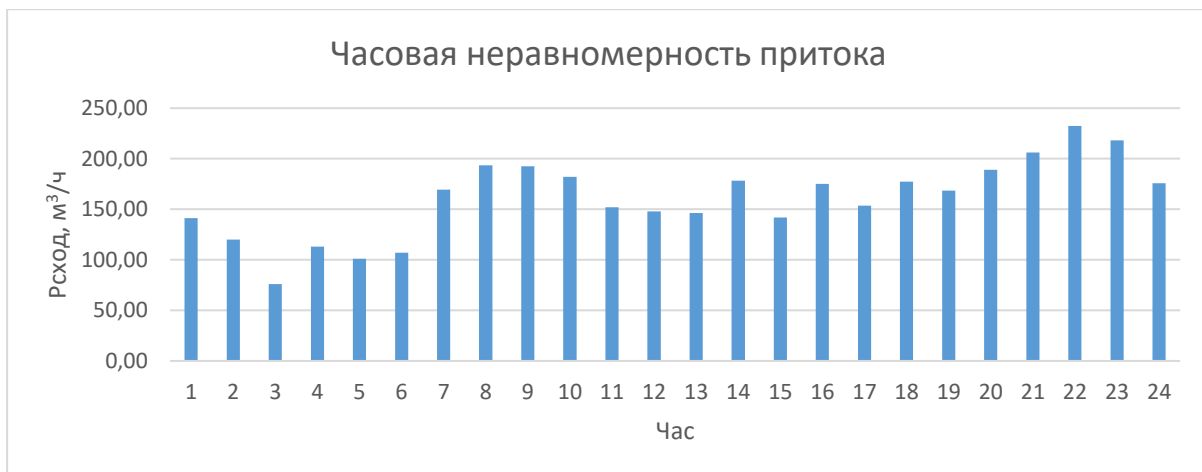


Рисунок 4.6 - Усредненная за 3 недели часовая неравномерность притока.

Для предварительного фракционирования ХПК проводились респирометрические исследования на лабораторном порционном реакторе с использованием адаптированного активного ила из сооружения. Результаты показали соотношение БПК/БХПК $\approx 0,68...0,72$.

В процессе исследования сооружение меняло режим подачи воздуха. Так, до 7.07. в сутки подавалось 7000 м^3 воздуха, а после – 7950 м^3 . Величина сброса избыточного активного ила также являлась не постоянной и измерялась персоналом объемным методом. Результаты измерений представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Результаты измерений.

Дата		Аммоний-ион, мг/дм ³	N-NH ₄ , мг/дм ³	Нитриты, мг/дм ³	N-NO ₂ , мг/дм ³	Нитраты, мг/дм ³	N-NO ₃ , мг/дм ³	Фосфаты, мг/дм ³	P-PO ₄ , мг/дм ³	ХПК, O ₂ мг/дм ³	ХПКф, O ₂ мг/дм ³	БПК, O ₂ мг/дм ³	Свв, мг/дм ³	
	Q ₁ , м ³ /сут	На входе												a _i , мг/дм ³
5.07.23 г.	730	49,60	38,58	0,20	0,06	5,18	1,17	6,78	2,21	286,00	не измер.	158,20	121,40	3100,00
7.07.23 г.	671	48,40	37,64	0,18	0,05	4,69	1,06	7,02	2,29	244,00	не измер.	135,52	126,20	3450,00
10.07.23 г.	637	46,30	36,01	0,16	0,05	4,90	1,11	6,68	2,18	278,00	не измер.	150,32	114,70	3640,00
12.07.23 г.	663	48,60	37,80	0,16	0,05	4,19	0,95	6,94	2,26	282,00	не измер.	150,20	126,80	4050,00
14.07.23 г.	762	39,40	30,64	0,21	0,06	4,91	1,11	7,25	2,37	241,00	не измер.	122,40	111,50	4230,00
17.07.23 г.	684	46,70	36,32	0,31	0,09	4,88	1,10	6,87	2,24	251,00	не измер.	132,62	123,70	3340,00
19.07.23 г.	674	41,70	32,43	0,45	0,14	4,12	0,93	6,76	2,21	248,00	не измер.	131,29	118,90	3800,00
21.07.23 г.	706	42,40	32,98	0,32	0,10	4,30	0,97	6,70	2,19	268,00	не измер.	141,00	131,10	4600,00
25.07.23 г.	691	38,20	29,71	0,16	0,05	3,68	0,83	6,90	2,25	272,00	не измер.	146,98	129,20	3700,00
	Q _{вх} , м ³ /сут	На выходе												Q _{аир} , м ³ /сут
5.07.23 г.	1,0	15,69	12,20	0,89	0,27	24,27	5,48	6,47	2,11	41,70	18,00	14,30	47,20	7000
7.07.23 г.	1,0	14,40	11,20	1,18	0,36	32,77	7,40	6,50	2,12	38,20	17,00	12,32	51,40	7000/ 7950
10.07.23 г.	2,0	2,03	1,58	1,02	0,31	97,87	22,10	5,95	1,94	39,10	17,00	12,14	39,10	7950
12.07.23 г.	2,0	4,75	3,69	1,35	0,41	90,34	20,40	6,01	1,96	42,20	17,00	12,75	52,40	7950
14.07.23 г.	2,0	0,39	0,30	0,72	0,22	116,91	26,40	6,83	2,23	38,60	17,00	10,60	41,10	7950
17.07.23 г.	7,0	4,11	3,20	1,11	0,34	108,50	24,50	6,01	1,96	42,50	18,00	13,28	39,60	7950
19.07.23 г.	5,0	2,21	1,72	0,76	0,23	105,40	23,80	6,37	2,08	37,80	16,00	11,53	37,70	7950
21.07.23 г.	2,0	2,01	1,56	0,95	0,29	89,01	20,10	6,25	2,04	41,20	18,00	13,10	36,50	7950
25.07.23 г.	5,0	1,60	1,24	0,85	0,26	108,06	24,40	6,44	2,10	39,40	17,00	11,74	36,20	7950

4.1.3 Обработка результатов натуральных исследований.

Для обработки результатов натуральных исследований воспользуемся положениями о гидравлических расчетах, коэффициенте использования кислорода и ASM3P-2SND третьей главы.

Циркуляционный расход q_{cir} , $\text{м}^3/\text{сут}$, определяется по системе уравнений 3.16, в зависимости от геометрических размеров сооружения (Рисунок 4.3) и интенсивности аэрации. Интенсивность аэрации была на весь период наблюдений неизменной, а повышение подачи воздуха с 07.07.2023 г. осуществлялось за счет включения эрлифтов у наружной стенки сооружения. Таким образом установлено, что циркуляционный расход в сооружении составляет $0,382 \text{ м}^3/\text{с}$ либо $33000 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Коэффициент использования кислорода определялся в зависимости от интенсивности аэрации и крупности пузырька воздуха, которая в среднем составляла 7мм. Расчет коэффициента использования кислорода по формуле (3.25) с учетом (3.21) приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Расчет коэффициента использования кислорода в натуральных условиях аэротенка-осветлителя

Диаметр пузырька	$D_{\text{п}}$	м	0,007
Объем пузырька	$W_{\text{п}}$	м^3	1,79E-07
Площадь поверхности	$S_{\text{п}}$	м^2	1,53 E-04
Дисперсный размер	$\delta_{\text{п}}$	м	0,00117
Плотность жидкости	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$	998
Коэффициент пов. натяжения	σ	Н/м	0,073
Коэф. турб. диффузии	$D_{\text{т}}$	$\text{м}^2/\text{с}$	1,85E-09
Число Рейнольдса	Re		1952
Коэффициент сопротивления	ζ		0,5162
Площадь поперечного сечения пузырька	$f_{\text{п}}$	м^2	07,693 E-05
Коэффициент формы	Кф		2
Концентрация насыщения	$C_{\text{н}}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	0,00887
Концентрация растворенн. кислорода	C	$\text{кг}/\text{м}^3$	0,0004
Интенсивность аэрации	$I_{\text{а}}$	$\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	20
Глубина аэратора	$h_{\text{а}}$	м	4,5
Скорость всплытия	$V_{\text{абс}}$	м/с	0,382
Приведенная скорость	$V_{\text{прив}}$	м/с	0,312
Время всплытия	ΔT	с	11,78
Коэффициент использования кислорода	$K_{\text{и}}$		0,0974

Указанные значения гидравлических параметров подставляются в модель ASM3P-2SND в качестве исходных данных. Согласно положениям подраздела 2.3 в программной среде CellDesigner заданы все биологические процессы, а также поступление, отвод сточных вод и избыточного ила, рециркуляция внутри сооружения. Общий вид рабочего поля программы представлен на рисунке 4.7.

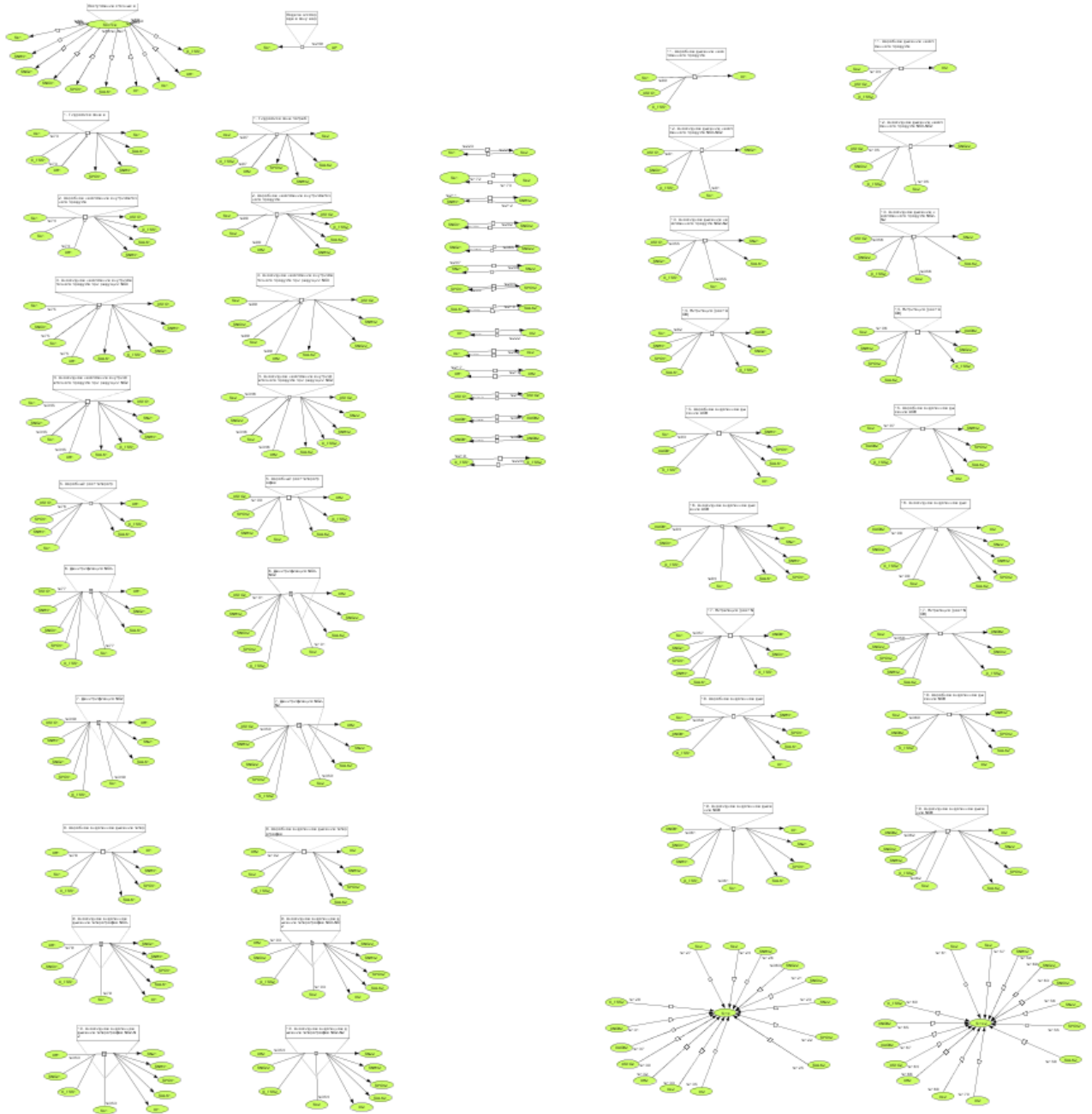


Рисунок 4.7 – Общий вид модели аэротенка-отстойника в CellDesigner при описании биологических процессов по ASM3P-2SND.

Программе для имитационного моделирования заданы все стехиометрические и кинетические параметры биологической очистки согласно таблице 3.9 и перетоков в соответствующем окне. При этом задавались и предположительные значения («guess value») калибруемых величин, приведенные в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Предположительные значения калибруемых величин.

Калибруемый параметр	Обозн.	Ед.изм.	Значение
Понижающий коэффициент денитрификации $\text{NO}_3\text{--NO}_2$	η_{NO_3}		0,2
Понижающий коэффициент денитрификации $\text{NO}_2\text{--N}_2$	η_{NO_2}		0,2
Максимальная скорость роста X_{AOB}	μ_{AOB}	сут^{-1}	0,6
Максимальная скорость роста X_{NOB}	μ_{NOB}	сут^{-1}	1
Содержание P в X_S	i_{P,X_S}	$\text{г P.г } X_S^{-1}$	0,003*
Коэффициент понижения S_O за счет диффузии при денитрификации	$K_{\text{D},O}$		0,7
Коэффициент понижения S_s за счет диффузии при денитрификации	K_{D,S_S}		0,7
Растворенная биоразлагаемая органика	S_S	г ХПК.м^{-3}	100
Нерастворённая биоразлагаемая органика	X_S	г ХПК.м^{-3}	100

* - коэффициент определен исходя из разницы общего и растворенного фосфора, отнесенного к предполагаемому значению X_S .

Калибровка модели выполнялась непосредственно в поле симуляции программы (Рисунок 4.8.) Далее изложена методика проверки на сходимость, настройки и калибровки имитационной модели.

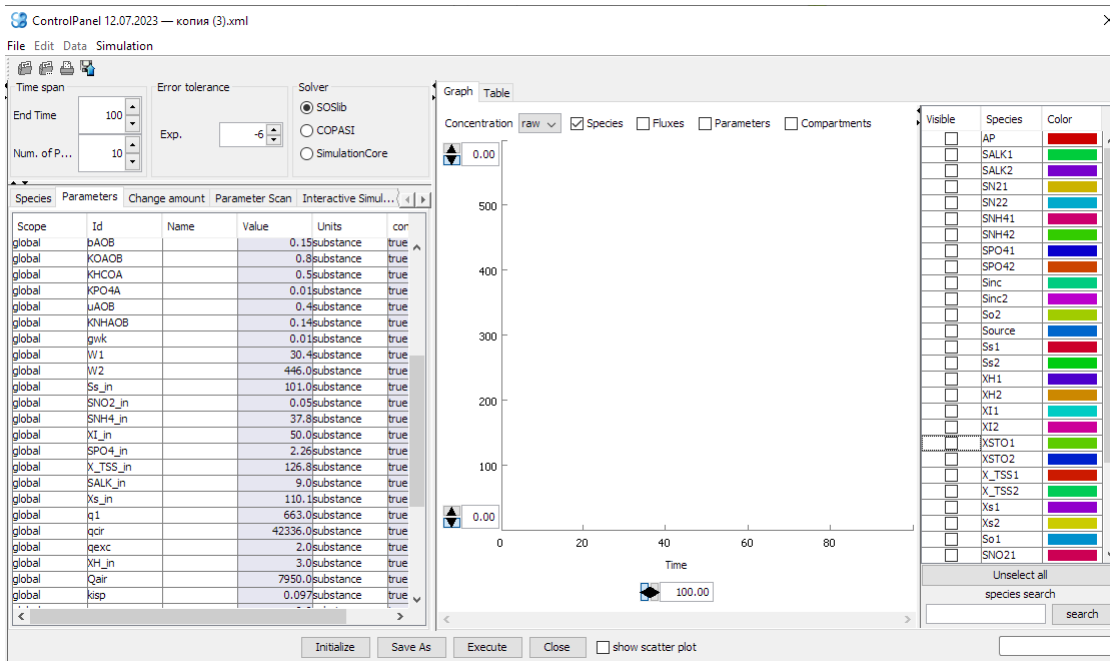


Рисунок 4.8 – Окно симуляции в программе CellDesigner.

1. Для начала, с использованием предполагаемых значений, выполнялась проверка системы на сходимость. То есть, система решалась тремя разными математическими аппаратами (Рисунок 4.9.).

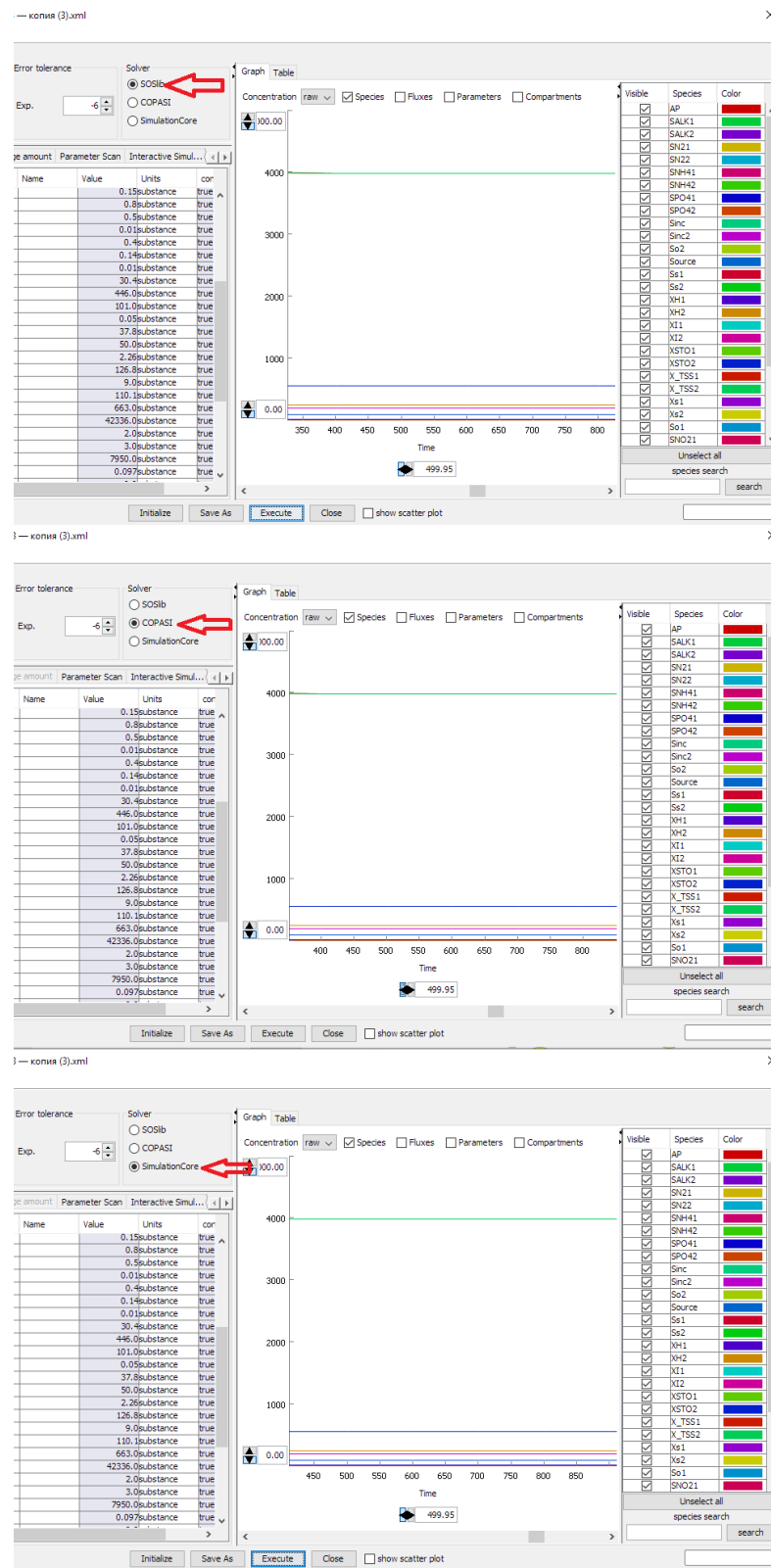


Рисунок 4.9 – Результаты решения ASM3P-2SND тремя разными математическими способами

Поскольку все 3 системы решили имитационную модель и все три способа идентичны по результату – система обладает необходимой сходимостью.

2. Далее выполняется настройка модели – методом постепенного приближения задаются начальные параметры компонентов (растворенных и нерастворенных веществ) для расчета задачи, то есть достигается прямая линия концентрации компонентов, не зависящая от времени, как показано на рисунке 4.9. Если концентрации компонентов каким-либо образом изменяются (пример – рисунок 4.10), система не настроена и нуждается корректировки начальных значений компонентов.

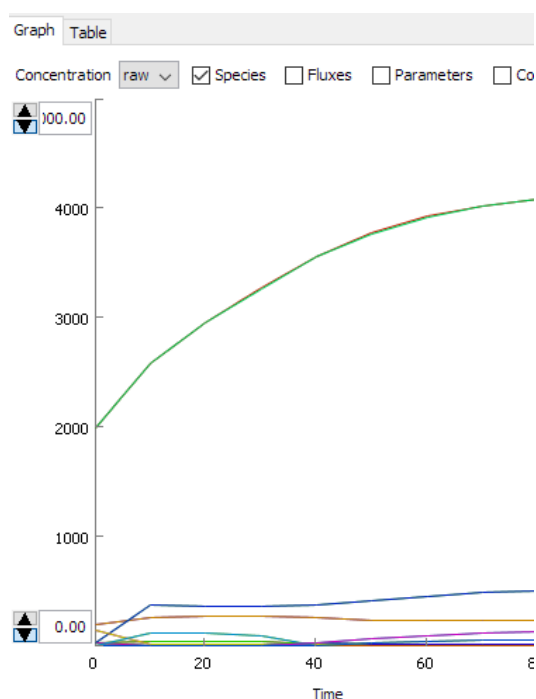


Рисунок 4.10 – Пример не настроенной системы, где происходит установление баланса компонентов.

Далее в окне симуляции программы CellDesigner выполняется калибровка модели в следующей последовательности:

3. Путем изменения значений X_S и S_S , устанавливается значение X_{TSS} , соответствующее фактической концентрации активного ила в аэротенке. Установлено, что соотношение X_S / S_S оказывает значительное влияние именно на этот параметр.

4. Пошагово одновременно варьируются параметры μ_{AOB} , μ_{NOB} до достижения очистки по азоту аммонийному S_{NH4} до фактических значений. Именно

S_{NH_4} определен как наиболее чувствительный параметр к указанным коэффициентам.

5. Варьируются параметры η_{NO_3} , η_{NO_2} для грубой калибровки и параметры $K_{D,O}$, $K_{D,SS}$ для тонкой калибровки до достижения фактических концентраций по азоту нитратов и нитритов S_{NO_3} , S_{NO_2} .

6. Проверяется необходимость повторной настройки модели (пункт 2 данной методики). В случае действий по настройке, калибровку (пп. 3-6) следует запустить снова.

На основании изложенной методики (отработанной в данном исследовании), выполнена калибровка модели ASM3P-2SND для аэротенка-отстойника №4 очистных сооружений п.г.т. Новый Свет. Поскольку сооружение в настоящее время гидравлически недогружено и время пребывания в нем достигает 12 часов, с учетом наличия усреднителей на станции, калибровка выполнялась по среднесуточным значениям. Это, бесспорно, даст определенную погрешность. Поскольку данные исследования проводились не в целях оптимизации конкретного производства очистки сточных вод, а в целях научных исследований, полученной точности, по мнению автора, вполне достаточно.

Результаты калибровки представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 Полученные значения калибруемых величин по ASM3P-2SND.

Калибруемый параметр	Обозн.	Ед.изм.	Значение
Понижающий коэффициент денитрификации NO_3-NO_2	η_{NO_3}		0,1
Понижающий коэффициент денитрификации NO_2-N_2	η_{NO_2}		0,1
Максимальная скорость роста X_{AOB}	μ_{AOB}	сут ⁻¹	0,4
Максимальная скорость роста X_{NOB}	μ_{NOB}	сут ⁻¹	0,9
Содержание P в X_S	$i_{P,XS}$	г P.г X_S^{-1}	0,003
Коэффициент понижения S_O за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,O}$		0,45
Коэффициент понижения S_s за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,SS}$		0,3

В таблице 4.5 отсутствуют калибруемые параметры X_S и S_S , которые зависят от состава исходных сточных вод. Калиброванные значения биоразлагаемого субстрата в исходных сточных водах, в зависимости от ХПК и БПК₅ приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 Калиброванные значения X_S и S_S в исходных сточных водах, в зависимости от ХПК и БПК₅

Дата	ХПК, O ₂ мг/дм ³	БПК, O ₂ мг/дм ³	Ss_in, O ₂ мг/дм ³	Xs_in, O ₂ мг/дм ³
5.07.23 г.	286,00	158,20	102,00	121,00
7.07.23 г.	244,00	135,52	91,62	99,26
10.07.23 г.	278,00	150,32	111,00	100,00
12.07.23 г.	282,00	150,20	101,54	110,01
14.07.23 г.	241,00	122,40	82,75	89,65
17.07.23 г.	251,00	132,62	89,66	97,13
19.07.23 г.	248,00	131,29	94,70	96,10
21.07.23 г.	268,00	141,00	93,00	105,00
25.07.23 г.	272,00	146,98	98,00	108,00

Результаты калибровки в сравнении фактическими показателями качества очистки по азоту аммонийному, нитрату, нитриту и фосфатам представлены на рисунках 4.11. – 4.14.

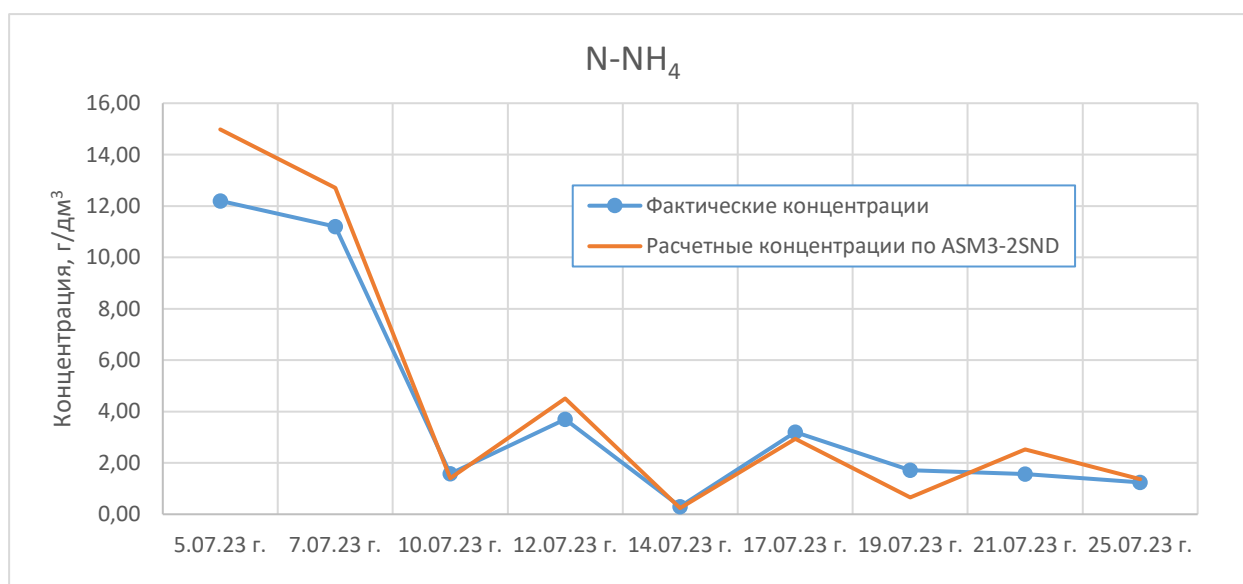


Рисунок 4.11 - Результаты калибровки по N -NH₄ на выходе из сооружения

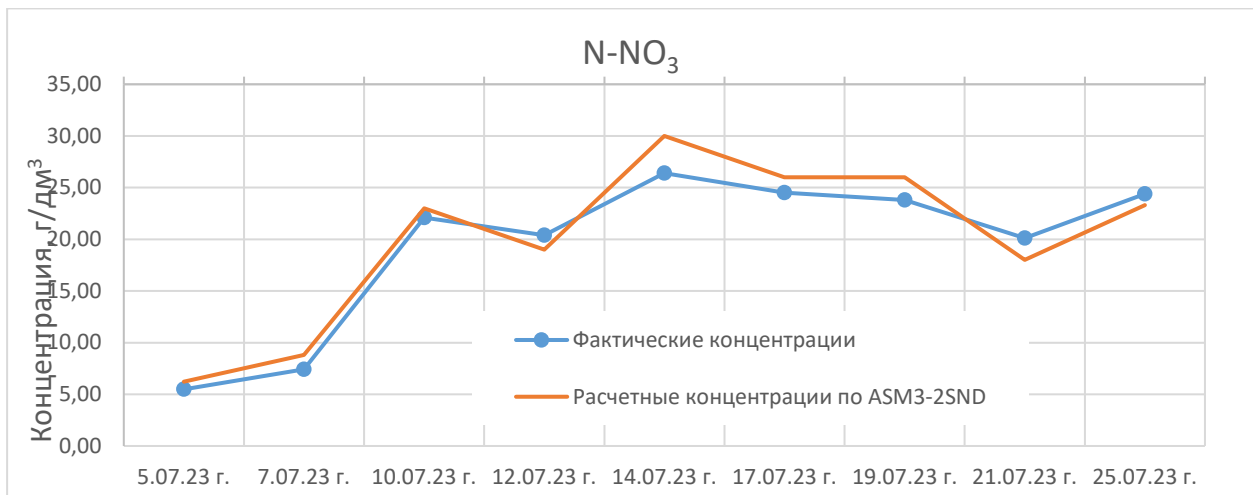


Рисунок 4.12 - Результаты калибровки по N -NO₃ на выходе из сооружения

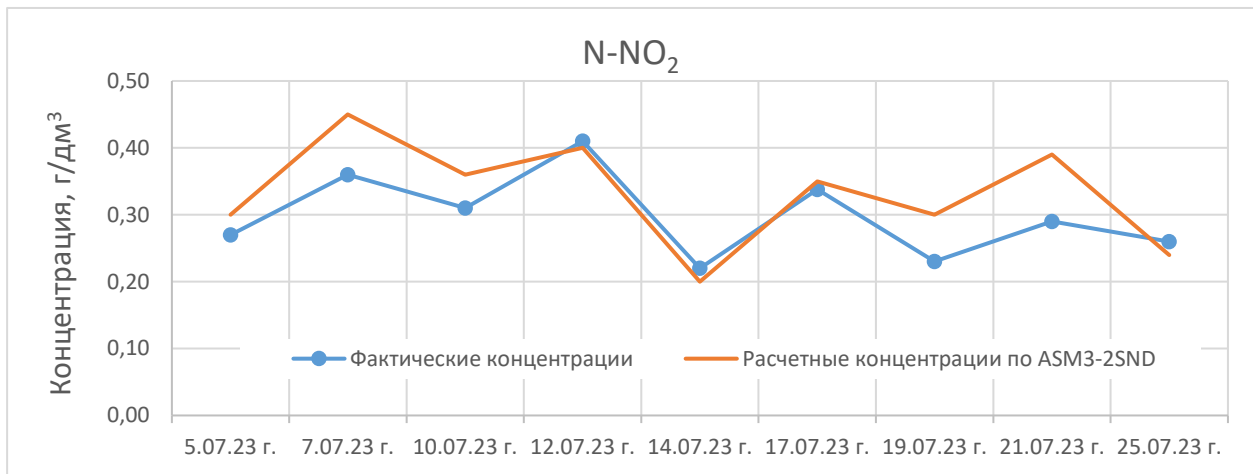


Рисунок 4.13 - Результаты калибровки по N -NO₂ на выходе из сооружения

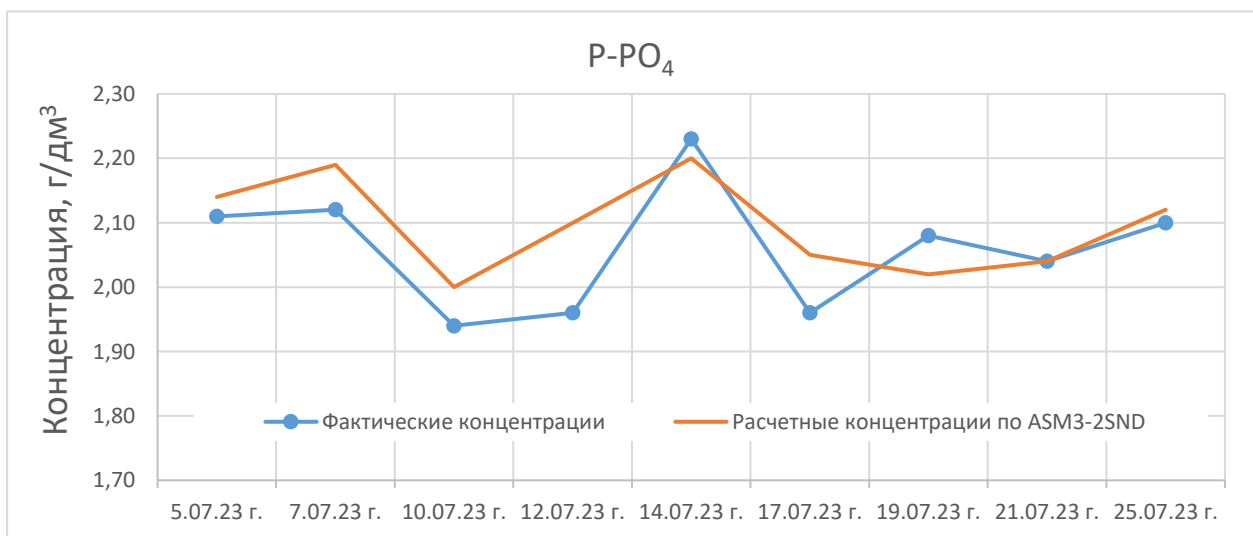


Рисунок 4.14 - Результаты калибровки по P -PO₄ на выходе из сооружения

Результат калибровки по $a_i\text{-}X_{\text{TSS}}$ представлены на рисунке 4.15. Следует отметить, что высокая сходимость результатов фактических и модельных значений связана с особенностями методики - X_S и S_s калибровались по параметру X_{TSS} .

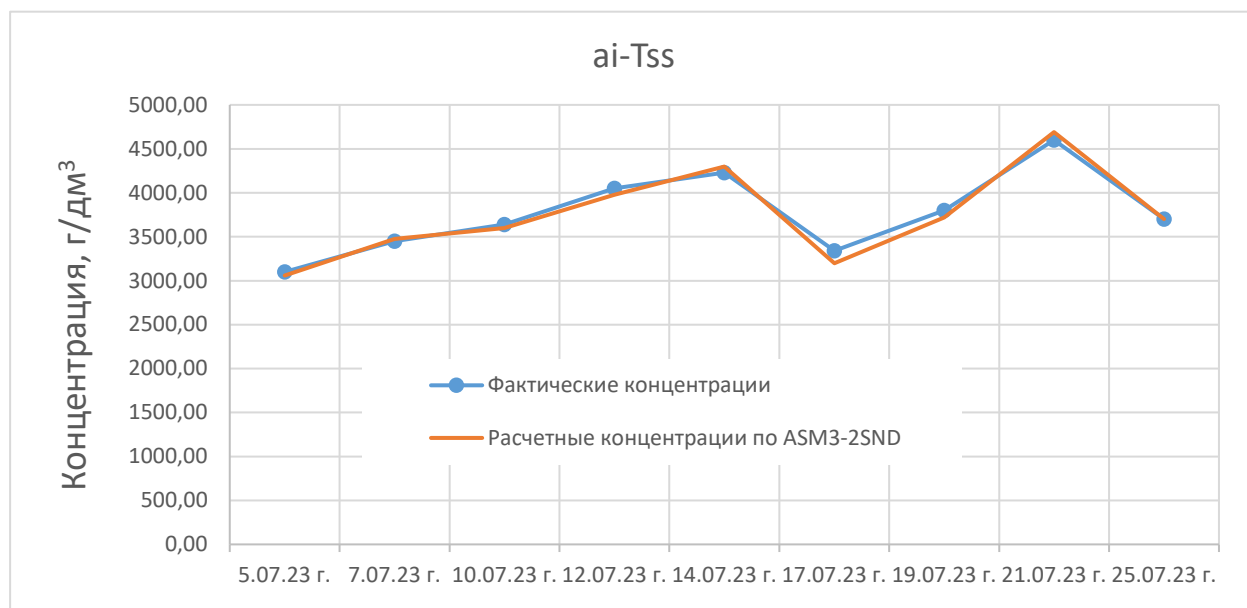


Рисунок 4.15 - Результаты калибровки по $a_i\text{-}X_{\text{TSS}}$ в сооружении

Таким образом, можно утверждать о калибруемости предложенной имитационной модели и ее близком соответствии протекающим в натуральных условиях биологическим процессам очистки. Средняя точность модели – 87%.

Дополнительно с основными исследованиями была проанализирована крупность частиц активного ила в различных точках сооружения. С помощью батометра отбиралась иловая смесь на различной глубине с последующей оценкой крупности частиц методами микроскопии (кратность увеличения - $\times 32$). Результаты наблюдений представлены схематично на рисунке 4.16. Видно, что в зоне аэрации с уменьшением глубины происходит дробление активного ила, а в зоне потребления кислорода (за аэрационной колонной) происходит его укрупнение с образованием более крупных хлопков, что косвенно подтверждает гипотезу о диффузионных ограничениях для денитрификации в таких сооружениях.

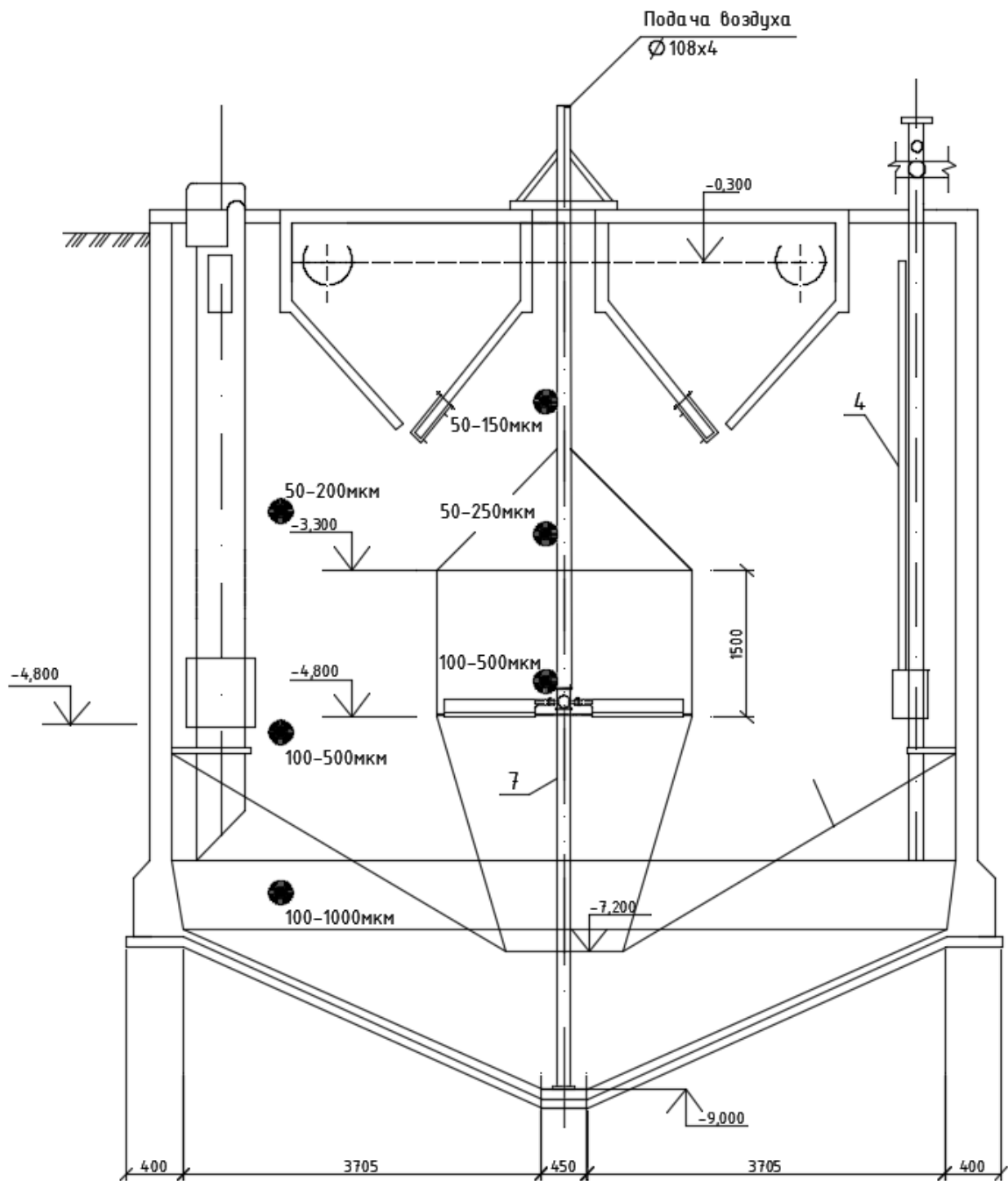


Рисунок 4.16. Наблюдаемый фракционный состав ила в различных точках (●) аэротенка-отстойника.

Анализируя эффективность очистки в аэротенке-осветлителе, отмечено, что соотношение БПК₅:N в поступающем стоке колеблется в пределах 3,6...4,9. Такие соотношения считаются приемлемыми для проведения ступенчатой нитриденитрификации, однако, в случае одновременных процессов, наблюдается

недостаток органического субстрата для проведения денитрификации. Это связано с описанными диффузионными ограничениями в хлопке активного ила.

С помощью составленной модели выполнено имитационное моделирование аэротенка-отстойника для определения требуемого соотношения БПК₅:N при одновременной нитри-денитрификации, которое составило не менее 5,5 гХПК/гN. При меньших соотношениях перед эрлифтными биореакторами необходимо устанавливать предварительные денитрификаторы с организацией нитратного рецикла (схема А-ЭБ) (рисунок 4.17).

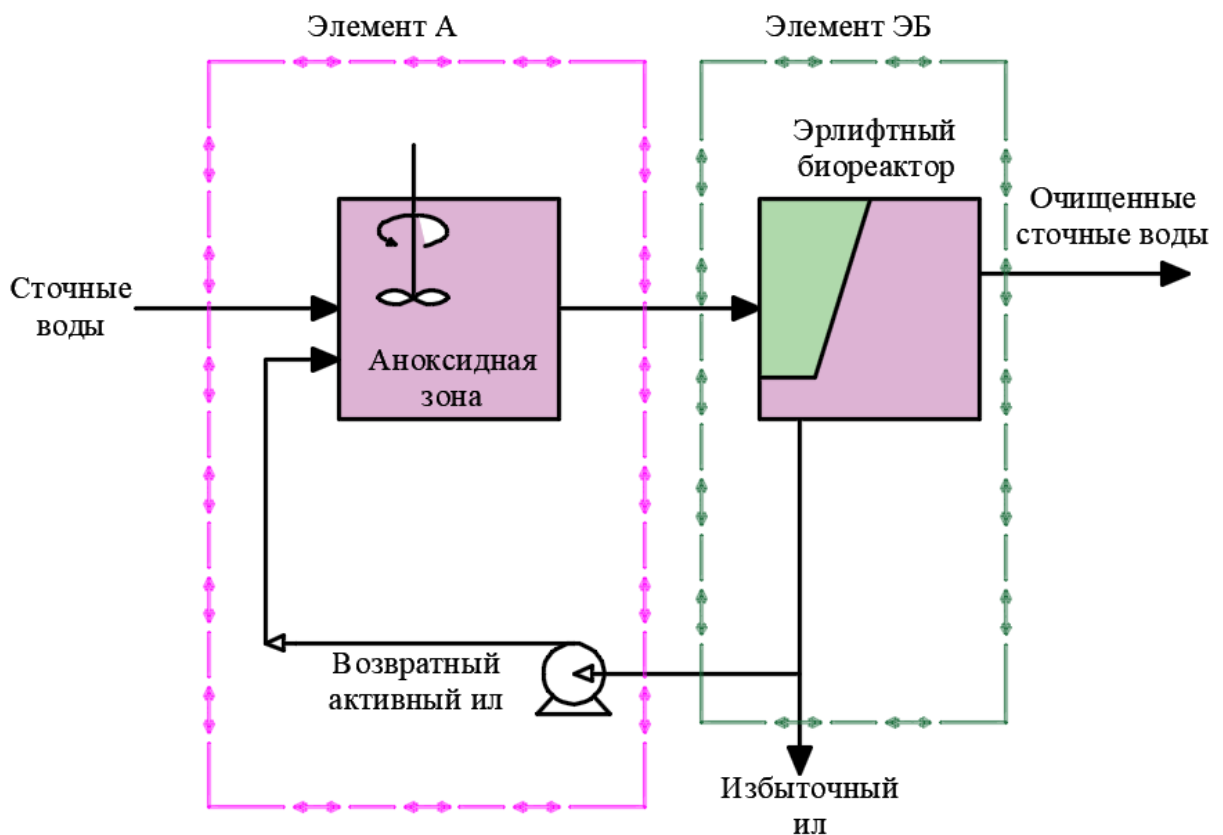


Рисунок 4.17 - Схема А-ЭБ с предварительной денитрификацией.

Схема на рисунке 4.17 аналогична известному процессу Лудзака-Эттингера, однако в ней отсутствует вторичный отстойник и объем зоны предварительной денитрификации сокращается за счет одновременных процессов в эрлифтном биореакторе.

4.2. Опытнo-промышленные исследования биологической очистки с одновременной нитри-денитрификацией эрлифтном биореакторе.

Для исследования эффективности биологической очистки сточных вод в схемах с эрлифтными биореакторами в условиях соотношениях БПК:N < 5,5, а также для проверки предложенных в третьей главе зависимостей проведены опытнo-промышленные исследования на реальных сточных водах города Донецка. Кроме того, задачей данных исследований являлось подтверждение гипотезы об укрупнении активного ила в зоне потребления кислорода эрлифтного биореактора, что влияет на величину диффузионных ограничений процессов денитрификации.

4.2.1 Описание технологической схемы опытнo-промышленной установки

Опытнo-промышленная установка разработана исходя из основных теоретических положений (третья глава) и реалий работы очистных сооружений г. Донецка. Установка расположена в здании решеток КНС № 52 г. Донецка. Забор сточных вод на обработку осуществляется после предварительной механической очистки (процеживания). Технологическая реализация пилотной установки приведена на рисунке 4.18.

Подача воды осуществляется с помощью погружного канализационного насоса (1) на высоту порядка 8м, в наземную часть помещения решеток, где располагался основной блок сооружений. Усреднитель объемом 300л (3) находился постоянно в наполненном состоянии за счет протока по линиям (2) и (18). Это позволило обеспечить бесперебойность подачи стока на очистку и исключало застаивание стока в усреднителе. Сам насос (1) работал с периодическим включением/выключением ввиду колебаний уровня воды в приемном резервуаре.

Сточные воды из бака постоянного уровня (6) по трубопроводам (8) поступают в емкости для анаэробно/аноксидной очистки (9,10). Емкости оснащены устройствами перемешивания (19).

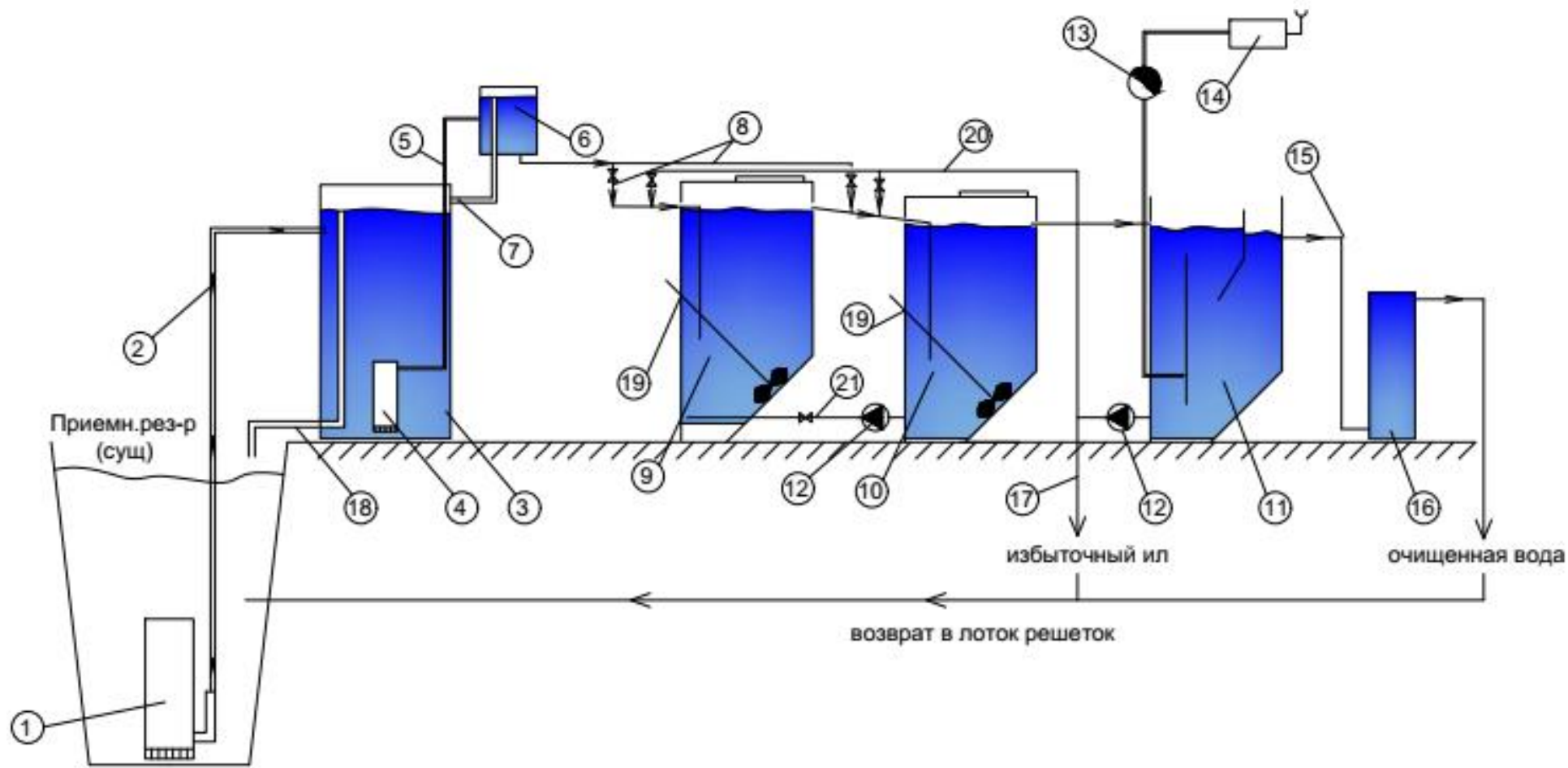


Рисунок 4.18 - Технологическая схема опытно-промышленной установки.

Обозначения на рисунке 4.18:

- | | |
|---|---|
| 1 – погружной канализационный насос; | 11 – эрлифтный биореактор, 900л; |
| 2 – линия подачи исходного стока в усреднитель, Ø25мм; | 12 – насос возвратного ила; |
| 3 – усреднитель-отстойник, 300л; | 13 – расходомер воздуха; |
| 4 – погружной канализационный насос; | 14 – воздуходувка; |
| 5 – линия подачи исходного стока в бак постоянного уровня, Ø15мм; | 15 – линия отвода очищенного стока, Ø32мм; |
| 6 – бак постоянного уровня, 20л; | 16 – емкость очищенной воды, 50л; |
| 7 – переливная линия бака постоянного уровня, Ø50мм; | 17 – линия отвода избыточного ила, Ø8мм |
| 8 – линия подачи исходного стока анаэробный реактор, Ø25мм; | 18 – переливная линия усреднителя, Ø50мм; |
| 9 – анаэробный/аноксидный закрытый реактор, 47л; | 19 – механическая мешалка. |
| 10 – анаэробный/аноксидный закрытый реактор, 47л; | 20 – линия рецикла возвратного ила, Ø8мм |
| | 21 – линия денитрифицированного рецикла, Ø8мм |

Далее иловая смесь поступает на аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации (11), состоящий из 2-х зеркальных секций. Осветленная жидкость по 2-м трубопроводам (15) поступает в резервуар 16, который может работать как промежуточный бак либо третичный отстойник.

Воздух в систему подается с помощью объемного компрессора (14) через турбинный расходомер (13).

Для сброса избыточного активного ила и рециркуляции возвратного устроены 2 насоса (12) – по одному на каждую секцию, и один насос дополнительно

для устройства денитрифицированного рецикла. Линия (17) избыточного активного ила оснащена запорным устройством, как и линия возвратного ила.

Сооружения (9), (10), (11) размещены «по воде» - уровень жидкости в каждом следующем сооружении меньше, чем в предыдущем, на (9)-(10) перепад составляет 2,5 см, (10) - (11) – 35 см.

Линия рециркуляции (20), отвода избыточного ила (17), денитрифицированного рецикла (21) представлены гибкими силиконовыми трубками, оснащенными лабораторными зажимами. Остальные трубопроводы выполнены из полипропиленовых труб с устройством шаровых вентилей. Система канализации выполнена из раструбных полипропиленовых труб диаметром 32-50 мм.

Подача в аэраторы сжатого воздуха осуществляется через силиконовые трубки диаметром 10 мм.

Технологическая схема подразумевает круглосуточную работу установки. Бак – усреднитель одновременно является баком запаса сточной жидкости на время отключения насоса (1) в случае снижения уровня воды в резервуаре насосной станции и срабатывания поплавкового датчика насоса (1).

Контроль времени работы насоса (1) выполнялся по моточасам с помощью электрического счетчика, через который насос был подключен. Насос (4) также оснащен аварийным поплавковым датчиком на случай опорожнения емкости (3).

Расход сточной жидкости регулировался посредством изменения отметки расположения бака постоянного уровня (6).

4.2.2. Конструкция установки

Поэлементно расчет сооружений пилотной установки приведен в приложении В.

Важной задачей на этапе подачи сточной жидкости на очистку являлось устройство системы усреднения потока, которая состояла из 2-х емкостей (рисунок 4.19).



а)



б)

Рисунок 4.19 - Усреднение расхода: а – подключение бака постоянного уровня; б – обвязка усреднителя

Трубопровод (7) является погружным для минимизации аэрирования исходного стока в процессе усреднения. Исходный сток осветляется в емкости (3) и постоянно циркулирует между (7) и (3).

Анаэробный и аноксидный реакторы выполнены из трубы Д 200мм (Рисунок 4.20), закрытой сверху и снизу. Уровень смеси в биореакторах определялся с помощью пьезометров.



Рисунок 4.20 - Устройство анаэробного и аноксидного реакторов

Блок анаэробный/аноксидный реактор (А/А) предусматривает возможность переключения на работу как по схеме А-А-ЭБ, так и по А/А -ЭБ посредством разветвленной подачи стока, возможности переключения ввода рецикла, организованного гибкими шлангами, возможности отбора части выходящей иловой смеси из второго реактора для устройства денитрифицированного рецикла.

Денитрифицированный рецикл организовывается посредством погружения циркуляционного насоса под крышку биореактора с регулированием расхода с помощью лабораторного зажима на подающей линии из гибкого шланга.

Борьба с заиливанием гибкого шланга в местах перехвата лабораторным зажимом осуществлялась постоянной ревизией места зажима.

Аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации представляет из себя емкость из полиэтилена (т.н. «Еврокуб») со срезанной верхней частью (рисунок 4.21).

Внутри сооружение разделено перегородкой на 2 симметричные части, все внутренние перегородки выполнены из водостойкого пластика толщиной 5мм. По боковым стенкам на всю длину реактора устроена зона затопленного эрлифта, согласно приложению В. Внутри эрлифта на расчетную глубину погружены трубчатые перфорированные аэраторы (2шт+2шт) с размером отверстий 0,75 мм, которые имеют возможность регулирования по высоте. Регулирование аэратора по высоте обеспечивается за счет шпилек М6, закрепленных к корпусу биореактора.



Рисунок 4.21 - Общий вид аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

Наклонный потоконаправляющий козырек, отделяющий зону потребления кислорода от зоны осветления, выполнен из листового водостойкого пластика, закрепленного на направляющих из полипропиленовых труб (Рисунок 4.22.).



Рисунок 4.22 - Устройство наклонного козырька аэротенка-осветлителя

Система сбора осветленной воды устроена из полимерных трубопроводов диаметром 32 мм, с вырезами для сбора очищенной воды (Рисунок 4.23).



Рисунок 4.23 - Устройство сборных лотков.

Отвод очищенных сточных вод осуществлялся в одну сторону, на «фасад» очистной установки. С обратной стороны крепления водоприемных лотков выполнено эксцентрическое крепление, позволяющее регулировать уровень наклона лотков для обеспечения равномерного отвода жидкости по всей площади осветления.

4.2.3. Параметры работы установки.

Гидравлические параметры установки приняты в соответствии с данными второй и третьей главы. Основные параметры опытно-промышленной установки приведены в таблице 4.11. Для решения задач данной работы рассмотрена серия экспериментов, когда установка работала по схеме «А-А-ЭБ» (Рисунок 4.24). Сама установка работала более длительное время с серией различных экспериментов, часть которых в данной работе не рассматривается [231].

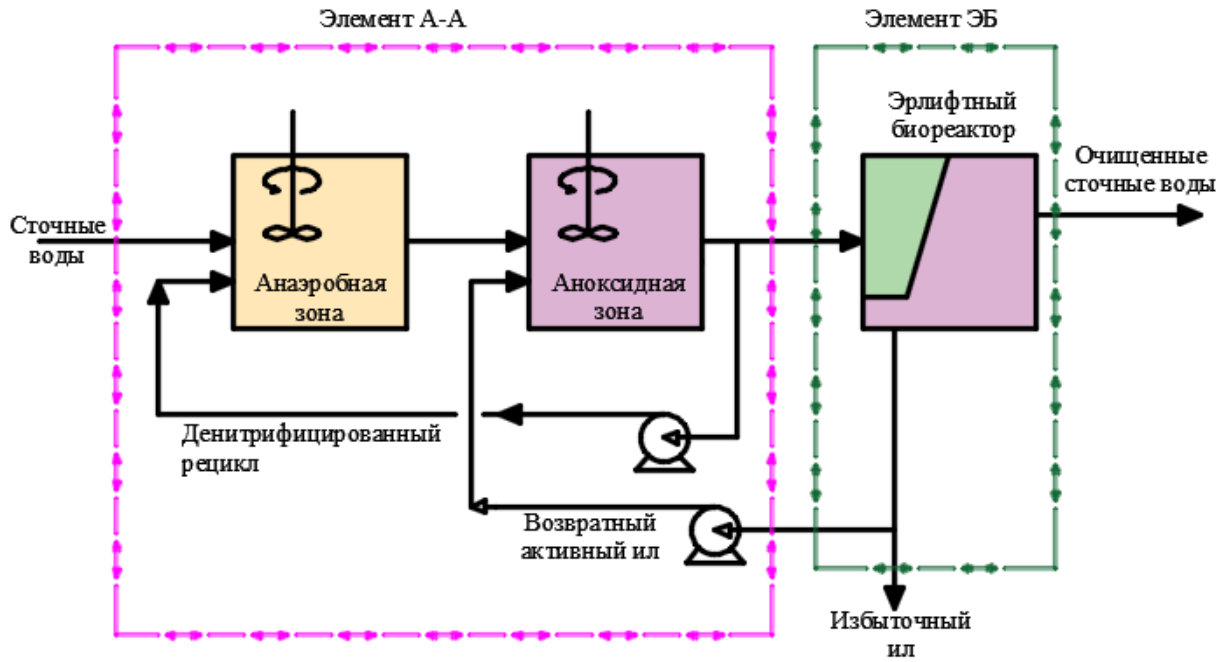


Рисунок 4.24 – Принципиальная схема опытно-промышленной установки в рассмотренной серии экспериментов.

Таблица 4.11 - Параметры опытно-промышленной установки.

Параметр	Обознач.	Ед. изм.	Значение
1	2	3	4
Расход поступающих сточных вод	q_1	$\text{м}^3/\text{сут}$	0,95
Внутренний циркуляционный расход аэротенка	q_{cir}	$\text{м}^3/\text{сут}$	144
Возвратный рецикл	q_r	$\text{м}^3/\text{сут}$	0,55
Денитрифицированный рецикл	q_{r1}	$\text{м}^3/\text{сут}$	3
Расход избыточного ила	q_{exc}	$\text{м}^3/\text{сут}$	0,012
Расход подаваемого воздуха	q_{air}	$\text{м}^3/\text{час}$	0,75
Коэффициент использования кислорода	k_{isp}		0,0455
Объем анаэробного реактора	W_3	м^3	0,047
Объем аноксидного реактора	W	м^3	0,047
Объем зоны насыщения кислородом	W_1	м^3	0,0225
Объем зоны потребления кислорода	W_2	м^3	0,425

Циркуляционный расход q_{cir} , $\text{м}^3/\text{сут}$, определяется по системе уравнений 3.16, в зависимости от геометрических размеров сооружения и интенсивности аэрации. Коэффициент использования кислорода определялся в зависимости от интенсивности аэрации и крупности пузырька воздуха, которая составляла 4 мм по формуле (3.25) с учетом (3.21).

Определяемые и контролируемые параметры в ходе опытно-промышленных испытаний приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.12 - Контролируемые параметры опытно-промышленной установки.

Параметр	Обознач.	Ед. изм.
ХПК в фильтрованной пробе очищенных сточных вод	$\text{ХПК}_{\text{ф}}^{\text{оч}}$	$\text{гO}_2/\text{м}^3$
ХПК в фильтрованной пробе иловой смеси после блока А/А	$\text{ХПК}_{\text{ф}}^{\text{А/А}}$	$\text{гO}_2/\text{м}^3$
Концентрация азота аммонийного по N в очищенном стоке	$S_{\text{NH}_4}^{\text{оч}}$	$\text{гN}/\text{м}^3$
Концентрация азота аммонийного по N после блока А/А	$S_{\text{NH}_4}^{\text{А/А}}$	$\text{гN}/\text{м}^3$
Концентрация азота нитратов по N в очищенном стоке	$S_{\text{NO}}^{\text{оч}}$	$\text{гN}/\text{м}^3$
Концентрация азота нитратов по N после блока А/А	$S_{\text{NO}}^{\text{А/А}}$	$\text{гN}/\text{м}^3$
Концентрация фосфатов по P в очищенном стоке	$S_{\text{PO}_4}^{\text{оч}}$	$\text{гP}/\text{м}^3$
Концентрация фосфатов по P после блока А/А	$S_{\text{PO}_4}^{\text{А/А}}$	$\text{гP}/\text{м}^3$
Концентрация активного ила в аэротенке-осветлителе	a_i	$\text{г}/\text{м}^3$
Концентрация взвешенных веществ в очищенной воде	$C_{\text{ВВ}}^{\text{оч}}$	$\text{г}/\text{м}^3$

Определение указанных показателей проводилось по методикам, описанным во второй главе данной работы.

К исходным факторам опытно-промышленной установки относится также качественный состав поступающих сточных вод. Исходный состав поступающих сточных вод на очистку приведен в таблице 4.13. Следует охарактеризовать данный сток как достаточно стабильный по составу, что может быть объяснено спецификой именно КНС№52, которая собирает сток с жилой застройки Калининского района

г. Донецка с приемом стоков от КНС «Красногвардейская» одноименного района г. Макеевки, также характеризующегося в основном жилой городской застройкой.

Таблица 4.13 - Изменение состава сточных вод.

Дата	ХПК, гО/м ³	БПК ₅ , гО/м ³	P-PO ₄ гP/м ³	N-NH ₄ гN/м ³
07.06.2021	232	112	0,96	20,10
10.06.2021	244	не изм.	1,18	18,50
17.06.2021	237	106	1,22	20,30
21.06.2021	220	не изм.	0,88	22,70
24.06.2021	228	116	0,97	23,00

Соотношение БПК:N для данных сточных вод составило $\approx 5,0..5,5$, что является недостаточным для применения схемы с одним эрлифтным биореактором и требуется предварительная денитрификация, что и было реализовано в опытно-промышленной установке.

4.2.4. Результаты экспериментов и их обработка.

Результаты измерений при работе системы биологической очистки приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 - Результаты работы полупромышленной установки БОСЭБ

Дата	S _{NH₄} ^{A/A}	S _{NH₄} ^{оч}	S _{NO₃} ^{A/A}	S _{NO₃} ^{оч}	S _{PO₄} ^{A/A}	S _{PO₄} ^{оч}	ХПК _ф ^{A/A}	ХПК _ф ^{оч}	a _i	C _{ВВ} ^{оч}
	гN/м ³	гN/м ³	гN/м ³	гN/м ³	гP/м ³	гP/м ³	гO ₂ /м ³	гO ₂ /м ³	г/м ³	г/м ³
07.06.2021	13,40	0,90	1,60	14,40	2,80	1,40	47,00	32,00	3,25	21
10.06.2021	13,10	0,90	1,20	12,80	3,20	1,30	45,00	36,00	3,30	22
17.06.2021	13,90	0,70	2,40	14,60	2,20	1,60	43,00	38,00	3,20	23
21.06.2021	14,00	0,50	4,60	16,40	1,80	1,60	46,00	35,00	3,27	20
24.06.2021	12,80	0,70	4,40	18,80	1,90	1,80	48,00	34,00	3,31	21

Индекс «A/A» в таблице 4.14 указывает на значение параметра на выходе из блока «анаэробный-аноксидный реактор». Индекс «оч» соответствует значению параметра на выходе из эрлифтного биореактора.

Концентрации кислорода в эрлифтном биореакторе, в сопоставление с концентрацией активного ила приведены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 - Концентрации кислорода в аэротенке-осветлителе.

Подача воздуха Q_{air} , $m^3/час$	a_i г/л	Зона насыщения кислородом, $г/дм^3$	Верх зоны потребления кислорода, $г/дм^3$	Низ зоны потребления кислорода, $г/дм^3$
0,75	3,27	3,2...3,8	2,2...2,8	1,4...2,0

Согласно положениям подраздела 2.3 в программной среде CellDesigner заданы все биологические процессы, а также поступление, отвод сточных вод и избыточного ила, рециркуляция внутри сооружения и перетоки между зонами. Вид организации перетоков и рециклов представлен на рисунке 4.25 на примере баланса массы органического растворенного субстрата S_s . Аналогичным образом записываются уравнения для всех компонентов ASM3P-2SND.

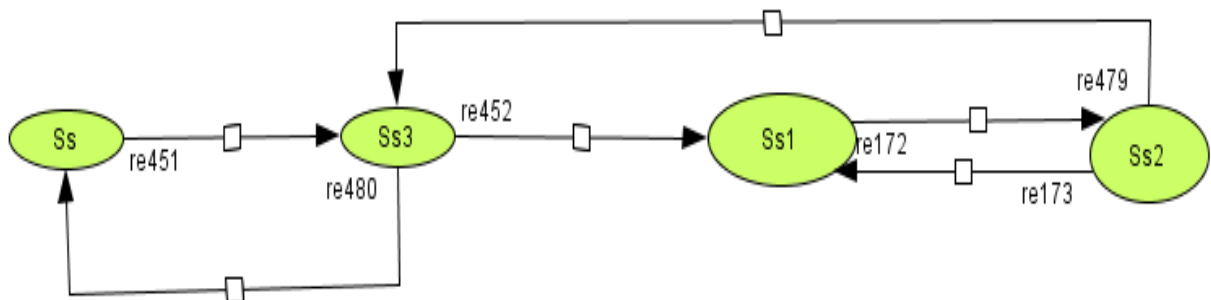


Рисунок 4.25 - Введение перетоков и рециклов по схеме «А-А-ЭБ» в CellDesigner для параметра S_s .

Общий вид имитационной модели схемы «А-А-ЭБ» в CellDesigner при описании биологических процессов по ASM3P-2SND приведен на рисунке 4.26. Программе для имитационного моделирования заданы все стехиометрические и кинетические параметры биологической очистки согласно таблице 3.9 и перетоков в соответствующем окне.



Рисунок 4.26 – Общий вид модели схемы «А-А-ЭБ» в CellDesigner при описании биологических процессов по ASM3P-2SND.

Предположительные значения («guess value») калибруемых величин, приведенные в таблице 4.16.

Таблица 4.16 - Предположительные значения калибруемых величин.

Калибруемый параметр	Обозн.	Ед.изм.	Значение
Понижающий коэффициент денитрификации $\text{NO}_3\text{-NO}_2$	η_{NO_3}		0,1
Понижающий коэффициент денитрификации $\text{NO}_2\text{-N}_2$	η_{NO_2}		0,1
Максимальная скорость роста X_{AOB}	μ_{AOB}	сут^{-1}	0,4
Максимальная скорость роста X_{NOB}	μ_{NOB}	сут^{-1}	0,9
Содержание P в X_S	i_{P,X_S}	$\text{г P.г } X_S^{-1}$	0,007*
Коэффициент понижения S_O за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,O}$		0,7
Коэффициент понижения S_s за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,SS}$		0,7
Растворенная биоразлагаемая органика	S_S	г ХПК.м^{-3}	60
Нерастворённая биоразлагаемая органика	X_S	г ХПК.м^{-3}	100

* - коэффициент определен исходя из разницы общего и растворенного фосфора, отнесенного к предполагаемому значению X_S .

Далее, согласно разработанной в подразделе 4.1 методике, выполнена проверка на сходимость, настройка и калибровка имитационной модели. Результаты калибровки представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 - Полученные значения калибруемых величин.

Калибруемый параметр	Обозн.	Ед.изм.	Значение
Понижающий коэффициент денитрификации $\text{NO}_3\text{-NO}_2$	η_{NO_3}		0,2
Понижающий коэффициент денитрификации $\text{NO}_2\text{-N}_2$	η_{NO_2}		0,2
Максимальная скорость роста X_{AOB}	μ_{AOB}	сут^{-1}	0,4
Максимальная скорость роста X_{NOB}	μ_{NOB}	сут^{-1}	1,1
Содержание P в X_S	i_{P,X_S}	$\text{г P.г } X_S^{-1}$	0,007
Коэффициент понижения S_O за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,O}$		0,8
Коэффициент понижения S_s за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,SS}$		0,9

Результаты калибровки в сравнении фактическими показателями качества очистки по азоту аммонийному, нитрату и фосфатам представлены на рисунках 4.27. – 4.31.

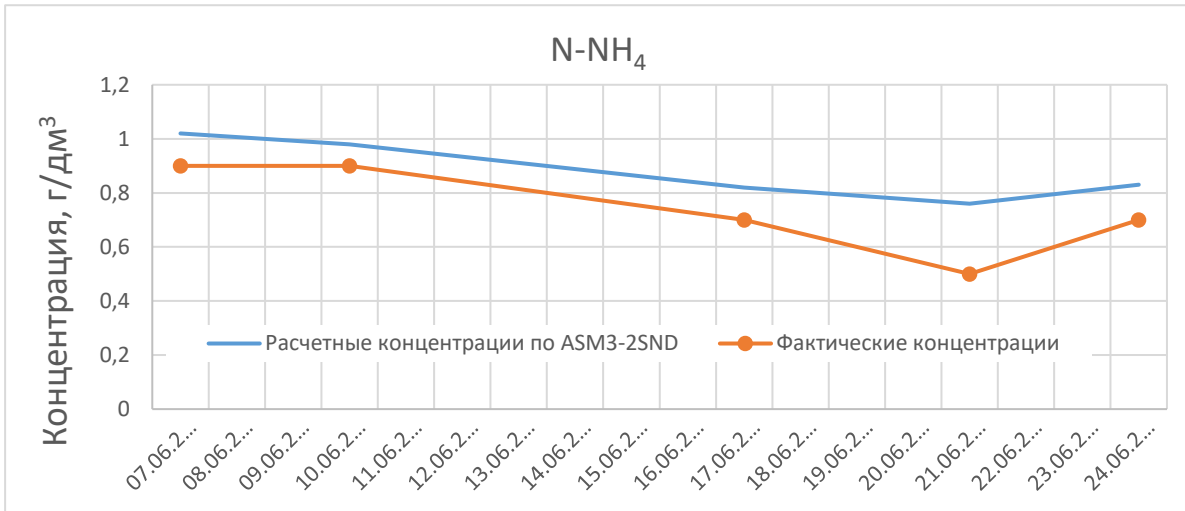


Рисунок 4.27 - Результаты калибровки по N -NH₄ на выходе из сооружения

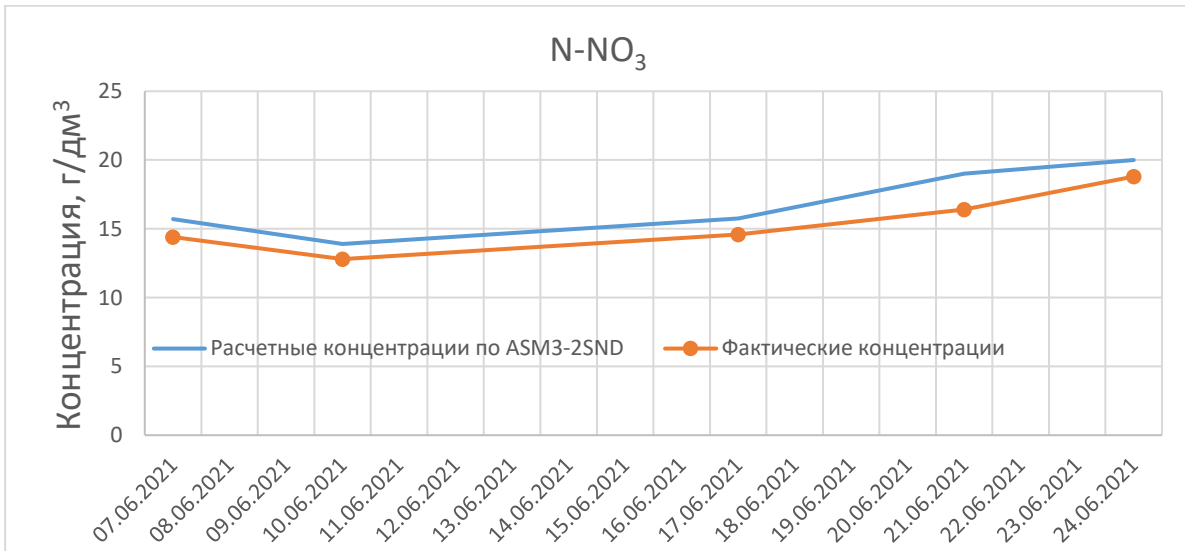


Рисунок 4.28 - Результаты калибровки по N -NO₃ на выходе из сооружения

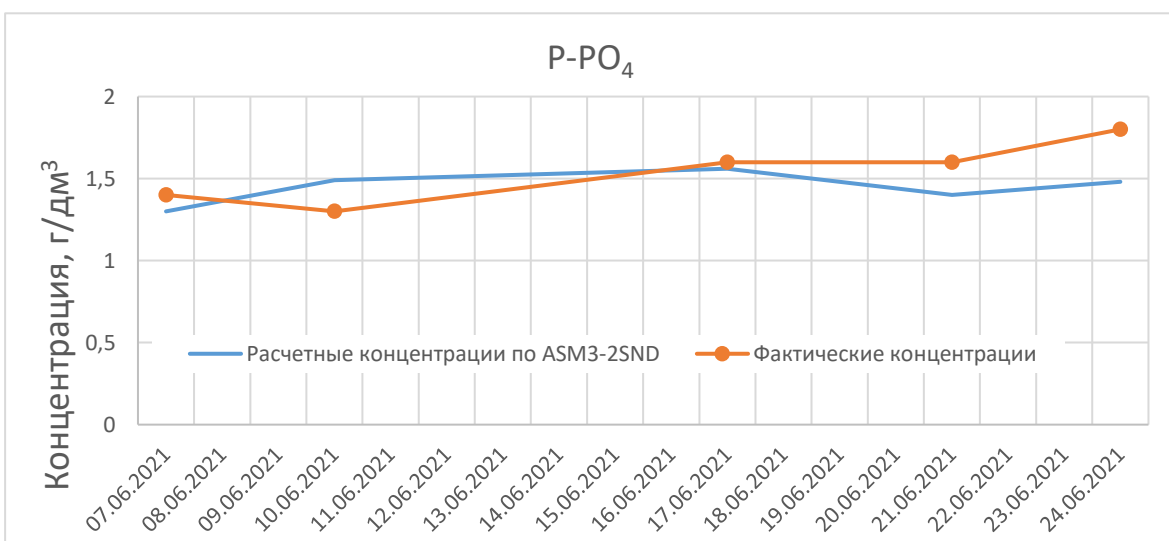


Рисунок 4.29 - Результаты калибровки по P -PO₄ на выходе из сооружения

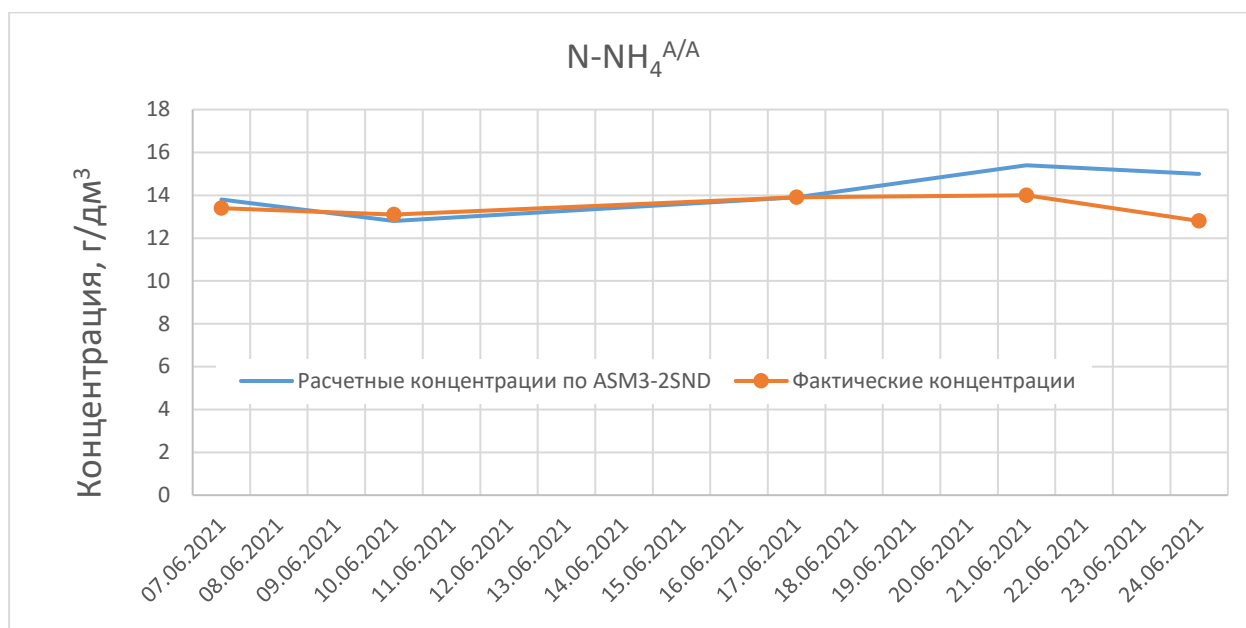


Рисунок 4.30 - Результаты калибровки по N-NH₄ на входе в эрлифтный биореактор

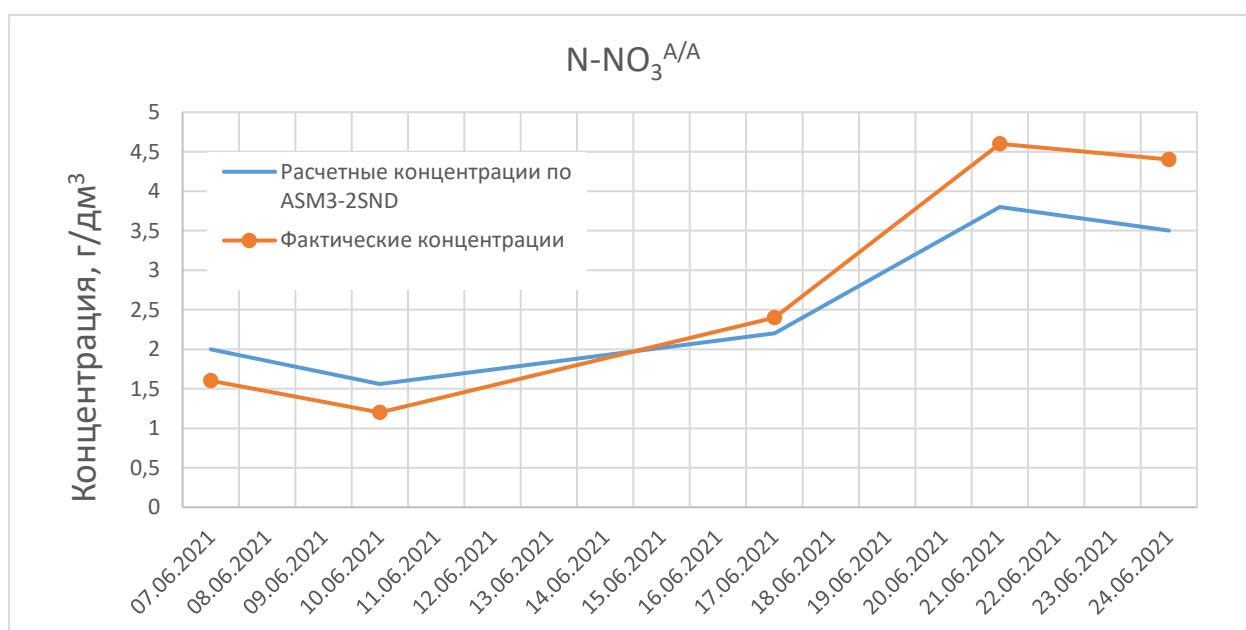


Рисунок 4.31 - Результаты калибровки по N-NO₃ на входе в эрлифтный биореактор

Концентрация нитрит-иона как в эксперименте, так и в расчетной модели составила менее 0,1 мг/дм³ по N, поэтому на калибровочных графиках не представлена. Средняя точность модели – 89%.

Интерес представляют полученные данные по значениям коэффициентов понижения концентрации кислорода и субстрата за счет диффузии $K_{D,O}$ и $K_{D,SS}$. Как видно из таблицы 4.17, они составляют соответственно 0,8 и 0,9. Крупность ила по

глубине менялась незначительно в пределах 50...350 мкм. Глубина опытно-промышленной установки – 0,9м. В то же время, на глубине натурной установки (ОС п.г.т. Новый Свет) более 8м эти коэффициенты составляли 0,45 и 0,3 соответственно $K_{D,O}$ и $K_{D,SS}$. Таким образом, можно сделать вывод о зависимости этих коэффициентов от глубины сооружения, и, как следствие, крупности ила.

Для установления зависимости концентрации взвешенных веществ в очищенных сточных водах от интенсивности аэрации, проведена дополнительная серия опытно-промышленных экспериментов. Интенсивность аэрации варьировалась от 13,8 до 16,2 $m^3/(m^2 \cdot ч)$ при постоянной нагрузке на осветлитель. Результаты исследований приведены в таблице 4.18. и на рисунке 4.32.

Таблица 4.18 – Результаты исследований по определению влияния интенсивности аэрации на эффективность осветления во взвешенном слое

Интенсивность аэрации, $m^3/(m^2 \cdot ч)$	Концентрация взвешенных веществ на выходе, $г/м^3$	Интенсивность аэрации, $m^3/(m^2 \cdot ч)$	Концентрация взвешенных веществ на выходе, $г/м^3$
15	23	13,8	19
15,8	24	14,4	19
16,2	24	15,0	22
15,0	22	15,8	24
15,8	24	16,2	25
16,2	24	13,8	18
15,0	23	14,4	21
15,8	25	15,0	22
16,2	25	15,8	25
		16,2	24
		13,8	17
		14,4	19
		15,0	23
		15,8	25
		16,2	25

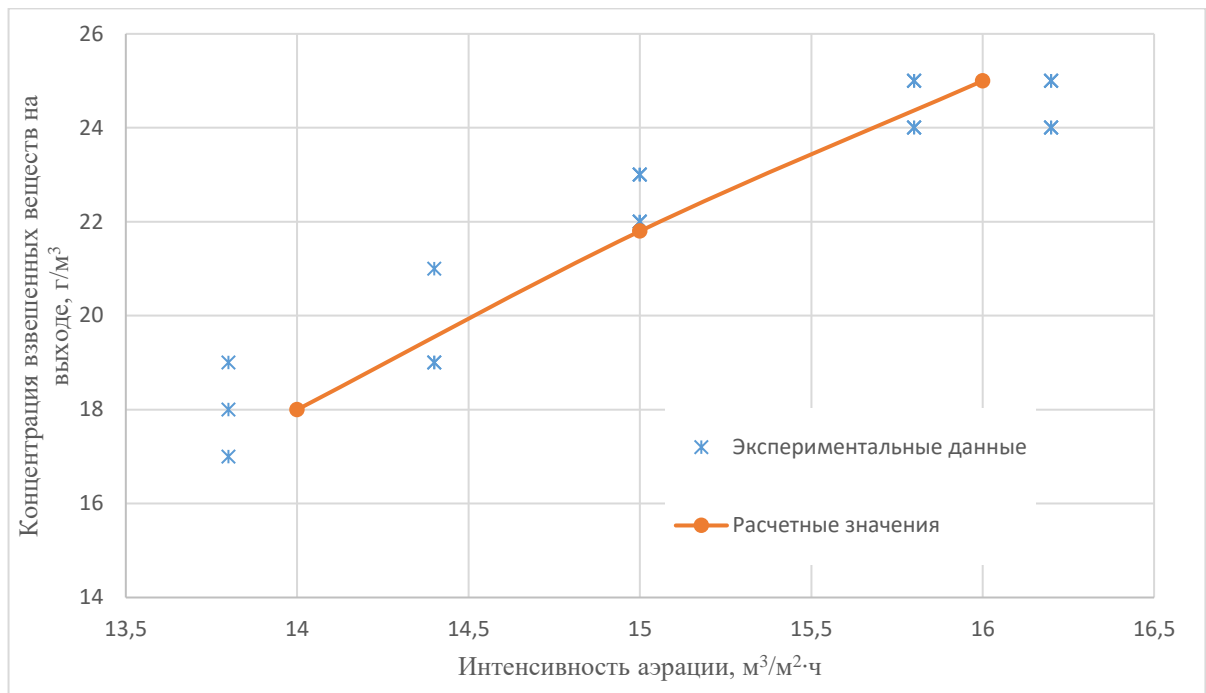


Рисунок 4.32 - Результаты эксперимента по определению качества осветления в эрлифтном биореакторе.

Расчетные значения эффективности осветления определены совместным решением системы 3.16 и уравнения 3.32. Таким образом, можно судить о достоверности предложенного способа расчета самообновляющегося взвешенного слоя.

В результате опытно-промышленных исследований установлено, что разработанные для описания физических и биологических процессов в системах БОСЭБ математическая модели достаточно точно описывают работу таких сооружений биологической очистки сточных вод. Подтверждена эффективность схем очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами при удалении органических загрязнений и соединений азота.

4.3. Выводы к четвертой главе

1. В натуральных и опытно-промышленных условиях апробирована технология биологической очистки с эрлифтными биореакторами. Установлено

минимальное соотношение БПК₅:N для удаления соединений азота без предварительной денитрификации, которое составило 5,5.

2. Разработана методика проверки на сходимость, настройки и калибровки предложенной модели ASM3P-2SND с помощью вычислительных средств программного комплекса CellDesigner.
3. Выполнена калибровка имитационной модели ASM3P-2SND для натурной и опытно-промышленной установки биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами, которая показала сходимость для прогнозирования качества очистки с точностью не менее 87%.
4. Установлены значения расчетных коэффициентов понижения концентраций кислорода $K_{D,O}$ и растворенного органического субстрата и $K_{D,SS}$, которые зависят от глубины эрлифтного биореактора.
5. Установлены значения стехиометрического коэффициента $i_{P,XS}$, который указывает на содержание фосфора фосфатов, образующегося при гидролизе 1 г нерастворенного органического субстрата. Для сточных вод г. Донецка он составил 0,007 г/г, для п.г.т. Новый Свет – 0,003 г/г.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМ БОСЭБ

5.1. Область применения технологических схем БОСЭБ

Основные положения концепции БОСЭБ (вторая глава) предусматривают четыре основные технологические схемы для очистки сточных вод с применением эрлифтных биореакторов (Рисунок 5.1):

А) Схема с одним элементом «ЭБ» - эрлифтным биореактором, в который поступают сточные воды после механической очистки. Очищенные сточные воды поступают на обеззараживание либо на доочистку по взвешенным веществам с пост-осаждением фосфора. Схема «ЭБ» не предусматривает доочистки по взвешенным веществам и соединениям азота в пределах своей области применения. Согласно результатам экспериментальных исследований, соотношение БПК₅:N в исходных сточных водах должно составлять не менее 5,5.

Б) Схема с предварительным денитрификатором перед эрлифтным биореактором («А-ЭБ»), которая предусматривает 1 рецикл для снижения остаточной концентрации нитратов. При этом, за счет процессов одновременной нитри-денитрификации, нагрузка по нитратам на предварительный денитрификатор снижается, что позволяет сократить его объем по сравнению с известной схемой Лудзака-Эттингера.

В) Схема с последовательно расположенными («А-А-ЭБ») предварительным анаэробным реактором для культивирования фосфор-аккумулирующих микроорганизмов и аноксидным реактором для предварительной денитрификации. Между зонами устраиваются возвратный и денитрифицированный рециклы. По сути, схема является аналогом известного процесса МУСТ с тем отличием, что по технологии БОСЭБ три элемента (аноксидная зона, аэробная зона, вторичный отстойник) заменены эрлифтным биореактором «ЭБ». Кроме того, исключается необходимость устройства дополнительного нитратного рецикла.

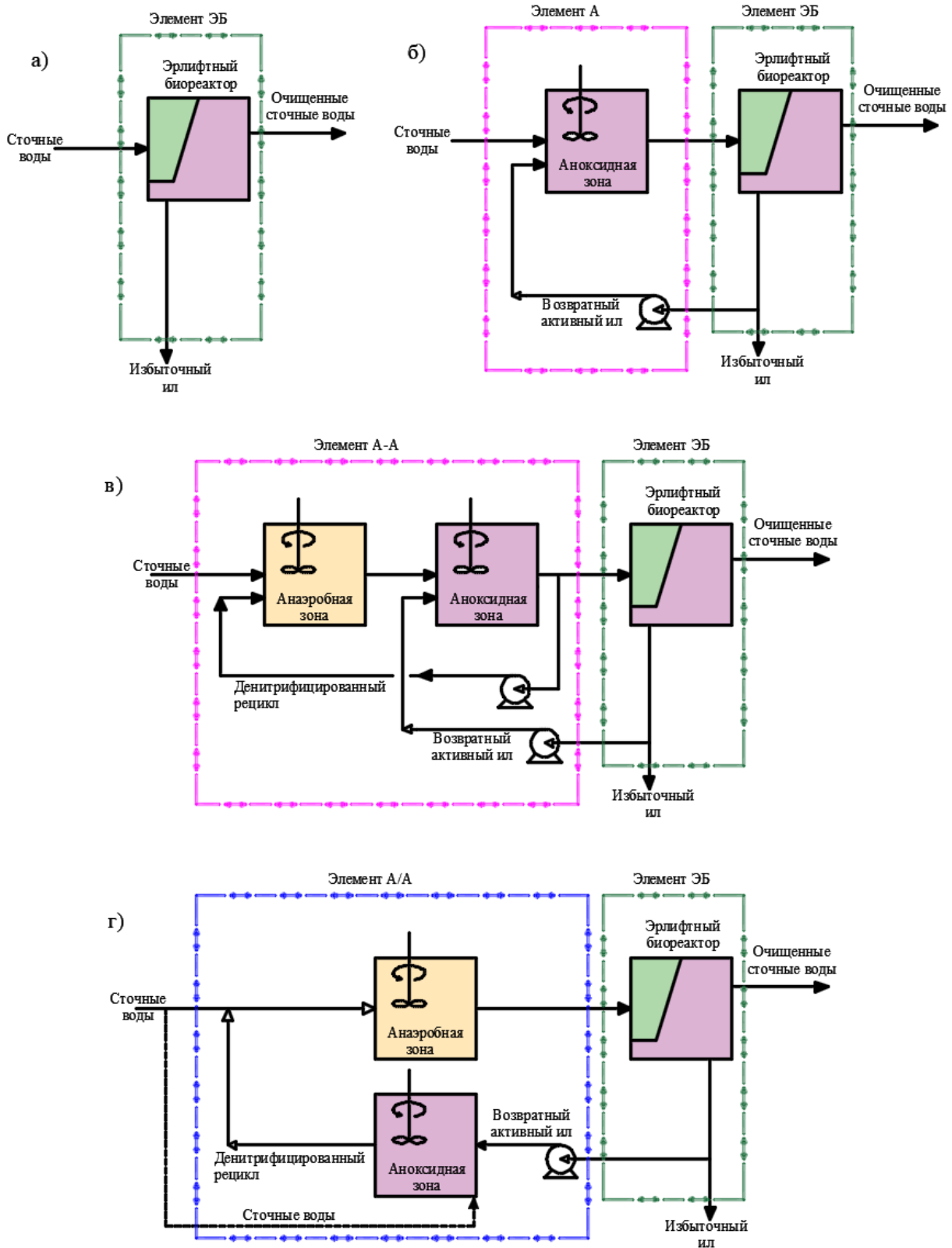


Рисунок 5.1 - Схемы биологической очистки от соединений азота и фосфора в рамках концепции БОСЭБ: а) – схема «ЭБ»; б) – схема «А-ЭБ»; в) – схема «А-А-ЭБ»; г) – схема «А/А-ЭБ».

Г) Схема с параллельно расположенными предварительным анаэробным и аноксидным реакторами («А/А-ЭБ»). Является аналогом известного процесса JNB с теми же оговорками, что и при сравнении «А-А-ЭБ» с МУСТ.

Поскольку в натуральных и опытно-промышленных исследованиях рассматривались только схемы «ЭБ» и «А-ЭБ», для установления области применения всех процессов БОСЭБ выполнено имитационное моделирование по ASM3P-2SND для каждой из представленных на рис. 5.1 схем. Для процессов «А-А-ЭБ» и «А/А-ЭБ» дополнительно использовался модуль Bio-P (IWA), параметры которого приведены в первой главе и приложениях А, Б.

При этом все разнообразие возможных комбинаций состава исходного стока не рассматривалось, в данном исследовании были приняты соотношения форм ХПК, характерные для г. Донецк (четвертая глава), при имитации варьировались концентрации азота аммонийного и фосфатов в исходных сточных водах.

В результате имитационного моделирования установлено, что схема и «А-ЭБ» способна обеспечить качество очистки по органическим веществам и соединениям азота до уровня ЦТП при соотношении БПК₅:N не менее 4,5. Схемы «А-А-ЭБ» и «А/А-ЭБ» идентичны по результатам имитационного моделирования и обеспечивают биологическое удаление органических веществ, соединений азота и фосфора при граничном соотношении БПК₅:N:P равном 100:19:1,8. Область применения различных схем технологии БОСЭБ представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Область применения технологических схем БОСЭБ

Схема	Производительность очистки, м ³ /сут	Условия биологического удаления органических веществ и соединений азота	Условия биологического удаления органических веществ, соединений азота и фосфора
«ЭБ»	до 10 000	БПК ₅ :N > 100:18	не применима
«А-ЭБ»	до 10 000	БПК ₅ :N > 100:22	не применима
«А-А-ЭБ» и «А/А-ЭБ»	5 000 – 10 000	не требуется применять	БПК ₅ :N > 100:19 БПК ₅ :P > 100:1,8

При производительности очистных сооружений менее 5 000 м³/сут биологическое удаление фосфора не предусматривается из соображений рациональности, что многократно указывалось разными авторами, однако в каждом конкретном случае следует оценивать технико-экономическую эффективность каждого из решений.

5.2. Рекомендации на проектирование систем БОСЭБ

Для биологического удаления органических веществ и соединений азота рекомендуются схемы «ЭБ» и «А-ЭБ» (в зависимости от исходного состава сточных вод). Для биологического удаления соединений азота и фосфора из городских сточных вод рекомендуется использование схемы, которая состоит из аноксидного биореактора, анаэробного биореактора и аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (обозначение схемы – «А/А-ЭБ»).

Схема очистки предусматривает вторичное илоразделение в аэротенке-осветлителе посредством устройства в нем зоны илоотделения во взвешенном слое осадка. Потокораспределение сооружений биологической очистки подразумевает наличие одного нитрифицированного рецикла с отбором возвратной иловой смеси из нижней зоны аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтного биореактора).

Исходный сток распределяется между аноксидным и анаэробным реакторами в пропорции 40:60, что обеспечивает органическим питанием в первом биореакторе процессы денитрификации, во втором – процессы высвобождения фосфатов.

Избыточный активный ил совместно с возвратной иловой смесью отбирается из нижней зоны аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтного биореактора) и отводится на дальнейшую стабилизацию и сгущение по известным технологиям.

Описание схемы биологической очистки А/А-ЭБ. Модифицированная применением эрлифтного биореактора схема Йоханнесбургского процесса

биологической очистки приведена на рисунке 5.2. Исходный сток после первичного отстаивания расходом q_1 ($\text{м}^3/\text{сут}$) поступает в пропорциях 40:60 в аноксидный и анаэробный реакторы объемом W (м^3) каждый. В этих сооружениях устраиваются системы перемешивания в бескислородных условиях. В аноксидный реактор, помимо указанной доли исходного стока, осуществляется подача возвратной иловой смеси расходом q_r ($\text{м}^3/\text{сут}$), в анаэробный реактор поступает исходный сток в количестве 60% от общего расхода q_1 и сток аноксидного реактора.

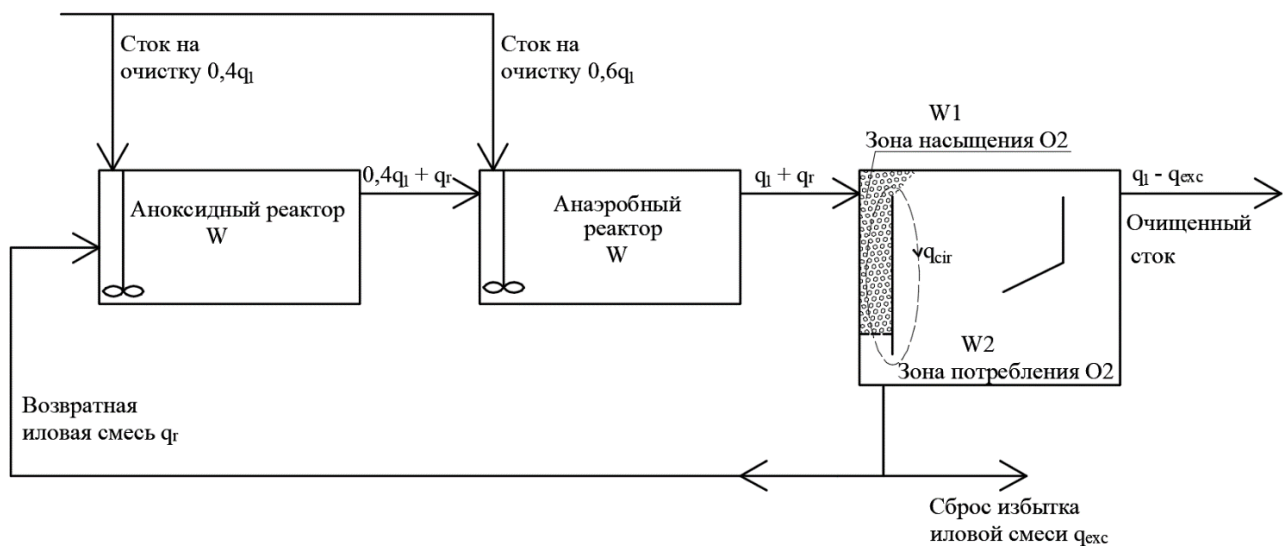


Рисунок 5.2 - Расчетно-принципиальная схема процесса А/А-ЭБ

Далее иловая смесь поступает в эрлифтный биореактор, состоящий из двух зон: зоны насыщения кислородом воздуха объемом $W1$ (м^3) и зоны потребления кислорода $W2$ (м^3). В данном сооружении посредством затопленного эрлифта создается внутренняя циркуляция расходом q_{cir} ($\text{м}^3/\text{сут}$). Из нижней зоны аэротенка-осветлителя осуществляется отбор иловой смеси в количестве суммы расхода возвратного q_r и избыточного q_{exc} ила ($\text{м}^3/\text{сут}$). Из зоны осветления (которая входит в состав зоны потребления кислорода $W2$) в верхней части сооружения осуществляется отвод биологически очищенных сточных вод.

Аноксидный реактор предназначен для обеспечения протекания процессов денитрификации с целью снижения концентрации нитратов в возвратной иловой

смеси. Добавление исходного стока в это сооружение обеспечивает протекающие аноксидные гетеротрофные процессы необходимым органическим субстратом.

Анаэробный реактор выполняет функцию культиватора фосфор-аккумулирующих микроорганизмов (ФАО), в котором эти микроорганизмы осуществляют накопление поли-β-гидроксиалканоатов (ПГА) с высвобождением ортофосфатов в окружающую жидкую фазу.

Эрлифтный биореактор (аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации) выполняет ряд функций:

1. Культивирование автотрофных микроорганизмов – нитрификаторов, осуществляющих в аэробных условиях биологическое окисления азота аммонийного до азота нитратов.

2. Наряду с нитрификацией, в данном сооружении одновременно протекают процессы денитрификации с восстановлением нитратов до свободного азота, что увеличивает качество очистки по общему азоту.

3. В аэробных условиях сооружения происходит интенсивный рост ФАО с потреблением фосфатов и накоплением внутриклеточных полифосфатов, что обеспечивает улучшенное биологическое удаление фосфора.

4. В зоне осветления, которая также задействована в процессе биологической очистки, происходит илоразделение в обновляющемся взвешенном слое активного ила.

Расчет сооружений биологической очистки в схеме А/А-ЭБ

Исходными данными для расчета систем биологической очистки является состав и расход поступающих городских и смешанных сточных вод. Согласно СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения, исходные данные для проектирования развития и реконструкции существующих очистных сооружений следует принимать на основании полученных должным образом результатов контроля расхода и свойств поступающих сточных вод за период не менее 3 лет, с учетом перспективного развития поселений и городских округов.

Поскольку предложенный далее подход к расчету сооружений базируется на современных моделях активного ила (в частности, ASM3+Bio-P), состав поступающих сточных вод должен быть приведен к стандартизированному Международной водной ассоциацией (IWA) виду.

Сопоставление классических измерений состава сточных вод и по СП СП 32.13330.2018 и стандартизированных параметров приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Соответствие стандартизированных компонентов показателям состава сточных вод.

Показатель исходного стока	Компоненты в ASM3+Bio-P
БПК ₅	S_S, S_I, X_I, X_S
ВВ	$X_{TSS}, (X_I, X_S)$
N-NH ₄ ⁺	S_{NH4}
N-NO ₃ ⁻	S_{NO}
P-PO ₄ ³⁻	S_{PO4}

Как видно из таблицы 5.2, биогенные элементы (соединения азота и фосфора) имеют прямое выражение стандартизированных величинах, а компоненты БПК₅ представлены рядом взаимно пересекающихся параметров.

Для **предварительного** определения исходных параметров органических веществ при моделировании ASM, на основании данных химических анализов, следует решать **методом подбора** следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} S_S + X_S = 1,47 \text{ БПК}_5 \\ X_S + X_I = 1,45 \cdot (0,8) \cdot C_{ВВ} \\ S_S + S_I + X_S + X_I = \text{ХПК} \\ S_S + S_I = \text{ХПК}_\phi \end{cases} \quad (5.1)$$

Для ориентировочного определения сходного состава необходимо получение 4х результатов лабораторных исследований исходного стока: БПК₅, ХПК взболтанной пробы, ХПК фильтрованной пробы (ХПК_ф), концентрации взвешенных веществ.

Для уточнения фракционирования ХПК необходимы респирометрические исследования на адаптированном активном иле и окончательно – калибровка модели на действующих сооружениях.

Механическая очистка, усреднение и первичное отстаивание рассчитываются по зависимостям и на основании рекомендаций раздела 9 СП 32.13330.2018.

Анаэробный и аноксидный реакторы принимаются из расчета времени пребывания иловой смеси в них 0,5-0,75 часа с учетом рецикла. Для унификации размеров сооружений допускается принимать различное время в аэробном и аноксидном реакторе для достижения одинакового объема в этих ступенях. Фактический объем этих сооружений уточняется по результатам биохимического расчета.

Аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации. Основные геометрические размеры сооружения определяются в следующем порядке.

Полезный объем биореактора-осветлителя определяется по формуле:

$$W = \frac{Q_{\text{сут}} \cdot (L_{\text{en}} - L_{\text{ex}})}{a_i \cdot (1 - A) \cdot 10^3 \cdot B_x}; \text{ м}^3 \quad (5.2)$$

где L_{en} – БПК на входе в сооружение, мг/л

L_{ex} – БПК на выходе в сооружение, мг/л

a_i – концентрация активного ила, (2,5...4,5) мг/л

B_x – нагрузка на активный ил, (предварительно принимается 0,2) г/(г·сут)

Тогда:

Рассчитывается окислительная мощность биологического реактора:

$$OM = \rho \cdot a_i \cdot (1 - A) \cdot W, \quad (5.3)$$

где ρ – удельная скорость окисления, (0,006) г/(г·ч).

Вычисляется требуемый расход воздуха:

$$Q_{\text{air}} = \frac{OC}{k_{\text{исп}} \cdot M_O}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (5.4)$$

где OC – окислительная способность аэрационной системы, принимаемая равной окислительной мощности аэротенка-осветлителя OM , кг/ч;

M_O – массовое содержание кислорода в подаваемом воздухе, (0,27) кг/м³;

$k_{исп}$ – коэффициент использования кислорода воздуха, определяемый исходя из глубины и типа аэраторов по формуле:

$$K_{И} = \frac{1}{\delta_{П}} \sqrt{D_T \cdot \zeta \frac{\rho \cdot \left(V_{П} + \frac{V_{эж}}{2}\right)^3}{2 \cdot \sigma \cdot K_{\phi}} \cdot \frac{C_H - C}{C_{KB}} \cdot \frac{h_a}{V_{П} + 0,0258 \cdot 1,087 I_a}} \quad (5.5)$$

где $\delta_{П}$ – дисперсионный размер пузырька, м;

D_T – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с;

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления всплытию пузырька;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$V_{П}$ – скорость всплывания пузырька воздуха, м/с;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м²;

K_{ϕ} – коэффициент формы пузырька воздуха;

C_H – концентрация насыщения жидкости кислородом, кг/м³;

C – концентрация растворенного в жидкости кислорода, кг/м³;

I_a – интенсивность аэрации в затопленном эрлифте, м³/(м²·ч), принимается 10...20 м³/(м²·ч);

h_a – глубина погружения аэратора, м;

По расходу воздуха и принятой интенсивности аэрации рассчитывается поперечная площадь затопленного эрлифта:

$$\omega_a = \frac{Q_{air}}{q_{air}}, \text{ м}^2. \quad (5.6)$$

Задается значение рабочей высоты H , м.

$H=1,5 \dots 4,5$ м.

Принимается ширина осветлителя $B_c = (0,25 \dots 0,4) \cdot H$

Определяется глубина дна аэротенка-осветлителя относительно нижней кромки наклонного козырька определяется:

$$h_w = H - B_c, \text{ м}. \quad (5.7)$$

Ширина зеркала защитной зоны принимается равной:

$$B_s = 0,2 \cdot B_c, \text{ м}. \quad (5.8)$$

Ширину зазора B_j между затопленной перегородкой и нижней кромкой наклонного козырька следует принимать равной $0,3 \dots 0,35$ от ширины B_c .

Глубина погружения вертикальной разделительной перегородки под уровень свободной поверхности $z_s = 0,05 \cdot B_c$ при значении угла между наклонным козырьком и вертикальной плоскостью $\beta = 40^\circ$.

Ширина наклонной части, которая должна занимать участок дна, не находящийся в поле соударения с турбулентной затопленной струей, рассчитывается по формуле:

$$B_d = B_c - 0,175 \cdot h_w, \text{ м.} \quad (5.9)$$

Высота наклонной части дна

$$H_d = B_d \cdot \operatorname{tg} \alpha_d, \text{ м,} \quad (5.10)$$

где α_d – угол наклонной поверхности, устраиваемой в месте сопряжения боковых стен и дна аэротенка-осветлителя, по отношению к горизонтальной плоскости. Угол α_d принимается равным 55° .

Ширина затопленного эрлифта B_a рассчитывается по формуле:

$$B_a = \frac{\omega_a}{W - H \cdot \omega_a} \cdot \left(B_j H + (B_c - B_s) \cdot \frac{(H - h_w + z_s)}{2} + h_w \cdot B_c - \frac{B_d \cdot H_d}{2} \right), \text{ м.} \quad (5.11)$$

Общая ширина секции аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации определяется по формуле:

$$B = B_a + B_j + B_c, \text{ м.} \quad (5.12)$$

Чертеж определенных геометрических параметров сооружения приведен на рисунке 5.3.

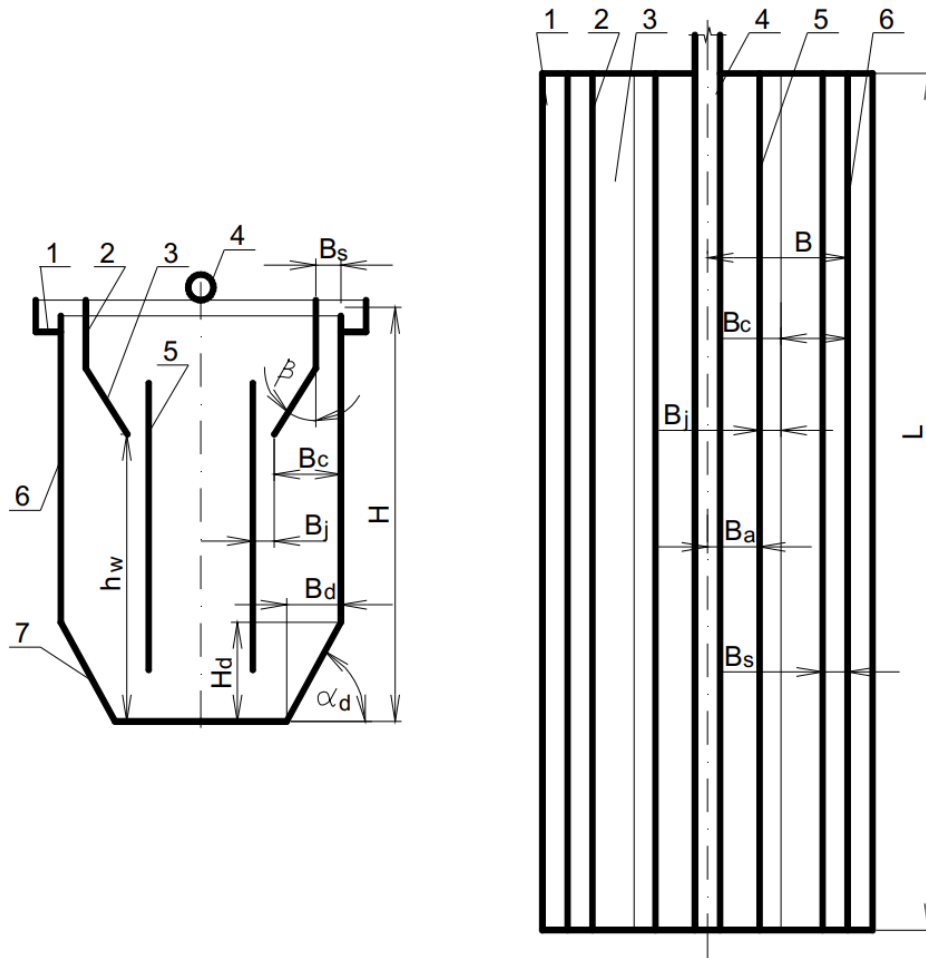


Рисунок 5.3 - Чертежная схема эрлифтного биореактора.

1 – сборный лоток очищенной жидкости; 2 – вертикальная разделительная перегородка; 3 – наклонный козырёк; 4 – подводящий лоток сточных вод; 5 – затопленная перегородка; 6 – наружная стенка корпуса аэротенка-осветлителя; 7 – наклонная часть дна аэротенка-осветлителя.

Определяется величина циркуляционного расхода q_{cir} , м³/с:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_a &= \frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{Q_{air}}{v_{ж} + V_{II}} \\ h_a - \frac{(h_a - z_1)}{\omega_a} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{\gamma_r \cdot Q_{air}}{\gamma_{ж} \cdot (v_{ж} + V_{II})} \right) - \left[W_{II} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{\gamma_r \cdot Q_{air}}{\gamma_{ж} \cdot (v_{ж} + V_{II})} \right) + \frac{W_K - W_{II}}{W_K} \right] h_a + \\ &+ \frac{\alpha}{2g} \cdot \left(\frac{q_{cir} + Q_{air}}{\omega_a} \right)^2 = \frac{\alpha}{2g} \cdot \left(\frac{q_{cir}}{\omega_a} \right)^2 + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{q_{cir}^2}{2g} \end{aligned} \right. \quad (5.13)$$

где q_{cir} – расход иловой смеси, циркулирующей через затопленный эрлифт, м³/с;

h_a – глубина погружения аэратора, м;

W_{II} – объём газожидкостной смеси в затопленном эрлифте, м³;

W_K – объём газожидкостной смеси над затопленным эрлифтом, м³

ω_a – площадь поперечного сечения затопленного эрлифта, м²;

Q_{air} – расход воздуха, поступающий в затопленную эрлифтную систему аэрации, m^3/c ;

z_1 – глубина погружения верха эрлифтной трубы под уровень свободной поверхности жидкости в биологическом реакторе, м;

$\gamma_{ж}$ – удельный вес иловой смеси в аэротенке, H/m^3 ;

$v_{ж}$ – средняя скорость течения жидкой фазы газожидкостной смеси в эрлифтной трубе, м/с;

ζ_i – соответствующий коэффициент местного сопротивления на пути циркулирующего потока от выхода из сечения, в котором расположены аэраторы, до входа в это сечение.

ω_i – занимаемая жидкой фазой часть поперечной площади потока, m^2 , в сечении с местным сопротивлением, коэффициент которого составляет ζ_i .

Неизвестными величинами в системе уравнений (5.13) являются расход иловой смеси $Q_a = q_{cir}$ и скорость течения жидкой фазы в эрлифте $v_{ж}$.

Объемы зоны насыщения кислородом ($W_{нас}$) и потребления кислорода $W_{потр}$ приведены на рисунке 5.4.

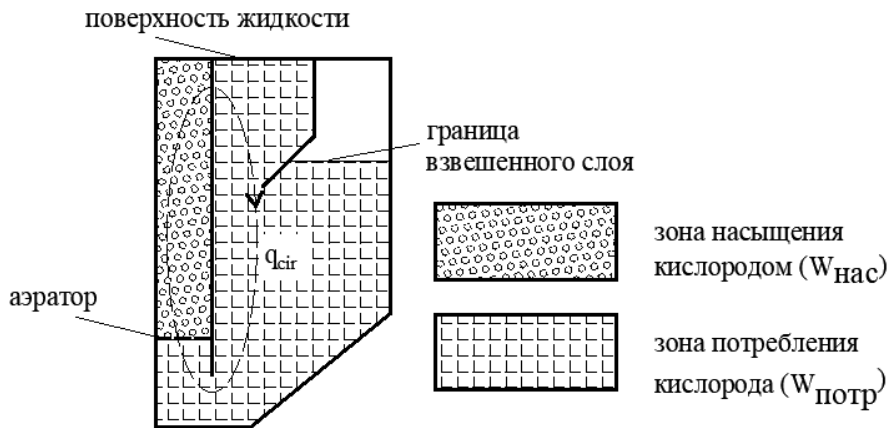


Рисунок 5.4 - Расчетные зоны в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Определяется интенсивность циркуляции $I_{ц}$ ($m^3/m^2 \cdot ч$), по формуле:

$$I_{ц} = \frac{q_{cir}}{\omega_j}, \quad (5.14)$$

где ω_j – площадь зазора между эрлифтной колонной и наклонным козырьком, м (Рисунок 5.3).

Выполняется определение границ допустимой интенсивности циркуляции. Минимальная интенсивность циркуляции определяется по формуле:

$$I_{ц,мин} = 15900 \cdot v_{ос} \cdot H^{0,22} \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot h_w}{B_j} + 0,41}, \quad (5.15)$$

где $v_{ос}$ – скорость осаждения частиц активного ила, принимаемая около 0,0002-0,0005 м/с;

Максимальная интенсивность циркуляции:

$$I_{ц,маx} = \frac{31,5 \cdot \left(\frac{h_w}{B_j}\right)^{0,844}}{(q_c + 0,29)^{0,801}}, \quad (5.16)$$

где q_c – гидравлическая нагрузка на осветлитель, м³/м²·ч.

Величина гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны осветлителя вычисляется по формуле:

$$q_s = 0,377 \cdot \frac{C_{в.в}^{1,19} \cdot a_i^{0,451}}{1,0078^{1,19 - I_{ц}}}, \quad (5.17)$$

где $C_{в.в}$ – концентрация взвешенных веществ на выходе из осветлителя, мг/л.

Если определенная по формуле (5.16) интенсивность циркуляции соответствует условию $I_{ц,мин} < I_{ц} < I_{ц,маx}$, – геометрические параметры утверждаются. Иначе необходимо внести корректировки в дозу ила a_i либо принятую интенсивность аэрации q_{air} в рекомендуемом диапазоне.

На основании полученных геометрических размеров сооружений выполняется биохимическое моделирование очистки.

Для этого решается система уравнений, описывающая изменение концентрации каждого из компонентов системы в каждом сооружении. Они могут быть решены в любом математическом редакторе, либо с использованием программного комплекса CellDesigner – программного комплекса разработки The Systems Biology Institute, Токио, Япония, распространяемого на бесплатной основе.

Для расчета системы в программной среде CellDesigner, к данным рекомендациям прилагается файл с моделью, в котором необходимо задать определенные по формулам (5.1-5.17) исходные данные.

Перечень исходных данных приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Исходные данные для моделирования

Параметр	Обознач.	Ед. изм.	Значение
			А/А-ЭБ
Концентрация растворенного субстрата в исходном стоке	Ss_in	гO ₂ /м ³	ф-ла 5.1. респирометрия калибровка
Концентрация нерастворенного субстрата в исходном стоке	Xs_in	гO ₂ /м ³	ф-ла 5.1. респирометрия калибровка
Концентрация азота аммонийного по N в исходном стоке	SNH ₄ _in	гN/м ³	хим.анализ
Концентрация нерастворенного инертного субстрата в исходном стоке	XI_in	гO ₂ /м ³	ф-ла 5.1. калибровка
Концентрация нерастворенного инертного субстрата в исходном стоке	SI_in	гO ₂ /м ³	ф-ла 5.1. калибровка
Концентрация фосфатов по P в исходном стоке	SPO ₄ _in	гP/м ³	хим.анализ
Концентрация ВВ в исходном стоке	X_TSS_in	г/м ³	хим.анализ
Концентрация гидрокарбонатов в исходном стоке	SALK_in	моль/м ³	хим.анализ
Расход поступающих сточных вод	q1	м ³ /сут	
Внутренний циркуляционный расход аэротенка	qcir	м ³ /сут	ф-ла 5.13.
Возвратный рецикл	qr	м ³ /сут	0,6-1
Расход избыточного ила	qexc	м ³ /сут	0,02...0,03
Расход подаваемого воздуха	Qair	м ³ /час	ф-ла 5.4.
Коэффициент использования кислорода	kisp		ф-ла 5.5
Объем анаэробного реактора	W	м ³	на 0,5...0,75ч
Объем аноксидного реактора	W	м ³	
Объем зоны насыщения кислородом	W1	м ³	рис. 5.4
Объем зоны потребления кислорода	W2	м ³	рис. 5.4
Коэффициент вторичного илоразделения*	gwk		0,002...0,003

* - коэффициент вторичного илоразделения уточняется в процессе моделирования из соотношения:

$$\alpha_{\text{ИР}} = \frac{C_{\text{В.В}}}{1000a_i} = \frac{X_i^{\text{out}}}{X_i^{\text{ins}}}, \quad (5.18)$$

где X_i^{out} - концентрация i -того нерастворенного компонента ASM в осветленном очищенном стоке, мг/л;

X_i^{ins} - концентрация i -того нерастворенного компонента ASM в биореакторе, мг/л.

По результатам моделирования определяется качество очистки по всем компонентам на выходе из системы. В случае соответствия заявленным требованиям к очищенным сточным водам, расчет можно считать законченным.

В случае не удовлетворительного качества очистки, полученного в результате моделирования, варьируется величина расхода подаваемого воздуха в указанных выше пределах по интенсивности аэрации.

Если увеличение расхода воздуха до предельного значения не решает систему, либо на каком-то этапе наблюдается одновременное превышение концентрации загрязнений и по азоту аммонийному и по нитратам, значит варьированием расхода воздуха эту задачу не решить и необходимо менять объемы различных зон.

Варьирование рециклов рекомендуется на завершающем этапе подбора, приведенные значения являются средними, и в основном этот механизм (изменения степеней рециклов) предназначен для оперативного управления системой очистки в условиях изменения качества воды на действующих станциях.

Приведенные рекомендации на проектирование рекомендованы к внедрению Научно-техническим Советом Минстроя ДНР, что утверждено Решением №2 от 12.12.2022г.

5.3. Выводы к пятой главе.

1. Область применения различных технологических схем в рамках концепции БОСЭБ ограничивается по расходу и составу поступающих сточных

вод. Для удаления органических загрязнений и соединений азота применимы схемы «ЭБ» и «А-ЭБ» при соотношении БПК₅:N 100:18 и 100:22 соответственно.

2. Методами имитационного моделирования установлено, что возможности технологии БОСЭБ по биологическому удалению соединений азота и фосфора ограничиваются соотношением в исходном стоке БПК₅:N:P = 100:19:1,8.

Глава 6.

ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЙ

6.1. Укрупненная характеристика технологии БОСЭБ в сравнении с известными схемами.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований работы систем с эрлифтными биореакторами, рассмотрена экономическая эффективность предлагаемых решений.

Основные положения и изложенные доводы позволяют дополнить таблицу 1.7 технологией БОСЭБ на базе схемы А/А-ЭБ, что позволяет предварительно оценить эффективность предложенного процесса (Таблица 6.1.)

Таблица 6.1 - Укрупненная характеристика схем биологической очистки сточных вод.

Технологическая схема	ИПКО	$T_{оч}$, ч	$I_{ок}$, м ³ /м ³	$S_{РЕЦ}$	$Z_{ПЕР}$
Процесс Phoredox	14-20	18...28	26...32	2...6	2,5
Процессы УСТ и МУСТ	8-10	16...25	22...25	1,5...7	2
Йоханнесбургский процесс	9-12	17...26	22...25	1,5...7	3
Процесс DEPHANOX	7-10	30...36	18...34	1,0...5,0	3
Процесс А/А-ЭБ	7-10	16...20	15...25	0,6...3	2

По относительным показателям процесс БОСЭБ превосходит все используемые в настоящее время технологические схемы с учетом ограничений по использованию технологии.

6.2. Оценка экономической эффективности по стоимости жизненного цикла.

Стоимость жизненного цикла объектов водоснабжения и водоотведения по ГОСТ Р 58785— 2019 состоит из следующих слагаемых:

$$\text{СЖЦ} = \sum_{t_1}^n \text{КАПИТ} + \sum_{t_1}^n \text{ЭКСПЛ} + C_d, \quad (6.1)$$

где КАПИТ - сумма капитальных затрат по статьям составляющих элементов СЖЦ, руб;

ЭКСПЛ — сумма эксплуатационных затрат по статьям составляющих элементов СЖЦ, руб;

C_d — стоимость затрат на конец расчетного периода «n» СЖЦ или стоимость затрат на вывод объекта из эксплуатации, включая восстановление окружающей среды за вычетом стоимости материалов повторного использования.

Для экономической оценки преимуществ данной технологии над классической (схема МУСТ со вторичными отстойниками) по укрупненным показателям, выполнен расчет по укрупненным нормативам цены строительства [232] для производительности очистных сооружений 10.000 м³/сут. Очистке подвергаются сточные воды населенных пунктов. Предварительное требование по качеству очистки – для сброса в водоемы категории «Б» (ИПКО = 7).

Качество очистки по целевым технологическим показателям приведено в таблице 6.2.

Таблица 6.2 - Значения ЦТП для технологически варьируемых величин.

Показатель	ЦТП, мг/л
Взвешенные вещества	5
БПК5	3
ХПК	30
Азот аммонийных солей (N-NH ₄)	1
Азот нитратов (N-NO ₃)	8
Азот нитритов (N-NO ₂)	0,1
Фосфор фосфатов (P-PO ₄)	0,5

В соответствии с требованиями по утилизации отходов, предлагается отказаться от первичного отстаивания, что позволит исключить образование сырого осадка. При этом увеличиваются объемы сооружений и расход воздуха на аэрацию. Для минимизации этих показателей принята технология БОСЭБ, расчетно-принципиальная схема которой приведена на рисунке 6.1

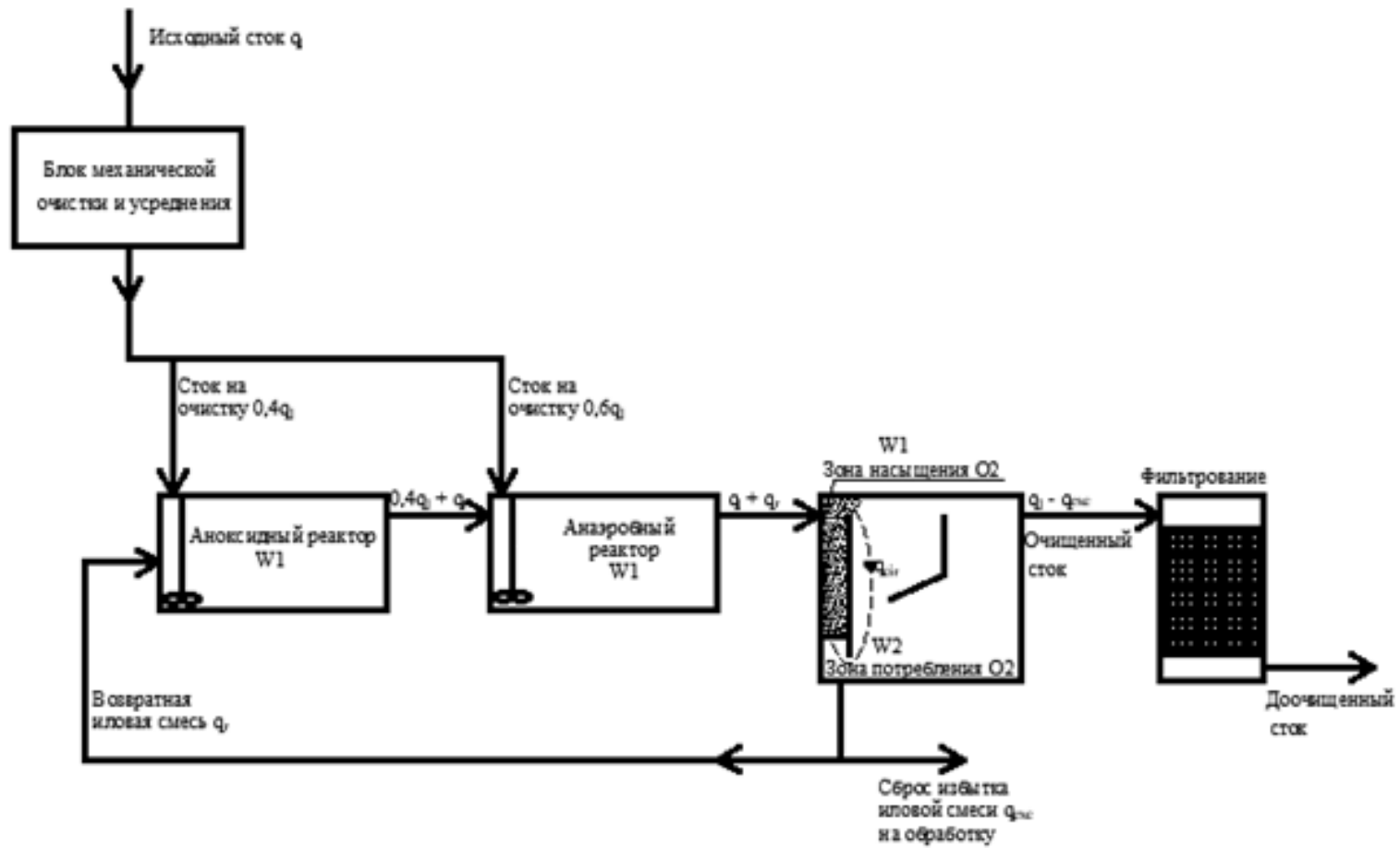


Рисунок 6.1 – Расчетно-принципиальная схема БОСЭБ

Результаты расчетов приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Укрупненный расчет стоимости строительства по классической технологии и технологии БОСЭБ

№	Элемент системы	Позиция по НЦС 81-02-19-2017	Ед.изм.	Стоимость ед. в 2017г, тыс. руб.	Стоимость ед. в 2023г тыс. руб.	Кол-во по классической технологии	Кол-во по технологии БОСЭБ	Стоимость по классической технологии, тыс. руб	Стоимость по технологии БОСЭБ, тыс. руб.	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Подкачивающая насосная станция	19-04-001-01	м ³ /сут	1,77	2,524	10000	10000	25240,200	25240,200	
2	Воздуходувная станция	19-04-003-01	м ³ /сут	1,93	2,752	6000	6000	16513,080	16513,080	
3	Насосные станции технологические от 2000 м ³ /сут до 10000 м ³ /сут	19-04-004-02	м ³ /сут	1,04	1,483	0	10000	0,000	14830,400	Насосные станции рециркуляции по технологии БОСЭБ имеют меньшую производительность за счет эрлифтной аэрации
4	Насосные станции технологические от 10000 м ³ /сут до 30000 м ³ /сут	19-04-004-03	м ³ /сут	0,75	1,070	30000	0	32085,000	0,000	
5	Аварийно-регулирующие резервуары	19-04-005-02	м ³	18,89	26,937	3000	3000	80811,420	80811,420	

Продолжение табл. 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	Здания решеток, производительностью : от 1500 м ³ /сут до 10000 м ³ /сут	19-04- 006-01	м ³ /сут	5,62	8,014	10000	10000	80141,200	80141,200	
7	Песколовки горизонтальные	19-04- 006-05	м ³ /сут	2,56	3,651	10000	10000	36505,600	36505,600	
8	Отстойники горизонтальные первичные	19-04- 006-07	м ³ /сут	4,11	5,861	10000	0	58608,600	0,000	Отказ от первичного отстаивания приводит к увеличению объемов аэротенков, но снижает нагрузку на стабилизацию осадка (п. 13)
9	Аэротенки-смесители	19-04- 009-01	м ³ /сут	12,6	17,968	10000	15000	179676,000	269514,000	
10	Отстойники горизонтальные вторичные	19-04- 006-07	м ³ /сут	4,11	5,861	10000	0	58608,600	0,000	Вторичное отстаивание отсутствует по технологии БОСЭБ из-за встроенного осветления во взвешенном слое.

Окончание табл. 6.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	Станция обезжелезивания подземных вод (применительно к доочистке)	19-03-003-02	м ³ /сут	8,69	12,392	9900	9900	122680,206	122680,206	Установка доочистки сточных вод фильтрованием.
12	Установка УФ-обеззараживания сточных вод	19-04-006-08	м ³ /сут	5,04	7,187	9900	9900	71151,696	71151,696	
13	Аэротенки-смесители (применительно к стабилизации)	19-04-009-01	м ³ /сут	12,6	17,968	18000	5000	323416,800	89838,000	
14	Цех механического обезвоживания осадка	19-04-006-12	т/сут	7925,59	11301,891	10,5	10,5	118669,859	118669,859	
							Итого	1 204 108,261	925 895,661	тыс.руб

Фактическая составляющая эксплуатационных затрат в стоимости жизненного цикла определяется по формуле:

$$C_n = C_p \cdot [(1 + p)/(1 + i)] + [(1 + p)^2/(1 + i)^2] + \dots + [(1 + p)^n/(1 + i)^n] \quad (6.2)$$

где C_p и C_n — текущие и предстоящие через «n» лет затраты;

n — расчетный период, (срок до капитального ремонта, принятый $n=10$ лет);

i — процентная ставка, принимается с учетом депозитных ставок банков высшей категории надежности, приблизительно на настоящее время $i=12\%$.

p — годовой темп инфляции, $p=11,94\%$

Таким образом, коэффициент дисконтирования эксплуатационных затрат за 10 лет составит 10,0376.

Эксплуатационные затраты по 2^м вариантам приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 - Эксплуатационные затраты по вариантам.

Наименование	Ед. изм.	Кол-во по вар.-ту МУСТ	Кол-во по вар.-ту БОСЭБ	Стоимость ед., руб	Стоимость по вар.-ту МУСТ	Стоимость по вар.-ту БОСЭБ
Электроэнергия на перемешивание	кВт/год	60 000	40 000	8,16	489600	326400
Электроэнергия на аэрацию	кВт/год	850 000	850 000	8,16	6,94 млн	6,94 млн
Электроэнергия на перекачивание	кВт/год	135 000	95 000	8,16	1,1 млн	0,76 млн
Зароботн. плата	1 работн.	4	4	50 800x12	2,44 млн	2,44 млн
Затраты на ремонт	% от стоим. оборудования				220 000	160 000
Плата за сброс					0	0
Итого					11,19 млн	10,63 млн

Таким образом, стоимость жизненного цикла для варианта МУСТ и БОСЭБ составят соответственно:

$SЖЦ_{МУСТ} = 1\,204\,108 \text{ тыс.руб} + 11\,190 \text{ тыс. руб} \cdot 10,0376 = 1\,316\,428 \text{ тыс.руб.}$

$SЖЦ_{БОСЭБ} = 925\,895 \text{ тыс.руб} + 10\,630 \text{ тыс. руб} \cdot 10,0376 = 1\,032\,594 \text{ тыс.руб.}$

Таким образом, стоимость жизненного цикла станции очистки сточных вод по технологии БОСЭБ для производительности $10\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$ на 21,5 % ниже, чем для классической технологии удаления азота и фосфора.

6.3. Оценка экономической эффективности на примере очистных сооружений п.г.т. Карло-Марксово.

Фактическая оценка эффективности технологии БОСЭБ выполнена при выполнении хозяйственно-договорной тематики 0820-РП «Строительство объектов канализационных систем пгт. Карло-Марксово» (руководитель работ – д.т.н, проф. Нездойминов В.И., ответственный исполнитель, ГИП – к.т.н., доц. Рожков В.С.) по заказу Республиканской дирекции капитального строительства ДНР в 2021г., на что получено положительное заключение Комитета Экологической политики при Главе ДНР и Госстройэкспертизы ДНР (приложение В).

Технологическая схема решений по биологической очистке приведена на рисунке 6.2. Проектная производительность сооружений, согласно техническому заданию, составила $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Сточная жидкость после предварительной очистки поступает в 2 приёмные камеры, где через водослив распределяется по денитрификаторам-смесителям (2). В денитрификаторах производится перемешивание погружными мешалками Иртыш ПМЗ 188-0,75/4-106 в количестве 2 шт. на 1 денитрификатор.

Технология решена по схеме «А-ЭБ» с пост-осаждением фосфатов. Такое решение принято в связи ожидаемым недостаточным соотношением $BPK_5:N$ в исходных сточных водах.

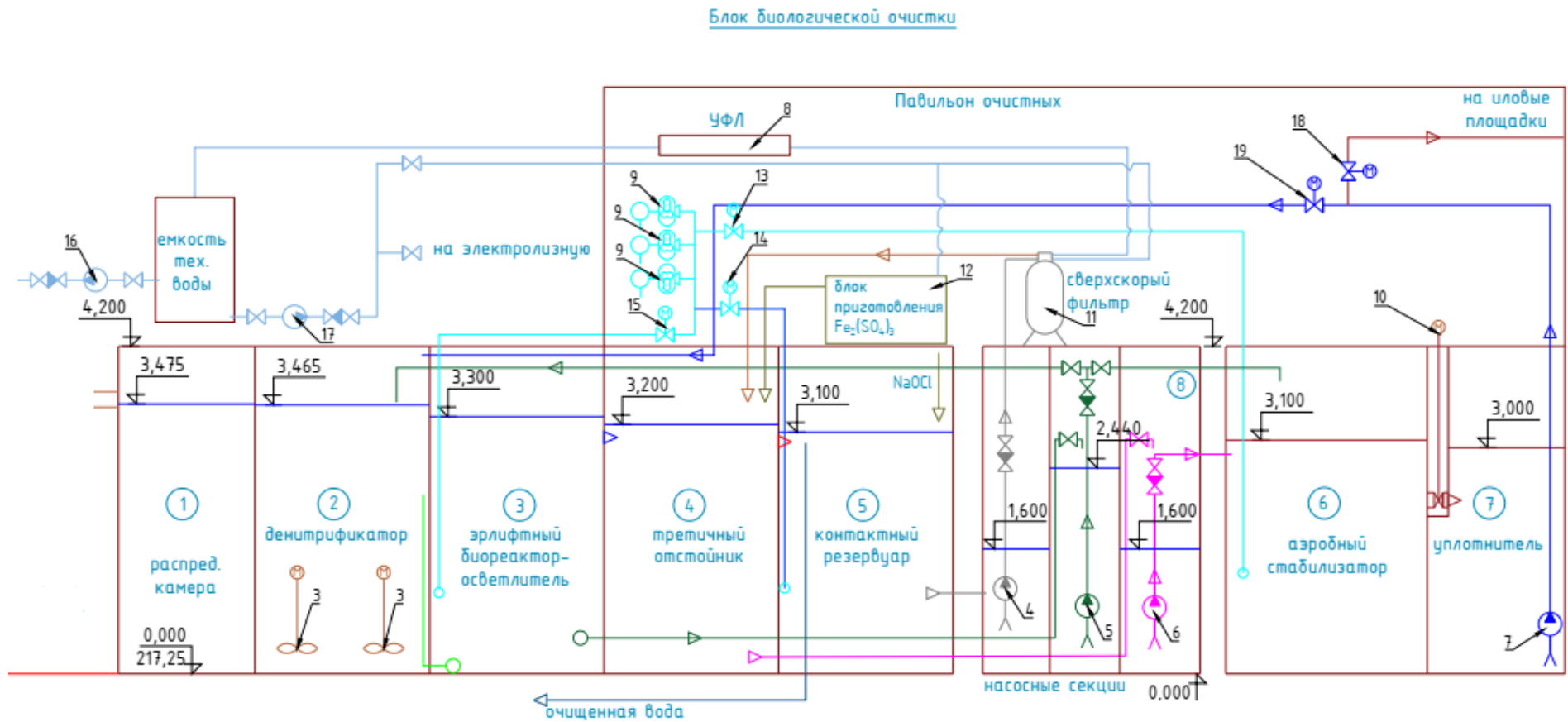


Рисунок 6.2 - Технологическая схема биологической очистки по технологии БОСЭБ п.г.т. Карло-Марксово

Наклонная перегородка в эрлифтном биореакторе предназначена для создания взвешенного слоя активного ила в зоне осветления, что позволяет производить илоотделение в аэротенке без изъятия объема осветлителя из рабочего объема биореактора с достижением качества очистки по взвешенным веществам до 20 мг/л. (рисунок 6.3)

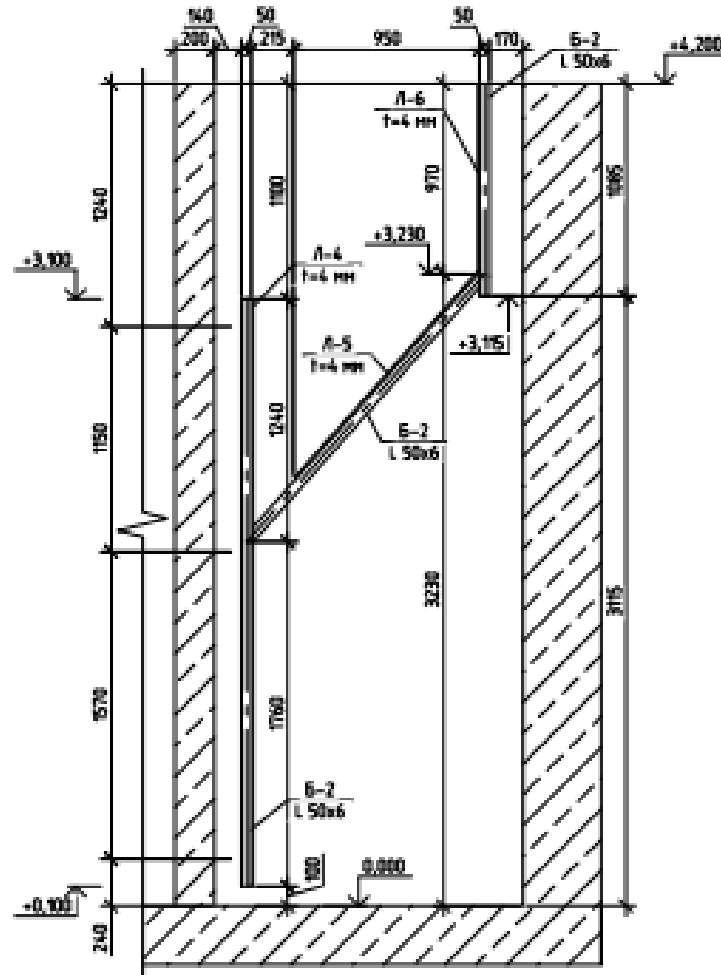


Рисунок 6.3 - Чертеж устройства перегородок для эрлифтного биореактора.

Отвод биологически очищенных и осветленных сточных вод осуществляется по периметру секций лотками из нержавеющей стали толщиной 2 мм, шириной 150 мм и переменной глубины для обеспечения равномерного отбора очищаемой воды.

На рисунке 6.4 показано размещение аэрационной системы в сооружении по стене затопленного эрлифта.

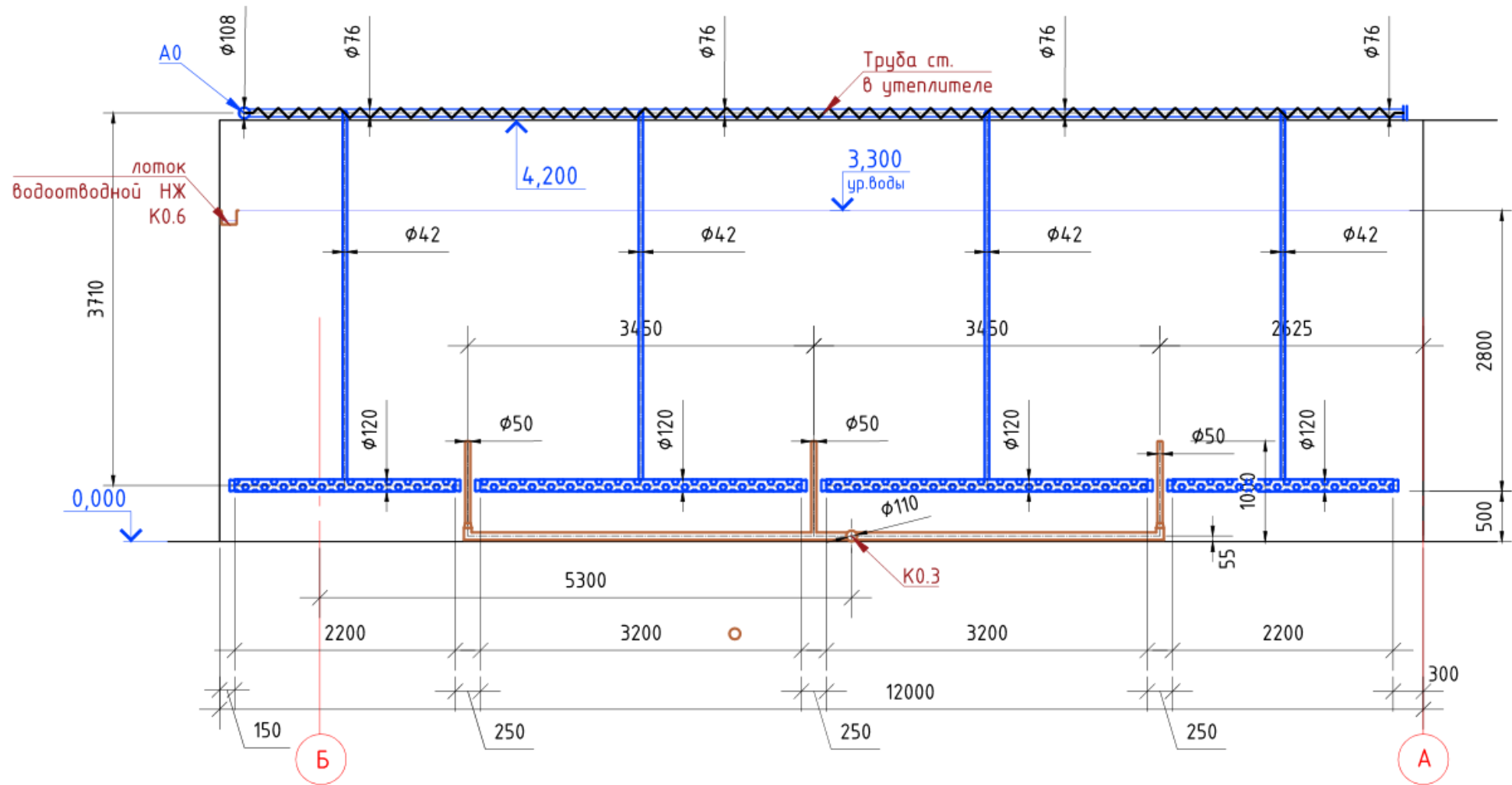


Рисунок 6.4 – Размещение аэрационной системы в сооружении по стене затопленного эрлифта

Из эрлифтного биореактора также осуществляется отбор осадка на рециркуляцию и стабилизацию из нижней зоны под осветлителем (К3.2). Самотеком вода поступает в приемную камеру насосного отделения (8), откуда перекачивается в автоматическом режиме насосами Rexa UNI V05/T08-540 ($Q=22,7$ м³/час, $H=4$ м) в денитрификатор и стабилизатор согласно балансовой схеме. Трубопроводы К3.2 – полимерные SDR11. Отбор из биореактора - по перфорированным трубопроводам с переменным диаметром отверстий для равномерного отбора.

После биологической очистки по лоткам из нержавеющей стали (К0.6) стоки поступают на третичную очистку на вертикальные отстойники (4). В лоток К0.6. осуществляется дозирование коагулянта со смешиванием в лотке. Из лотка переливом очищаемая жидкость поступает в центральную трубу вертикального отстойника из нержавеющей стали $D 250$ мм.

После третичного отстаивания очищенная вода поступает по лоткам из нержавеющей стали (К0.7) в контактный резервуар. В этот же лоток подается для смешения раствор гипохлорита натрия. После контакта в резервуаре очищенная жидкость через выпуск $D 400$ мм самотеком направляется в балку Рассоховатая.

Альтернативным решением для такой производительности могут стать блочные очистные сооружения на подобие Biotal-1000 производства Biotal. (Рисунок 6.5). Такой вариант базового принят в связи с тем, что в нормативах на цены в строительстве малые производительности сооружений биологической очистки не представлены, а также в связи с тем, что в условиях очистных сооружений п.г.т. Карло-Марксово, реконструируемые очистные являлись объектом незавершенного строительства именно установки Biotal-1000.

Стоимость дооснащения объекта технологическим оборудованием Biotal-1000 составила 26 млн.353 тыс. руб. (рис. 6.6) при потребляемой установленной мощности 67,6 кВт. [233]

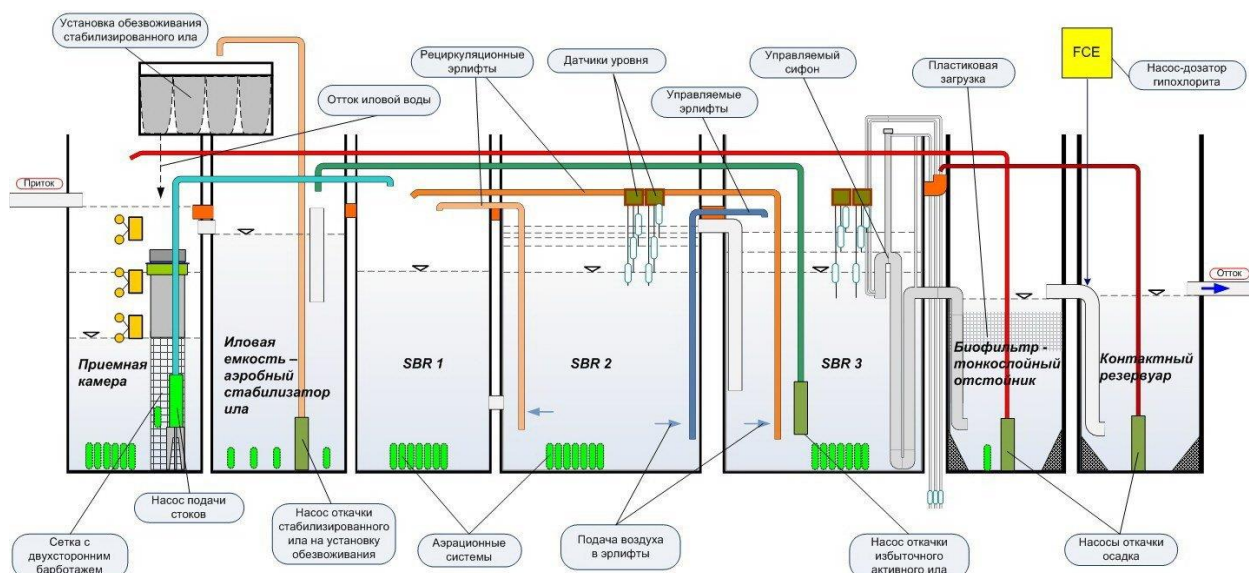


Рисунок 6.5 - Технологическая схема Biotal-1000

Стоимость и условия поставки

- Стоимость оборудования установки BIOTAL-1000-2bt составляет **356 110 евро.**
- Оплата производится в гривнах по межбанковскому курсу на момент подписания договора поставки.
- Стоимость строительных, монтажных и пусконаладочных работ уточняется после разработки проектно-сметной документации.
- Оборудование поставляется в течение 60-и дней с момента полной предоплаты.
- Доставка оборудования оплачивается заказчиком.
- Ориентировочная стоимость монтажных и пусконаладочных работ составляет 20% от стоимости оборудования.



Гарантийные обязательства

- Гарантийный срок на установку BIOTAL – **5 лет.**
- Гарантийный срок на автоматику – **3 года.**
- Гарантийный срок на воздухоловжки – **2 года.**
- Гарантийный срок на насосное оборудование – **2 года.**

Рисунок 6.6 – Элемент коммерческого предложения Biotal-1000

Стоимость реализации реконструкции очистных сооружений пгт.Карло-Марксово определена в рамках договора 0820-РП при тарифной сетке для строительных, монтажных и ремонтных работ при среднемесячной норме продолжительности рабочего времени 163,08 чел.-ч и разряде работ 3,8 равной 25.000 руб. (Приложение Г). Установленная мощность составила 60,14 кВт. Стоимость технологической части для реализации технологии БОСЭБ, согласно сметным расчетам, составила 12 млн. 137 тыс. руб.

Капитальные затраты на строительство станции БОСЭБ составит:

$$K_{\text{БОСЭБ}} = (50603,71 + 30,79 \cdot 35,016 + 7,1 \cdot 35,016 + 0,02 \cdot 50603,71) \cdot 1,015 = 53.736,679 \text{ тыс.руб.}$$

Соответственно, капитальные затраты на реализацию базового варианта составят:

$$K_{\text{БАЗ}} = (50603,71 + 14216 + 30,79 \cdot 35,016 + 7,1 \cdot 35,016 + 0,02 \cdot 50603,71) \cdot 1,015 = 68\ 165,919 \text{ тыс.руб.}$$

Эксплуатационные затраты по 2^м вариантам приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 - Эксплуатационные затраты по вариантам.

Наименование	Ед. изм.	Кол-во по вар.-ту ВЮТАЛ	Кол-во по вар.-ту БОСЭБ	Стоимость ед., руб	Стоимость по вар.-ту ВЮТАЛ	Стоимость по вар.-ту БОСЭБ
Электроэнергия	кВт/год	177 000	158 000	8,16	1,44 млн	1,29 млн
Реагенты	кг/год	10 950	10 950	52	569 400	569 400
Зароботн. плата	1 работн.	0	0		0	0
Затраты на ремонт	% от стоим. оборудования				356 000	263 000
Плата за сброс					0	0
Итого					2,37 млн	2,12 млн

Таким образом, стоимость жизненного цикла для варианта ВЮТАЛ и БОСЭБ составят соответственно:

$$СЖЦ_{\text{ВЮТАЛ}} = 68\ 166 \text{ тыс.руб} + 2\ 370 \text{ тыс. руб} \cdot 10,0376 = 91\ 955 \text{ тыс.руб.}$$

$$СЖЦ_{\text{БОСЭБ}} = 53\ 737 \text{ тыс.руб} + 2\ 120 \text{ тыс. руб} \cdot 10,0376 = 75\ 017 \text{ тыс.руб.}$$

Таким образом, стоимость жизненного цикла станции очистки сточных вод по технологии БОСЭБ для производительности 1 000 м³/сут на 18 % ниже, чем для базовой технологии.

6.4. Выводы к шестой главе.

1. Для экономической оценки преимуществ технологии БОСЭБ над классической схемой очистки, выполнен расчет по стоимости жизненного цикла, который показал экономический эффект от внедрения технологии БОСЭБ в размере 21,5 % от базового варианта.
2. Результаты исследований внедрены при разработке проекта реконструкции очистных сооружений пгт. Карло-Марксово, ДНР, производительностью 1000 м³/сут. Экономический эффект от внедрения технологии БОСЭБ относительно базового варианта (технология «Biotal») составил 18% по стоимости жизненного цикла.

Заключительные выводы

1. В настоящее время актуальна разработка новых технологических решений, снижающих капиталоемкость перехода на наилучшие доступные технологии для станций малой и средней производительности (до 10.000 м³/сут). Существующие схемы биологического удаления органических загрязнений и биогенных элементов (азота и фосфора) из сточных вод не всегда обеспечивают требуемое качество очистки. Причиной отклонений от расчетных значений часто является несовершенство илоразделения с выделением в очищенную воду вторичных загрязнений, а также неучитываемое содержание фосфатов в нерастворенном органическом веществе исходного стока.

2. Распространенные в мировой практике математические модели биологической очистки сточных вод не учитывают отдельно нитрат и нитрит, а также содержание фосфора в биоразлагаемом субстрате (для моделей без культивирования ФАО), что затрудняет их применение при имитационном моделировании.

3. Предложена концепция биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами (БОСЭБ), которая базируется на использовании сооружений с затопленной эрлифтной системой аэрации и илоразделением в самообновляющемся взвешенном слое. Эрлифтные биореакторы являются сооружениями для одновременной нитри-денитрификации, совмещенной с вторичным илоразделением.

4. Разработан метод расчета гидравлических параметров эрлифтных биореакторов, основанный на совместном аналитическом решении уравнений гидродинамики и численном моделировании скоростей в различных точках сооружения.

5. Установлены зависимости для определения скорости всплытия пузырька воздуха в затопленной эрлифтной системе аэрации. Полученные закономерности применимы при определении коэффициента использования кислорода (SOTE) для эрлифтных биореакторов.

6. Разработана полуэмпирическая теория самообновляющегося взвешенного слоя, в которой предложено описание илоразделения в эрлифтных биореакторах на основании численного решения уравнений Навье-Стокса и полученных экспериментальных данных. Установлена зависимость для «мнимой» гидравлической крупности выносимых частиц ила, которая зависит от концентрации ила в биореакторе, интенсивности циркуляции и концентрации взвешенных веществ.

7. Предложена математическая имитационная модель одновременной нитри-денитрификации ASM3P-2SND для городских сточных вод. Указанная модель учитывает преобразования соединений фосфора при жизнедеятельности гетеротрофов и автотрофов, описывает взаимные преобразования окисленных форм азота – нитратов и нитритов, а также учитывает диффузионные ограничения проникновения субстрата и кислорода в хлопок активного ила при одновременной нитри-денитрификации.

8. Разработана методика проверки на сходимость, настройки и калибровки предложенной модели ASM3P-2SND с помощью вычислительных средств программного комплекса CellDesigner.

9. В натуральных и опытно-промышленных условиях выполнена апробация технологии биологической очистки с эрлифтными биореакторами. Установлено минимальное соотношение БПК₅:N для эффективного удаления соединений азота в таких сооружениях без предварительной денитрификации, которое составило 5,5.

10. Установлены значения расчетных коэффициентов понижения концентраций кислорода $K_{D,O}$ и растворенного органического субстрата и $K_{D,SS}$, которые зависят от глубины эрлифтного биореактора.

11. Разработаны рекомендации на проектирование систем полной биологической очистки сточных вод населенных пунктов от органических веществ, соединений азота и фосфора по технологии БОСЭБ, утвержденные решением научно-технического совета Минстроя ДНР решением №2 от 12.12.2022 г.

12. Результаты исследований внедрены при разработке проекта реконструкции очистных сооружений пгт. Карло-Марксово, ДНР, производительностью 1000 м³/сут. Экономический эффект от внедрения системы БОСЭБ относительно базового варианта (технология «Viotal») составил 18 % по стоимости жизненного цикла.

Перечень использованных сокращений и условных обозначений

АТФ – аденозинтрифосфат;

БН – биологическая очистка, включающая нитрификацию;

БНД – биологическая очистка с нитри-денитрификацией;

БНДБФ – биологическая очистка с нитри-денитрификацией и биологическим удалением фосфора;

БНДБХФ – биологическая очистка с нитри-денитрификацией и комбинированным биологическим и химическим удалением фосфора;

БНДХФ – биологическая очистка с нитри-денитрификацией и химическим удалением фосфора;

БО – биологическая очистка;

БОСЭБ – биологическая очистка с эрлифтными биореакторами;

ГАО – гликоген аккумулирующие организмы;

ГПЗ – годовые приведенные затраты;

ГСВ – городские сточные воды;

ДФАО – денитрифицирующие фосфор аккумулирующие организмы;

ИПКО – интегральный показатель качества очистки;

ЛЖК – летучие жирные кислоты;

НДС – нормативы допустимого сброса;

НДТ – наилучшие доступные технологии;

ОЦ – отпускная цена;

ПГА – поли-β-гидроксиалканоаты;

ПДК_{рыб.хоз} – предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ для сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения;

ПСВ – поверхностные сточные воды;

СЖЦ – стоимость жизненного цикла;

СЗВ – сброс загрязняющих веществ;

СМС – синтетические моющие средства;

СОВ – себестоимость очистки воды;

ТНВ – технологически нормируемые величины;

УБУФ – усовершенствованное биологическое удаление фосфора;

ФАО – фосфор аккумулирующие организмы;

ЦСВ – централизованные системы водоотведения;

ОНО – обычные гетеротрофные организмы;

RBCOD – биоразлагаемые растворимые органические вещества;

SBCOD – нерастворенные биоразлагаемые органические вещества.

Список литературы

1. Smith, V. H. Eutrophication science: Where do we go from here? / V. H. Smith, D. W. Schindler // Trends Ecol. Evol – 2009. – №. 24 – С. 201-207.
2. Du, M. Evaluation and analysis of present water environment quality of MinJiang & TuoJiang river basins / Du, M. и др. // Sichuan Environ – 2016. – №. 35, С. 20-25.
3. Васильева, М. В. Влияние сточных вод на водные объекты в Воронежской области / М. В. Васильева, А. А. Натарова // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. – 2016. – Т. 6, № 7-1. – С. 141-145.
4. Морозова, О. Г. Факторы эвтрофикации экосистемы водоемов-охладителей и принципы оптимизации качества воды для технологических целей и аквакультуры // О. Г. Морозова. – Красноярск: Дис. на соискание ст. д-ра биол.наук,, 2003. – 337с.
5. Реймерс, Н. Ф. Природопользование: словарь-справочник / Н Ф. Реймерс // – Москва: Мысль. – 1990. – 637с.
6. Помосова, Н.Б. Проблемы водоснабжения г. Ижевска в условиях эвтрофикации водоисточника / Н. Б. Помосова, А. А. Становских, Н. А. Иванова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – №10. – С. 4-7.
7. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ИТС 10-2019 Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. – Москва: Бюро НДТ. –2019. – 416с.
8. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. – Москва: ОАО "НИИ ВОДГЕО". – 2014. – 88с.
9. Залетова, Н. А. Современные направления очистки высококонцентрированных сточных вод / Н. А. Залетова, В. Ю. Касперович // Системные технологии. – 2021. – № 1(38). – С. 44-49.

10. НПЦ «ПромВодОчистка» Промышленные сточные воды / НПЦ «ПромВодОчистка» // Сантехника. – 2022. – №4. – С.28-31.
11. Игнатьева, Л. П. Санитарная охрана водных объектов: учебное пособие / Игнатьева, Л. П. и Потапова, М. О. Иркутск : ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, Кафедра коммунальной гигиены и гигиены детей и подростков. – 2016. – 97с.
12. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ИТС 8-2015 Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – Москва : Бюро НДТ. – 2015. – 116с.
13. Хенце, М. Очистка сточных вод: Пер. с англ. / М. Хенце и др. – Москва: Мир. – 2006. – 480с.
14. ГК Аргель. Объём сточных вод животноводческих предприятий. [В Интернете] Ярославль: Аргель, 2019 г. [Цитировано: 6 Январь 2022 г.] <https://www.vo-da.ru/articles/ochistnye-ferm/sostav-stokov>
15. Баширов, В. Д. Очистные сооружения для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод Оренбуржья: современные проблемы и пути решения / В.Д. Баширов и др. // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №5-2. – 2014. – С. 32-36.
16. Суюнчев, М.М., Аналитические материалы "Направления совершенствования тарифного регулирования на услуги водоснабжения" / М.М Суюнчев, Д.В. Агафонов, В.В. Кузнецов // [В Интернете] 26 Февраль 2021 г. [Цитировано: 06 01 2022 г.] Институт экономики природных монополий Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации. <https://em.ranepa.ru/novosti/618-2020-13-2-ex-sum-1>.
17. Юрченко, В.А. Нормирование концентрации азотсодержащих соединений при приеме сточных вод в городскую канализацию / В.А. Юрченко, И.В.Коринько // Коммунальное хозяйство городов. – 2010 – №93. – С. 58-62.

18. Залетова, Н.А. Очистка городских сточных вод от биогенных веществ (Соединений азота и фосфора). – Москва: специальность 05.23.04 "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – 1999. – 369с.
19. Гогина Е.С. Удаление биогенных элементов из сточных вод: монография / Гогина Е.С. – Москва: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ. – 2010. – 120 с.
20. Comber, S. Domestic Source of Phosphorus to Sewage Treatment Work / S. Comber // *Environmental Technology*. – 2013. – №34(9-12). – С.1349-58.
21. Амбросова, Г.Т. Источники повышения концентрации фосфора в сточной жидкости, поступающей на очистные сооружения канализации, и способы их устранения / Г.Т. Амбросова и др. // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2016. – № 5(57). – С.24-31.
22. Беспмятков, Г.П. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде: справ. /под общ. ред. Г.П. Беспмяткова, Ю.А. Кротова. – Ленинград: Химия. – 1985. – 528с.
23. Ruzhitskaya, O. Methods for Removing of Phosphates from Wastewater / O. Ruzhitskaya, E. Gogina // *MATEC Web of Conferences, Saint-Petersburg*, 15–17 ноября 2016 года. Vol. 106. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2017. – P. 07006.
24. Европарламент и Совет ЕС. Регламент Европарламента и Совета ЕС от 31.03.2004 "О моющих средствах". [В Интернете] 31 Март 2004 г. [Цитировано: 6 Январь 2022 г.] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32004R0648>.
25. Ланге, К.Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение; под науч. ред. Л.П. Зайченко. / – СПб: Профессия. – 2004. – 240с.
26. de Quevedo, G. Detergents as a Source of Phosphorus in Sewage: the Current Situation in Brazil / G. de Quevedo, C. Maria , P. da Silva., Wanderley // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2016. – s11270-015-2700-3

27. Калита, А. Н. Нормирование качества очищенных вод - выход из тупика / А. Н. Калита, Е. В. Веницианов, В. И. Данилов-Данильян // Методы оценки соответствия. – 2010. – № 2. – С. 5-10.
28. Щелчков, К. А. Наилучшие доступные технологии и нормы общего действия / К. А. Щелчков, Т. В. Гусева // Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование: Материалы XVI Международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики, Красноярск, 05–10 июля 2021 года. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. – С. 198-200.
29. Залетова, Н. А. Технологические решения очистки сточных вод при различных подходах к нормированию сбросов в водные объекты / Н. А. Залетова, Н. В. Морозова // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2019. – № 9(213). – С. 32-33.
30. Zaletova, N. Special features of elimination of phosphorus compounds in aeration tanks / N. Zaletova // E3S Web of Conferences : 4th Vinogradov Conference "Hydrology: from Learning to Worldview" in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov, VC 2020, Saint-Petersburg, 20–27 марта 2020 года. Vol. 163. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2020. – P. 05016.
31. Тез.докл. на на Втором всесоюзном совещании по антропогенному эвтрофированию природных вод. 19-23 декабря 1977г. АН СССР. Черноголовка: Ред.-изд. отдел ОИХФ АН СССР. / Антропогенное эвтрофирование природных вод. – 1977. – 326с.
32. Санитарные правила и нормы охраны охраны поверхностных вод от загрязнения (СанПиН 4630-88). б.м. : Общесоюзные санитарно-гигиенические и санитарно-противоэпидемические правила и нормы. – 1989. – 71с.
33. Комитет Российской Федерации по рыболовству, охране природы. Перечень предельно допустимых концентраций и ориентировочно

безопасных уровней воздействия вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов. Москва: Мединор. – 1995. – 220с.

34. Комитет Госкомэкополитики при Главе Донецкой Народной Республики. Приказ Госкомэкополитики при Главе Донецкой Народной Республики № 359 от 15.06.2021 «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей». [В Интернете] 10 Август 2021 г. [Цитировано: 06 Январь 2022 г.] <https://gkesoroldnr.ru/prikaz-n359-150621/>.
35. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29.12.2020 № 1118 "Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей". [В Интернете] 31 Декабрь 2020 г. [Цитировано: 6 Январь 2022 г.] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012310001>.
36. Федеральный закон от 29.07.2017 № 225-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О водоснабжении и водоотведении» и отдельные законодательные». [В Интернете] [Цитировано: 8 Март 2022 г.] <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201707300045.pdf>.
37. Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ "Об охране окружающей среды". [В Интернете] [Цитировано: 16 Июнь 2022 г.] <http://www.kremlin.ru/acts/bank/17718>.
38. 1379, Постановление Правительства Российской Федерации от 26.10.2019 №. "Об утверждении Правил отнесения водных объектов к категориям водных объектов для целей установления технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения". [В Интернете] 2019 г. [Цитировано: 16 июнь 2022 г.] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201911010007?index=2&rangeSize=1>.

39. Данилович, Д.А. Проектирование очистных сооружений канализации: как избежать негативного опыта / Д.А. Данилович // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения №1, 2018 г. ". [В Интернете] 2019 г. [Цитировано: 16 июнь 2022 г.] <https://pump.ru/information/publications/2018-g-420/public2018-03/>
40. Метод оценки работы вторичных отстойников для принятия оперативного решения по оптимизации эксплуатации / М. В. Кевбрина, А. Г. Дорофеев, А. М. Гаврилин, С. Н. Новиков // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2021. – № 1. – С. 43-53.
41. Вильсон, Е.В. Актуализация технологии очистки сточных вод на базе наилучших доступных технологий / Е.В. Вильсон, Д.А. Бутко // Вестник Евразийской науки. – 2019. – Т.11 – С.1-9.
42. Вода Magazine. Ощущение рентабельности сферы водоснабжения и водоотведения остаётся отрицательной. 11 февраль 2019г. [В Интернете] 2019 г. [Цитировано: 16 июнь 2022 г.] <https://watermagazine.ru/novosti/vodosnabzhenie/22171-oshchaya-rentabelnost-sfery-vodosnabzheniya-i-vodootvedeniya-ostajotsya-otritsatelnoj.html>
43. Данилова, Н. В. Плата за негативное воздействие на окружающую среду: первые оценки новелл законодательства / Н. В. Данилова // НВ: Финансовое право и управление. – 2014. – № 4. – С. 54-80.
44. Шифрин, С.М. Экономика водопроводно-канализационного хозяйства / С.М. Шифрин и др. – Ленинград: Стройиздат. – 1972. – 288с.
45. Иваненко, И.И. Определение себестоимости очистки сточных вод, экологического ущерба и платы за негативное воздействие на окружающую среду при строительстве новых и реконструкции существующих очистных сооружений (с примерами расчетов) : учебно-методическое пособие. И.И. Иваненко и др. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – 2016. – 87с.
46. Серпокрылов, Н. С. Повышение эффективности и надежности очистки сточных вод на разных стадиях эксплуатации очистных сооружений / Н. С.

- Серпокрылов, С. Е. Петренко, В. Ю. Борисова // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2(25). – С. 20.
47. Макиша, Н. А. Определение модельных величин затрат на канализационных очистных сооружениях в случае применения различных технологических схем очистки / Н. А. Макиша // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 8. – С. 1077-1087.
48. Kempa, E. Improvement of wastewater treatment plant projects / E. Kempa // Water Sci Technol. – 1990. – Т.22. – С. 309-310.
49. Priest, T. Bridging water and wastewater containment system gaps / T.Priest // Opflow. – 2012. – Т.38, С.26.
50. Владимирова, В. С. Совершенствование биологических очистных сооружений города Красновишерска / В. С. Владимирова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 1. – С. 185-197.
51. Оковитая, К. О. Расчет элементов наилучших доступных технологий при реконструкции Левобережных очистных сооружений г. Ростов-на-Дону / К. О. Оковитая, О. А. Суржко // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4(47). – С. 230.
52. СП 32.13330.2018 Канализация. Наружные сети и сооружения. – Москва : Стандартинформ. – 2019. – 72с.
53. Игнатчик, В. С. Экспериментальное исследование неравномерности притока сточных вод / В. С. Игнатчик, Н. А. Седых, А. П. Гринев // Военный инженер. – 2017. – № 4(6). – С. 22-28.
54. Дубовик, О. С. Особенности отбора проб для контроля работы очистных сооружений / О. С. Дубовик // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2022. – № 1(253). – С. 101-108.
55. Кисель, Я. С. Автоматизация станции по очистке сточных вод, сконструированной с применением биореакторов / Я. С. Кисель // Вестник МГСУ. – 2011. – № 6. – С. 586-589.

56. Денисов, С. Е. Автоматизация и управление процессом биологической очистки сточных вод / С. Е. Денисов, С. П. Максимов, Т. А. Микляева // *Естественные и математические науки в современном мире*. – 2015. – № 30. – С. 121-127.
57. Olsson, G. Automation in wastewater treatment plants / G. Olsson // *Proceedings of the Water Environment Federation*. – 2003. – С. 238-254.
58. Process automation in Wastewater Treatment Plants: the Finnish experience. Haimi, Henri, Mulas, Michela и Vahala, Riku. 2010 г., E-WATER, стр. 1-16.
59. Olsson, G, и др. *Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems*. London : IWA Publishing, 2005. – 74с.
60. Соловьева, Е. А. Технология очистки сточных вод и обработки осадков при глубоком удалении азота и фосфора из сточных вод / Е. А. Соловьева // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. – 2016. – Т. 13, № 1(46). – С. 93-99.
61. Заводовская, Е.В. Разработка технологии подготовки обезвоженных осадков сточных вод очистных сооружений канализации к расширенной утилизации. Волгоград: Дис. на соискание уч. ст. канд.тех.наук, ВГАСУ. – 2009. – 151с.
62. Стукалина, Ю.Н. Обеспечение экологической безопасности на объектах коммунального хозяйства / Ю. Н. Стукалина, Л. В. Боронина, Е. В. Давыдова [и др.] // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2020. – № 3(33). – С. 31-34.
63. United States Environmental Protection Agency. *Nutrient Control Design Manual. State of Technology Review Report*. Cincinnati, Ohio : Office of Research and Development / National Risk Management Research Laboratory. – 2009. – 102с.
64. Zhang, Q. H. Current status of urban wastewater treatment plants in China. / Q. H. Zhang и др. // *Environment International*. – 2016. – 92-93. С.11-22.
65. Büttner, O. Why wastewater treatment fails to protect stream ecosystems in Europe / O. Büttner и др. – *Water Research*. – 2022. – №217. – С.118382.

66. Tchobanoglous, G. и др. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery / G.Tchobanoglous и др. – 5th ed. New York: Metcalf & Eddy Inc. – 2013. – 2088с.
67. Nikpour, B. Studying the Effluent Quality of Enhanced Modified Ludzack Ettinger-oxic Settling Anaerobic Process (E-MLE-OSA) for Treating Real Municipal Wastewater / B.Nikpour и др. // Journal of Advances in Environmental Health Research. – 2021. – 9(4). – с. 345-360.
68. Carlson, A. L. Comparison of hybrid membrane aerated biofilm reactor (MABR)/suspended growth and conventional biological nutrient removal processes. A. L. Carlson и др. // Water Sci Technol. – 2021. – 83(6). – С. 1418–1428.
69. UCT. Theory, Design and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Processes. Johannesburg: University Of Cape Town. – 1984. – 216с.
70. Проектирование сооружений для очистки сточных вод. (Справ, пособие к СНиП). Москва: Стройиздат. – 1990. – 192с.
71. U.S. EPA. Phosphorus removal. Design manual. Cincinnati : EPA. – 1987. – 156с.
72. Ruzhitskaya, O. Methods for Removing of Phosphates from Wastewater / O. Ruzhitskaya, E. Gogina // МАТЕС Web of Conferences, Saint-Petersburg, 15–17 ноября 2016 года. Vol. 106. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2017. – P. 07006.
73. Мишуков, Б.Г. Биологическое удаление азота и фосфора из городских сточных вод / Б.Г. Мишуков // Вода и экология. – 2004. – Т.3. – С. 31-33.
74. Мишуков, Б.Г. Производственная проверка технологии биологического удаления азота и фосфора на Северной станции аэрации Санкт-Петербурга / Б. Г. Мишуков, И. И. Иваненко, Е. А. Соловьева // Вода и экология: проблемы и решения. – 2000. – № 2(3). – С. 43-45.
75. Кулаков, А.А. Управление работой малых канализационных очистных сооружений в условиях нестабильной нагрузки / А.А., Кулаков // НДТ. – 2020. – 4. – С. 46-56.

76. Liang, J. Modeling a Three-Stage Biological Trickling Filter Based on the A2O Process for Sewage Treatment / J.Liang и др. // *Water*. – 2021. – 13. – С. 1152.
77. Pirveisian, A. Optimizing an A2O bioreactor design, comparing WWT design calculation methods for BNR removal / A .Pirveisian, M. Nosrati. // Fouman, Iran : The 11 International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2020). – 2020. – С. 7.
78. Valverde-Pérez, B. Control structure design for resource recovery using the enhanced biological phosphorus removal and recovery (EBP2R) activated sludge process / B. Valverde-Pérez и др. // *Chemical Engineering Journal*. – 2016. – 296. – С. 447-457.
79. Barnard, J.L. A review of biological phosphorus removal in the activated sludge process / J.L. Barnard // *Water SA*. – 1976. – 2. – С. 136-144.
80. Kroiss, H. Phosphorus in Water Quality and Waste Management. Integrated Waste Management: Volume II. / Kroiss, Helmut, Rechberger, Helmut и Egle, Lukas. – London: IntechOpen. – 2011. – С. 181-214.
81. J.Jaafaria, J. Performance of modified one-stage Phoredox reactor with hydraulic up-flow / J.Jaafaria, A. Bakhsh Javid, H. Barzanouni et al. // *Desalination and Water Treatment*. – 2019. – 171. – С. 216–222.
82. Gerber, A. The Influence of Extended Anaerobic Retention Time on the Performance of Phoredox Nutrient Removal Plants / A. Gerber, C. Winter // *Water Sci Technol*. – 1985. – Т.17. – С. 81-92.
83. Соловьева, Е. А. Совершенствование технологии удаления азота и фосфора в комплексе по очистке сточных вод и обработке осадка : специальность 05.23.04 "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Соловьева Елена Александровна. – Санкт-Петербург, 2010. – 263 с.
84. Повышение качества очищенных сточных вод на Курьяновских и Люберецких очистных сооружениях / С. В. Храменков, Д. А. Данилович, М.

- Н. Козлов [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 11-1. – С. 24-30.
85. Баженов, В.И. Погружное оборудование для процессов рециркуляции и перемешивания при биологической очистке сточных вод / В.И. Баженов // Водоснабжение и канализация. – 2009. – Т.2. – С. 31-35.
86. Опыт промышленного внедрения технологий биологического удаления азота и фосфора. Загорский, В А, и др. 2002 г., Водоснабжение и санитарная техника, Т. 12, стр. 21-27.
87. Vaiopoulou, E. A modified UCT method for biological nutrient removal: Configuration and performance / E. Vaiopoulou, A. Aivasidis // Chemosphere. – 2008. – 72. – С. 1062–1068.
88. Burke, R. Biological excess phosphorus removal in short sludge age activated sludge / R. Burke, P.L. Dolb, G. Marais. – Research Report No. W58. Cape Town : University of Cape Town. S.A. – 1986. – 560с.
89. Мишуков, Б. Г. Глубокая очистка городских сточных вод : Учебное пособие / Б. Г. Мишуков, Е. А. Соловьева ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – 180 с.
90. Bortone, G. Anoxic Phosphate Uptake in the DEPHANOX Process / G.Bortone, S.Marsili-Libelli, J.Wanner // Water Science & Technology. – 1999. – 40. – С. 177–185.
91. М-Дефанокс - эффективная технология биологического удаления фосфора из сточных вод / М. Н. Козлов, М. В. Кевбрина, Ю. А. Николаев [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 10. – С. 43-49.
92. Харькина., О. В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод / О. В. Харькина. – Волгоград : Панорама. – 2015. – 433 с.

93. Levin, G. V. PhoStrip® process — a viable answer to eutrophication of lakes and coastal sea water in Italy / G. V. Levin, U. Delia Sala // *Biological Phosphate Removal From Wastewaters*. – 1987. – С. 249-259.
94. Randall, C. W. Upgrading a municipal activated sludge plant for high-rate biological nutrient removal. / Randall C. W., Waltrip D., Wable M. V. // *Wat. Sci. Tech.* – 1990. – Т. 7-8. – С. 21-33.
95. Seyfried, C. F. Upgrading of wastewater treatment plants for the reduction of nitrogen and phosphorus in Schleswigholstein FRG / Seyfried C. F., Daumaum E. // *Wat. Sci. Tech.* – 1990. – Т. 7-8. – 69—76.
96. Результаты работы крупномасштабных сооружений биологической очистки от соединений азота и фосфора. Данилович, Д А, и др. 1, 2008 г., Сборник статей и публикаций Московского водоканала. – М., 2008. – Вып. 1. – С. 101-119.
97. He, S. Fine-scale differences between Accumulibacter-like bacteria in enhanced biological phosphorus removal activated sludge / He S., Gu A. Z., McMahon K. D. // *Water Sci Technol.* – 2006. – Т. 54(1). – С. 111-117.
98. Есин, М.А. Интенсификация работы сооружений для очистки городских сточных вод от соединений азота и фосфора. Специальность 05.23.04 "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов" : диссертация на соискание ученой степени к.т.н. – Харьков : ХНУСА, 2014. – 196с.
99. Безопасность водных экосистем и проблемы реализации процесса очистки сточных вод от биогенных веществ / А. В. Козачек, Ю. В. Зеленева, Т. В. Скопинцева [и др.] // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. – 2015. – Т. 20, № 1. – С. 219-222.
100. Константинова, Т. И. Анализ эффективности работы очистных сооружений по фосфору и рекомендации по удалению фосфора / Т. И. Константинова // *Евразийское Научное Объединение*. – 2019. – № 10-2(56).

101. Галанцева, Л. Ф. Исследования эффективности очистки сточных вод г. Чистополя от фосфатов / Л. Ф. Галанцева, С. В. Фридланд // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 2. – С. 311-314.
102. Сапон, Е. Г. Перераспределение фосфора между фазами суспензии избыточного активного ила при аэробной и анаэробной стабилизации / Е.Г. Сапон, В.Н. Марцуль // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2015. – 4(177). – С. 288-294.
103. Заворотный, Д. В. Совершенствование илоотделения в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации. Специальность 05.23.04 "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов" : диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Макеевка, 2019. – 151с.
104. Wilson, T.E. Clarifier Design. / WEF Manual of Practice No. FD-8. Second Edition. McGraw-Hill : Water Environment Federation. – 2005. – С. 704.
105. Кевбрина, М. В. Вторичные отстойники: сравнение методов расчета при проектировании и анализ параметров эффективной эксплуатации сооружений / М. В. Кевбрина, М. Н. Козлов, А. Г. Дорофеев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2019. – № 3. – С. 13-22.
106. Данилович, Д. А. Справочник наилучших эффективных технологий. (Базовые материалы). Раздел: Водоотведение. Подраздел: Очистные сооружения канализации (ОСК). ЖКХ Развитие. [В Интернете] 2015 г. [Цитировано: 22 сентябрь 2022 г.] <https://gkhrazvitie.ru/media/127820/ochistka-stochnyh-vod.pdf>.
107. Способ расчета оптимальных размеров и режима работы вторичного отстойника в технологии биологической очистки сточных вод / А. А. Денисов, А. В. Розаева, Л. А. Шаманова [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 101-104.
108. Юрченко, В.А. Влияние редокс-потенциала на фосфатацию иловой жидкости в технологиях биологического удаления фосфора / В.А. Юрченко и др. // Вода и экология: проблемы и решения. – 2019. – 3(79). – С. 26-37.

109. Трухина, М. Г. Мембранные биореакторы: опыт применения в зарубежных странах / М.Г. Трухина, Н.Д. Пельменёва // Инвестиции. Строительство. Недвижимость Известия вузов – 2022.– Т. 12 – С. 224-231.
110. Hai, F. I. Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse / Hai, F. I., Yamamoto K., Lee C. – London : IWA Publishing. – 2019. – 326с.
111. Перспективная технология очистки коммунальных сточных вод гранулированными илами / М. В. Кевбрина, А. В. Акментина, А. Г. Дорофеев [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2019. – № 10. – С. 34-44. – DOI 10.35776/MNP.2019.10.06.
112. Есин, М. А. Отечественный опыт реализации мембранных биореакторов по технологии «МУ MBR» для очистки производственных сточных вод / М.А. Есин, А.В. Ромашко // НДТ. – 2017. – 6. – С. 24-35.
113. Н.И. Куликов, Р.А. Гимадеев, С.А. Тихненко, В.Е. Окрушко, В.Н. Чернышев, И.И. Смеюха, В.В. Вертий. Аэротенк-отстойник. 2762001/23-26 СССР, 15 май 1981 г.
114. В.А. Бессуднов, В.П. Стыров, Б.Ф. Васильев, В.И. Кузнецова. Аэротенк-осветлитель. 762001/23-26 СССР, 30 октябрь 1980 г.
115. Степанюк, І.В. Аерація та циркуляція активного мулу в аэротенку-відстійнику / Степанюк І.В., Таварткіладзе І.М. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2011. – 16. – С. 71-79.
116. Яковлев, С.В и др. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения / С.В. Яковлев и др. М. : Стройиздат. – 1985. – 208с.
117. Чернышев, В.Н. Технология работы илоотделителя в технологии глубокой минерализации осадка / В.Н. Чернышев, В.И. Зятина // Вісник ДонНАБА. – 201. – 3-5(103). – С.21-25.
118. Research of processes of a deep aerobic mineralization of activated sludge / V. Nezdoiminov, V. Ziatina, V. Rozhkov, D. Nemova // International Scientific

Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities (SPbUCEMF-2015), 2015. – P. 1022-1027.

119. Чернышев, В. Н. Исследование илоотделения во взвешенном слое осадка в условиях повышенных концентраций активного ила / В.Н. Чернышев, В.И. Зятина // . Науковий вісник будівництва. – 2014. – 75. – С. 95-100.
120. Нездойминов, В. И. и др. Способ илоотделения для минерализованного активного ила. u 2014 05525 Украина, 25 сентябрь 2015 г.
121. 19. Патент 132076 Украина, B01D 21/02 (2006.01), C02F 3/02 (2006.01), C02F 103/00 Аэротенк-осветлитель / В.И. Нездойминов, Д.В. Заворотный, В.И. Зятина, В.С. Рожков - № 201809073; заявл. 31.08.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. №3. – 4 с.
122. Васильев, Б. В. Реагентное удаление фосфора из городских сточных вод / Б. В. Васильев, Б. Г. Мишуков, Е. А. Соловьева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 2. – С. 58-60.
123. Мишуков, Б.Г. Очистка городских сточных вод : курс лекций / Б. Г. Мишуков, С. Ю. Игнатчик, В. С. Игнатчик ; М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский гос. архитектурно-строит. ун-т. - Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2014. – 194с.
124. Morse, G. K. Review: Phosphorus removal and recovery technologies / Morse G. K., и др. // Science of The Total Environment. – 1998. – Т. 212. – С. 69-81.
125. Mahoo, F. Methods for phosphorus recovery from waste water: A review. Mahoo F. // Journal of Biodiversity and Environmental Sciences. – 2018. – Т. 13 – С. 315-323.
126. Mehta, C. Technologies to Recover Nutrients from Waste Streams: A Critical Review / Mehta C., и др. // Biocontrol Science and Technolog. – 2015. – 45. – С. 385-427.
127. de Bashan, L.E. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer / de Bashan, L. E., Bashan Y.// Water Research. – 2004. – Т. 38. – С. 4222–4246.

128. Williams, S. Struvite precipitation in the sludge stream at slough wastewater treatment plant and opportunities for phosphorus recovery / Williams, S. // *Environmental Technology*. – 1999. – Т. 20. – С. 743-747.
129. Ружицкая, О. А. Современные химические и физико-химические методы удаления фосфатов из сточных вод / О. А. Ружицкая, М. Стефан // *Системные технологии*. – 2019. – № 3(32). – С. 22-27. – EDN NYLGXT.
130. Derco, J. и др. Influence of Phosphorus Precipitation on Wastewater Treatment Processes. *Operations Research - the Art of Making Good Decisions*. London : IntechOpen – 2016. – 116с.
131. Соловьева, Е. А. Реагентное химико-биологическое удаление фосфора из городских сточных вод / Е. А. Соловьева // *Вестник гражданских инженеров*. – 2009. – № 1(18). – С. 78-79.
132. Залетова, Н. А. Особенности химического удаления фосфора при биологической очистке сточных вод / Н. А. Залетова // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2011. – № 11. – С. 40-46.
133. Standard ATV-DVWK-A 202E. Chemical-Physical Methods for the Removal of Phosphorus from Wastewater. – 2004. – 25с.
134. Mahdy, A. M. Drinking water treatment residuals as an amendment to alkaline soils: Effects on the growth of corn and phosphorus extractability / Mahdy A. M., Elkhatib E. A., Fathi N.O. // *International journal of Environmental Science and Technology*. – 2007. – Т. 4(4). – С. 489-496.
135. Griffiths, P. C. Environmental factors contributing to the “G bacteria” population in full-scale EBPR plants. Griffiths P. C., Stratton H. M., Seviour R. J. // *Water Science and Technology*. – 2002. – Т. 46. – С. 185-192.
136. Ning, P. Phosphate removal from wastewater by model-La(III) zeolite adsorbents / Ning, P. и др. *J Environ Sci (China)*. – 2008. – Т. 20(6). – С. 670-674.
137. Adin, A. Physicochemical Mechanisms in Treatment Processes for Water Reuse. *Wastewater Reclamation and Reuse*. Lancaster : Technomic Publishing Co., 1998, стр. Chapter 5. – 122с.

138. Grady, C. P. L., Jr., Daigger, G. T. и Lim, H. C. Biological Wastewater Treatment. New York : Marcel Dekker, 1999. – 317с.
139. Alon, G Mathematical Modeling of Particle Size Distribution in Secondary Effluent Filtration / Alon G., Adin A. // Water Environ.Res. – 1994. – 66. – С. 836–841.
140. Particle Size Analysis in Primary and Secondary Waste Water Effluents. Neis, U. и Tiehm, A. 36, 1997 г., Water Sci.Technol., – С. 151–158.
141. Adin, A Particle Filtration in Wastewater Irrigation /Adin A., Elimelech M. 115, 1989 г., J. Irrig.Drain., – С. 474–487.
142. van der Graaf, J. Particle Size Analysis As a Tool for Performance Measurements in High Rate Effluent Filtration / van der Graaf J., de Koning J., Tang J. // Water Sci. Technol. – 2001. – 43. – С. 303–310.
143. Physical Conditioning of Activated Sludge Floc. Parker, D. S., Kaufman, W. J. и Jenkins, D. 43, 1971 г., J. Water Pollut. Control Fed., – С. 1817–1833.
144. Control of Phosphorus Discharges: Present Situation and Trends. Balmer, P. и Hultman, B. 170, 1988 г., Hydrobiologia, – С. 305–319.
145. Hunt, K. S. Advanced Wastewater Treatment Testing Showdown in Henderson, Nevada / Hunt K. S., и др. Anaheim : б.н., 2000. Proceedings of the 73rd Annual Water Environment Federation Technical Exposition and Conference.
146. Karsen, O. J. Implementation of Sydney Water's Wastewater Strategy at Its Hawkesbury–Nepean Sewage Treatment Plants. / Karsen O. J. и Brown J. Brisbane: б.н., 2000. Proceedings of the 7th International River Management Symposium— Riversymposium.
147. Crom, J. A. Advanced Wastewater Treatment Revives Troubled Tualatin River / Crom J. A. // Water Wastes Eng. – 1977. – 59. – С. 52-54.
148. Кевбрина, М. В. Внедрение современных технологий при строительстве и реконструкции очистных сооружений АО "Мосводоканал" / М. В. Кевбрина, А. М. Гаврилин, А. А. Пронин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2021. – № 6. – С. 36-45.

149. Мешенгиссер, Ю.М. Модернизация и реконструкция очистных сооружений канализации Научного центра ран (г. Черноголовка, Московская обл.) ч.1 / Ю. М. Мешенгиссер, А. И. Щетинин, Б. Ю. Малбиев [и др.] // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2009. – № 1(13). – С. 30-39.
150. Мешенгиссер, Ю.М. Модернизация и реконструкция очистных сооружений канализации Научного центра ран (г. Черноголовка, Московская обл.) ч.2 / Ю. М. Мешенгиссер, А. И. Щетинин, Б. Ю. Малбиев [и др.] // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2009. – № 1(13). – С. 45-47.
151. Water Environment Federation. Biological and Chemical Systems for Nutrient Remova. Alexandria, Virginia : Water Environment Federation, 1998.
152. Ацидофикация (преферментация) как метод стабилизации сырого осадка при очистке сточных вод от биогенных элементов / М. Н. Козлов, С. А. Стрельцов, М. В. Кевбрина [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 5. – С. 13-20.
153. Barnard, J.L. 10Activated Primary Tanks for Phosphate Remova / Barnard J. L. 10. – 1985. Water SA, – 121с.
154. A review of characterisation requirements for in-line prefermenters. Paper 2: Process characterisation. 27, 2001 г., Water S.A, T. 3, – С. 413-421.
155. Bouzasa, A. Fermentation and elutriation of primary sludge: Effect of SRT on process performance / Bouzasa, A, и др. // WATER RESEARCH – 2007. – 41. – С. 747– 756.
156. Sun, S.-P. Effective biological nitrogen removal treatment processes for domestic wastewaters with low C/N ratios: a review / Sun, S.-P., Nàcher, C.P.i., Merkey, B., Zhou, Q., Xia, S.-Q., Yang, D.-H., Sun, J.-H., Smets, B.F. // Environmental Engineering Science. – 2010. – 27 (2) – С.111-126.
157. Нездойминов, Виктор Иванович. Одноиловая нитрификация-денитрификация в бмологических реакторах с затопленной эрлдифтной

системой аэрации. Макеевка : Диссертац. на соиск. уч.степ. докт. техн. наук по спец. 05.23.04 - водоснабжение, канализация, 2012. – С. 184.

158. He, Q., Elevated salinity deteriorated enhanced biological phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal / He, Q., Wang, H., Chen, L., Gao, S., Zhang, W., Song, J., Yu, J. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – 390. – C121782.
159. Jia, W. Nutrients removal and nitrous oxide emission during simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal process: effect of iron / Jia, W., Wang, Q., Zhang, J., Yang, W., Zhou, X. // *Environmental Science and Pollution Research* – 2016. – 23 (15). – C.15657-15664.
160. Chen, Y. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal (SNDPR) at low atmosphere pressure / Chen, Y., Li, S., Lu, Y., Zhu, G., Cheng, H. // *Biochemical Engineering Journal*. – 2020. – 160. – C.107629
161. Shukla, S. Simultaneous nitrification-denitrification by phosphate accumulating microorganisms / Shukla S, Rajta A, Setia H, Bhatia R. // *World J Microbiol Biotechnol*. – 2020. – Sep 14;36(10):151. – doi: 10.1007/s11274-020-02926-y.
162. Flores-Cotera, L. B. Gas holdup, foaming and oxygen transfer in a jet loop bioreactor with artificial foaming media and yeast culture / Flores-Cotera L. B. García-Salas // *J. Biotechnol*. – 2005. – T. 116. – C. 387-396.
163. Weber, S. *Jet Aerated Loop Reactors as Alternative to Stirred Tank Reactors*. Halle-Wittenberg : der Martin-Luther-Universität, 2019. стр. 45.
164. *Loop reactors- Advancing reactors realm*. Tripathi, Kaustubh . Chennai : б.н., 2016. Chemcon - 2016.
165. Roeleveld, P. J. Experience with guidelines for wastewater characterisation in The Netherlands / Roeleveld P. J., van Loosdrecht M.C.M. // *Water Science and Technology. Journal of the International Association on Water Pollution Research*. – 2002. – 46(6) – C. 77-87.

166. Standard ATV-DVWK-A 131E. Dimension of Single-Stage Activated Sludge Plants. Berlin : German Association for Water, Wasterwater and Waster, –2000. – 57с.
167. Petersen, B. Calibration, identifiability and optimal experimental design of activated sludge models. Gent : Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor (Ph.D) in Applied Biological Sciences, – 2000. – 362с.
168. Рожков, В С Сравнение подходов к моделированию биологической очистки сточных вод в Украине и других странах / В. С. Рожков и Ю.В.Васильева // Киев : IWA, 2013. Сборник статей 5ой Восточно-Европейской конференции «Опыт и молодость в решении водных проблем». – 2013.
169. Drysdale, G D Assessment of denitrification by the ordinary heterotrophic organisms in an NDBEPR activated sludge system / Drysdale G D, Kasan H C, Bux F. // Water Sci Technol. – 2001. –Т. 1. – С. 147-154.
170. Marais, G. The activated sludge process part 1 - Steady state behaviour / Marais G., Ekama G. A. // Water SA. –1976. – Т. 2, – С. 163–200.
171. Henze, M, и др. Organic matter removal. Biological wastewater treatment: principles, modelling and design. London, UK : IWA Publishing, 2008. – С. 458
172. Corominas, L New framework for standardized notation in wastewater treatment modelling / Corominas, L., и др. // Water Science and Technology. – 2010. – Т. 61, – С. 841–857.
173. Risgaard-Petersen, N. Evidence for complete denitrification in a benthic forminifer / Risgaard-Petersen N. и др. // Nature. 2006 г. – Т. 441, – С. 93–96.
174. Piña-Ochoa, E. Survival and life strategy of the foraminiferan Globobulimina turgida through nitrate storage and denitrification / Piña-Ochoa E. и др. Marine Ecology Progress Series. – 2010. – С. 39–49.
175. Robertson, L. A. Confirmation of aerobic denitrification in batch cultures, using gas-chromatography and N-15 mass- spectrometry / Robertson, L A, и др. // FEMS Microbiology Ecology. 1995. – С. Т. 18, – С. 113–119.

176. Ettwig, K. F. Nitrite-driven anaerobic methane oxidation by oxygenic bacteria / Ettwig K F, и др. // *Nature*. 2010. – 64. – С. 543–548.
177. Bock, E. Nitrogen loss caused by denitrifying *Nitrosomonas* cells using ammonium or hydrogen as electron donors and nitrite as electron acceptor / Bock E, и др. // *Archives of Microbiology*. – 1995. – 163. – С. 16–20.
178. Zumft, W. G. Cell biology and molecular basis of denitrification / Zumft W. G. // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 1997. – 61. – С. 533–616.
179. van de Graaf, A. Autotrophic growth of anaerobic ammonium oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor / van de Graaf A. и др. // *Microbiology*. – 1996. – Т.8. – С. 2187–2196.
180. Kartal, B. Molecular mechanism of anaerobic ammonium oxidation / Kartal B. и др. // *Nature*. – 2011. – 479– С. 127–130.
181. Comeau, Y. Phosphate release and uptake in enhanced biological phosphorus removal from wastewater / Comeau Y. и др. // *Journal (Water Pollution Control Federation)*. – 1987. – Т. 59. – С. 707-715.
182. Mino, T. Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process / Mino, T, van Loosdrecht, M С.М и Heijnen, J J. // *Water Research*. – 1998. – Т. 32. – С. 3193-3207.
183. Janssen, P. M. Biological Phosphorus Removal / Janssen P. M., Meinema K., van der Roest H. F. – Utrecht : STOWA, 2002. – 209с.
184. Wentzel, M. C. Metabolic behaviour of *Acinetobacter* spp. in enhanced biological phosphorus removal – a biochemical model / Wentzel M. C. и др. // *Water SA*. – 1986. г. –Т. 12. – С. 209-224.
185. Comeau. Y. Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal / Comeau Y. и др. // *Water Research*. – 1986. – Т. 20. – С. 1511-1512.
186. Smolders, G. J.F. Stoichiometric model of the aerobic metabolism of the biological phosphorus removal process / Smolders G. J.F. и др. // *Biotechnology and Bioengineering*. – 1994. – Т. 44. – С. 837-848.

187. Oehmen, A. Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale / Oehmen A. и др. // *Water Research*. – 2007. – Т. 41. – С. 2271-2300.
188. Nielsen, P. H. A conceptual ecosystem model of microbial communities in enhanced biological phosphorus removal plants / Nielsen P. H. и др. // *Water Research*. – 2010. – 44(17). – С. 5070-5088.
189. Vlekke, G.J. F.M. Biological phosphate removal from wastewater with oxygen or nitrate in sequencing batch reactors / Vlekke G.J. F.M., Comeau Y., Oldham W. K. // *Environmental Technology Letters*. – 1988. – Т.9. – С. 791-796.
190. Kuba, T. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor / Kuba T. и др. // *Water Science and Technology*. 1993. – Т. 27. – С. 241-252.
191. Hu, Z. R. Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems / Hu Z. R., Wentzel M. C., Ekama G. A. // *Water Research*. – 2002. – Т. 36. – С. 4927-4937.
192. Kernn-Jespersen, J. P. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions / Kernn-Jespersen J. P., Henze M. // *Water Research*. – 1993. – Т. 27. – С. 617-624.
193. Guisasola, G. Aerobic phosphorus release linked to acetate uptake in bio-P sludge. process modelling using oxygen uptake rate / Guisasola G. и др. // *Biotechnology and Bioengineering*. – 2004. – Т. 85. – С. 721-733.
194. Ahn, J. Ecology of the microbial community removing phosphate from wastewater under continuously aerobic conditions in a sequencing batch bioreactor. / Ahn Ю. и др. // *Applied and Environmental Microbiology*. – 2007. – Т. 73. – С. 2257-2270.
195. Guisasola, A. Failure of an enriched nitrite-DPAO population to use nitrate as an electron acceptor / Guisasola A. и др. // *Process Biochemistry*. – 2009. – Т. 44. – С. 689-695.

196. Pijuan, M. Net P-removal deterioration in enriched PAO sludge subjected to permanent aerobic conditions / Pijuan, M, и др. // *Journal of Biotechnology*. – 2006. – Т. 123. – С. 117-126.
197. Carvalheira, M. The impact of aeration on the competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms / Carvalheira M. и др. // *Water Research*. – 2014. 296-307. – Т. 66. – С. 296-307.
198. Saunders, A. M. The effect of GAOs on anaerobic carbon requirements in full-scale Australian EBPR plants / Saunders A. M. и др. // *Water Science and Technology*. – 2003. – Т. 47. – С. 37-43.
199. Thomas, M. Optimisation of No os a BNR plant to improve performance and reduce operating costs / Thomas M. и др. // *Water Science and Technology*. – 2003. – Т. 47. – С. 141-148.
200. Андреев, С. Ю. Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод в аэротенке-вытеснителе / С. Ю. Андреев, С. В. Степанов, А. К. Стрелков // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2022. – № 12. – С. 31-36.
201. Моделирование биохимических процессов очистки сточных вод как основа ретехнологизации сооружений / А. И. Щетинин, М. А. Есин, А. А. Реготун, Б. Ю. Малбиев // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2010. – № 11. – С. 60-69.
202. Швецов, В. Н. Расчет сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов / В. Н. Швецов, К. М. Морозова // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2013. – № 11. – С. 42-47.
203. Standard ATV-DVWK-A 131E. Dimension of Single-Stage Activated Sludge Plants. – 2000. – С. 57.
204. U.S. Environmental Protection Agency. Process Design Manuel for Nitrogen Control – (EPA/625/R-93/010). Cincinnati, OH : Office of Research and Development. – 1993. – С. 311.
205. Kayser, R. New German design for single stage activated sludge plants / Kayser R. // *Water Science and Technology*. – 2000. – Т. 9. – С. 139-145.

206. Мишуков, Б.Г. Технология удаления азота и фосфора в процессах очистки сточных вод / Мишуков, Б.Г., и др. – СПб.: Издательство журнала «Вода: технология и экология». – 2008. – 144с.
207. Швецов, В. Н. Расчет сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод в аэротенках с удалением биогенных элементов / В. Н. Швецов, К. М. Морозова, С. В. Степанов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2018. – № 9. – С. 26-39. – EDN XYHQSD.
208. Баженов, В. И. Математическое моделирование очистных сооружений с применением погружной техники / В.И. Баженов. // Сантехника. – 2008. – С. 68-71.
209. Баженов, В. И. Критерий оптимизации аэротенков с продольной рециркуляцией иловой смеси "карусельного типа" / В. И. Баженов // Экология и промышленность России. – 2008. – № 12. – С. 20-23.
210. Henze, M. Activated Sludge Model No.1. IAWPRC Scientific and Technical Report № 1 M. Henze, C. P. L. Jr. Grady, W. Gujer, G.v.R. Marais, T. Matsuo. London, UK: IAWPRC, –1987. – 38с.
211. Henze, Mogens, и др. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2D, ASM3. London : IWA publishing. – 2006. –121с.
212. Henze, M. Activated Sludge Model No.2d. ASM2d. / Henze, M, и др. // Water Science and Technology. 1999. – Т. 39. – С. 165-182.
213. Швецов, В. Н. Сравнение результатов расчета аэротенков по моделям НИИ ВОДГЕО/СамГТУ и ASM2d / В. Н. Швецов, С. В. Степанов, О. В. Харькина // Водоснабжение и санитарная техника. – 2021. – № 5. – С. 18-29.
214. Gujer, W. Activated Sludge Model No. 3. / Gujer, W, и др. // Water Science and Technology. – 1999. – № 39 (1). – С. 183-193.
215. Rieger, L. The Eawag Bio-P Module for Activated Sludge Model No.3 / Rieger, L, и др. // Water Research. – 2001. – Т.18. – С. 3887-3903.
216. Hauduc, H. A systematic approach for model verification: application on seven published activated sludge models / Hauduc H. и др. // Water Science and Technology. – 2010. – Т. 61. – С. 825-839.

217. Shah-riari, H. Simulating Activated Sludge System by Simple-to-Advanced Models / Shah-riari H., Eskicioglu C., Droste R. L. // *Journal of Environmental Engineering*. – 2006. – Т.1. – С. 42-50.
218. Лурье, Ю Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. Москва : Химия. – 1984. – 446с.
219. Справочник по аналитической химии. Москва : Химия. – 1989. – 448с.
220. Унифицированные методы анализа сточных вод. Москва : Химия. – 1971. – 376с.
221. Экспериментальные методы в очистке сточных вод : Перевод с английского языка / К. М. Лопес-Васкес, Д. Брджанович, Э. Р. Рене [и др.] ; Главные редакторы англ. текста М. ван Лосдрехт, П.Х. Нильсен, К. Лопес-Васкес, Д. Брджанович. Перевод с английского Н.В. Кахаевой. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. – 346 с.
222. Funahashi, A.. CellDesigner: a graphical biological network editor and workbench interfacing simulator / Funahashi, A, и др. *Introduction to Systems Biology*. Choi : Humana Press, – 2007, – С. 422–434.
223. Zimmerman, W.B. Microbubble Generation /Zimmerman W.B. , и др. // *Recent Patents on Engineering*. – 2008. – Т. 1. – С. 1-8.
224. Андреев, С. Ю. Кинетика процессов массопередачи в динамических двухфазовых смесях "вода-воздух", образующихся при аэрировании сточных вод / С. Ю. Андреев, В. А. Князев // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии : сборник статей / Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова*. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2019. – С. 325-337.
225. Андреев, С. Ю. Новая методика расчета процессов массопередачи кислорода воздуха в пневматических системах аэрации / С. Ю. Андреев, К. В. Лебединский, В. А. Князев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2020. – № 4(45). – С. 144-155.

226. Нездойминов, В. И. Концепция биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, В. Н. Чернышев // Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2018" : Материалы XI Международной научно-практической конференции, Сочи, Красная Поляна, 11–14 декабря 2018 года. – Сочи, Красная Поляна: ООО "Лик", 2018. – С. 220-224.
227. Нездойминов, В. И. Гидродинамическая модель работы аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации. / В.И. Нездойминов, В.С. Рожков // Коммунальное хозяйство городов. – 2010. – Т. 93, – С. 353-358.
228. Нездойминов, В. И. Биологическая очистка городских сточных вод с эрлифтными биореакторами-осветлителями / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Д. В. Заворотный // Строитель Донбасса. – 2018. – № 4(5). – С. 17-21.
229. Нездойминов, В. И. Математическое описание основных факторов, влияющих на формирование взвешенного слоя осадка в илоотделителе / В. И. Нездойминов, В. И. Зятина, В. С. Рожков, В. И. Лесной // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2016. – Т. 12, № 2. – С. 51-58. – EDN WIOSLB.
230. Нездойминов, В. И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной системы аэрации в аэротенке-осветлителе / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный, В. С. Рожков // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – № 3(125). – С. 80-85.
231. Рожков, В. С. Опытные-промышленные исследования очистки сточных вод в системах с эрлифтными биореакторами / В. С. Рожков // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2022. – Т. 18, № 4. – С. 145-155.
232. Министерство строительства и ЖКХ РФ. Нормативы цены строительства. НЦС 81-02-19-2017. СБОРНИК № 19. Здания и сооружения городской инфраструктуры. Москва : б.н., с 2017. – 160с.

233. Biotal. Двухмодульные установки. [В Интернете] Biotal, 2022 г.
[Цитировано: 02 11 2022 г.]
http://www.biotal.ru/catalog/dvuhmodulnye_ustanovki/.

Стехиометрическая матрица ASM2d [216]

Процесс	S_O2	S_F	S_A	S_NH4	S_NO3	S_PO4	S_I	S_ALK	S_N2	X_I	X_S	X_H	X_PAO	X_PP	X_PHA	X_AUT	X_TSS	X_MeOH	X_MeP
1		1		0,01		0	0	0,001			-1						-0,75		
2		1		0,01		0	0	0,001			-1						-0,75		
3		1		0,01		0	0	0,001			-1						-0,75		
4	-0,60	-1,60		-0,022		-0,004		-0,001				1					0,9		
5	-0,60		-1,60	-0,07		-0,02		0,021				1					0,9		
6		-1,60		-0,022	-0,21	-0,004		0,014	0,21			1					0,9		
7			-1,60	-0,07	-0,21	-0,02		0,036	0,21			1					0,9		
8		-1	1	0,03		0,01		-0,014											
9				0,032		0,01		0,002		0,1	0,9	-1					-0,15		
10			-1			0,4		0,009						-0,4	1		-0,69		
11	-0,20					-1		0,016						1	-0,2		3,11		
12					-0,07	-1		0,021	0,07					1	-0,2		3,11		
13	-0,60			-0,07		-0,02		-0,004					1		-1,60		-0,06		
14				-0,07	-0,21	-0,02		0,011	0,21				1		-1,60		-0,06		
15				0,032		0,01		0,002		0,1	0,9		-1				-0,15		
16						1		-0,016						-1			-3,23		
17			1					-0,016							-1		-0,6		
18	-18,05			-4,24	4,17	-0,02		-0,599								1	0,9		
19				0,032		0,01		0,002		0,1	0,9					-1	-0,15		
20						-1		0,048									1,42	-3,45	4,86
21						1		-0,048									-1,42	3,45	-4,86

Стехиометрическая матрица ASM3+Bio-P [216]

Процесс	S_O2	S_S	S_NH4	S_NO	S_N2	S_PO4	S_ALK	S_I	X_I	X_S	X_H	X_STO	X_PAO	X_PP	X_PHA	X_AUT	X_TSS
1		1	0,005			0,005	0,00012	0		-1							-0,75
2	-0,20	-1	0,03			0,00	0,00214					0,80					0,48
3		-1	0,03	-0,11	0,11	0,00	0,01					0,70					0,42
4	-0,25		-0,07			-0,01	0,00				1	-1,25					0,15
5			-0,07	-0,19	0,19	-0,01	0,01				1	-1,54					-0,02
6	-0,80		0,06			0,01	0,00		0,20		-1						-0,75
7			0,06	-0,28	0,28	0,01	0,02		0,20		-1						-0,75
8	-1											-1					-0,60
9				-0,35	0,35		0,03					-1					-0,60
10	-18,05		-4,24	4,17		-0,01	-0,60									1	0,90
11	-0,80		0,06			0,01	0,00		0,20							-1	-0,75
12			0,06	-0,28	0,28	0,01	0,02		0,20							-1	-0,75
P01		-1	0,03			0,35	-0,0035							-0,35	1		-0,531
P02	-0,2					-1	0,0161							1	-0,2		3,11
P03				-0,07	0,07	-1	0,0211							1	-0,2		3,11
P04	-0,67		-0,07			-0,014	-0,0043						1		-1,67		-0,1
P05			-0,07	-0,35	0,35	-0,014	0,0207						1		-2		-0,3
P06	-0,8		0,064			0,012	0,0040		0,2				-1				-0,75
P07			0,064	-0,28	0,28	0,012	0,0240		0,2				-1				-0,75
P08						1	-0,0161							-1			-3,23
P09						1	-0,0161							-1			-3,23
P10	-1														-1		-0,6
P11				-0,35	0,35		0,0250								-1		-0,6

Кинетические выражения скорости процессов ASM2d

Проц.	Кинетическое уравнение
1	$q_{XCB_SB,hyd} * [S_{O2} / (K_{O2,hyd} + S_{O2})] * [(X_{CB} / X_{OHO}) / (K_{XCB,hyd} + (X_{CB} / X_{OHO}))] * X_{OHO}$
2	$q_{XCB_SB,hyd} * n_{qhyd,Ax} * [K_{O2,hyd} / (K_{O2,hyd} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,hyd} + S_{NOx})] * [(X_{CB} / X_{OHO}) / (K_{XCB,hyd} + (X_{CB} / X_{OHO}))] * X_{OHO}$
3	$q_{XCB_SB,hyd} * n_{qhyd,An} * [K_{O2,hyd} / (K_{O2,hyd} + S_{O2})] * [K_{NOx,hyd} / (K_{NOx,hyd} + S_{NOx})] * [(X_{CB} / X_{OHO}) / (K_{XCB,hyd} + (X_{CB} / X_{OHO}))] * X_{OHO}$
4	$\mu_{OHO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_F / (K_{SF,OHO} + S_F)] * [S_F / (S_F + S_{Ac})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,OHO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,OHO} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * X_{OHO}$
5	$\mu_{OHO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{Ac} / (K_{Ac,OHO} + S_{Ac})] * [S_{Ac} / (S_F + S_{Ac})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,OHO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,OHO} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * X_{OHO}$
6	$\mu_{OHO,Max} * n_{\mu OHO,Ax} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * [S_F / (K_{SF,OHO} + S_F)] * [S_F / (S_F + S_{Ac})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,OHO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,OHO} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * X_{OHO}$
7	$\mu_{OHO,Max} * n_{\mu OHO,Ax} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * [S_{Ac} / (K_{Ac,OHO} + S_{Ac})] * [S_{Ac} / (S_F + S_{Ac})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,OHO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,OHO} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * X_{OHO}$
8	$q_{SF_Ac,Max} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [K_{NOx,OHO} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * [S_F / (K_{SF,fe} + S_F)] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * X_{OHO}$
9	$b_{OHO} * X_{OHO}$
10	$q_{PAO,Ac_PHA} * [S_{Ac} / (K_{Ac,PAO} + S_{Ac})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PP} / X_{PAO}) / (f_{PP_PAO,Max} + (X_{PAO,PP} / X_{PAO}))] * X_{PAO}$
11	$q_{PAO,PO4_PP} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,upt} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{fPHA_PAO} + (X_{PAO,PHA} / X_{PAO}))] * [(K_{Max} - X_{PAO,PP} / X_{PAO}) / (K_{I,fPP_PAO} + K_{Max} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO}))] * X_{PAO}$
12	$q_{PAO,PO4_PP} * n_{\mu PAO} * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * [K_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,upt} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{fPHA_PAO} + (X_{PAO,PHA} / X_{PAO}))] * [(K_{Max} - X_{PAO,PP} / X_{PAO}) / (K_{I,fPP_PAO} + K_{Max} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO}))] * X_{PAO}$
13	$\mu_{PAO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,PAO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,nut} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{fPHA_PAO} + (X_{PAO,PHA} / X_{PAO}))] * X_{PAO}$
14	$\mu_{PAO,Max} * n_{\mu PAO} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,PAO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,nut} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{fPHA_PAO} + (X_{PAO,PHA} / X_{PAO}))] * X_{PAO}$
15	$m_{PAO} * X_{PAO} * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})]$
16	$b_{PP_PO4} * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [X_{PAO,PP} / X_{PAO}] * X_{PAO}$
17	$b_{PHA_Ac} * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [X_{PAO,PHA} / X_{PAO}] * X_{PAO}$
18	$\mu_{ANO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,ANO} + S_{O2})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,ANO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,ANO} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,ANO} + S_{Aik})] * X_{ANO}$
19	$b_{ANO} * X_{ANO}$
20	$q_{P,pre} * S_{PO4} * X_{MeOH}$
21	$q_{P,red} * X_{MeP} * [S_{Aik} / (K_{Aik,pre} + S_{Aik})]$

Кинетические выражения скорости процессов ASM3+Bio-P

Проц.	Кинетическое уравнение
1	$q_{XCB_SB,hyd} * [(X_{CB}/X_{OHO}) / (K_{XCB,hyd} + X_{CB}/X_{OHO})] * X_{OHO}$
2	$q_{SB_Stor} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_B / (K_{SB,OHO} + S_B)] * X_{OHO}$
3	$q_{SB_Stor} * n_{\mu OHO,Ax} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * [S_B / (K_{SB,OHO} + S_B)] * X_{OHO}$
4	$\mu_{OHO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,OHO} + S_{NHx})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,OHO} + S_{PO4})] * [(X_{OHO,Stor} / X_{OHO}) / (K_{Stor_OHO} + X_{OHO,Stor} / X_{OHO})] * X_{OHO}$
5	$\mu_{OHO,Max} * n_{\mu OHO,Ax} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,OHO} + S_{NHx})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,OHO} + S_{Aik})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,OHO} + S_{PO4})] * [(X_{OHO,Stor} / X_{OHO}) / (K_{Stor_OHO} + X_{OHO,Stor} / X_{OHO})] * X_{OHO}$
6	$m_{OHO} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * X_{OHO}$
7	$m_{OHO} * n_{mOHO,Ax} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * X_{OHO}$
8	$m_{Stor} * [S_{O2} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * X_{OHO,Stor}$
9	$m_{Stor} * n_{mOHO,Ax} * [K_{O2,OHO} / (K_{O2,OHO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * X_{OHO,Stor}$
10	$\mu_{ANO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,ANO} + S_{O2})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,ANO} + S_{NHx})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,ANO} + S_{Aik})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,ANO} + S_{PO4})] * X_{ANO}$
11	$b_{ANO} * [S_{O2} / (K_{O2,ANO} + S_{O2})] * X_{ANO}$
12	$b_{ANO} * \eta_{NO,A} * [K_{O2,ANO} / (K_{O2,ANO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,OHO} + S_{NOx})] * X_{ANO}$
P01	$q_{PAO,Ac_PHA} * [S_B / (K_{SB,PAO} + S_B)] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PP} / X_{PAO}) / (f_{PP_PAO,Max} + X_{PAO,PP} / X_{PAO})] * X_{PAO}$
P02	$q_{PAO,PO4_PP} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,upt} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{iPHA_PAO} + X_{PAO,PHA} / X_{PAO})] * [(K_{S,iPP_PAO} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO})) / ((K_{L,iPP_PAO} + K_{S,iPP_PAO} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO})))] * X_{PAO}$
P03	$q_{PAO,PO4_PP} * n_{\mu PAO} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,upt} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{iPHA_PAO} + X_{PAO,PHA} / X_{PAO})] * [(K_{S,iPP_PAO} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO})) / ((K_{L,iPP_PAO} + K_{S,iPP_PAO} - (X_{PAO,PP} / X_{PAO})))] * X_{PAO}$
P04	$\mu_{PAO,Max} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,PAO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,nut} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{iPHA_PAO} + X_{PAO,PHA} / X_{PAO})] * X_{PAO}$
P05	$\mu_{PAO,Max} * n_{\mu PAO} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * [S_{NHx} / (K_{NHx,PAO} + S_{NHx})] * [S_{PO4} / (K_{PO4,PAO,nut} + S_{PO4})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * [(X_{PAO,PHA} / X_{PAO}) / (K_{iPHA_PAO} + X_{PAO,PHA} / X_{PAO})] * X_{PAO}$
P06	$m_{PAO} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * X_{PAO}$
P07	$m_{PAO} * n_{mPAO} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * X_{PAO}$
P08	$b_{PP_PO4} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * X_{PAO,PP}$
P09	$b_{PP_PO4} * n_{bPP_PO4} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * [S_{Aik} / (K_{Aik,PAO} + S_{Aik})] * X_{PAO,PP}$
P10	$b_{PHA_Ac} * [S_{O2} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * X_{PAO,PHA}$
P11	$b_{PHA_Ac} * n_{bPHA_Ac} * [K_{O2,PAO} / (K_{O2,PAO} + S_{O2})] * [S_{NOx} / (K_{NOx,PAO} + S_{NOx})] * X_{PAO,PHA}$

Технологические расчеты установки одноиловой нитри-денитрификаций с предварительной культивацией ФАО

1. Расчет сооружений механической очистки.

1.1. Вертикальная песколовка.

Площадь вертикальной песколовки определяется по формуле:

$$F = \frac{3600 \cdot q}{q_0}$$

где q – производительность песколовки, м³/сек;

q_0 – нагрузка на песколовку, 90-130 м³/м²·час.

$$F = \frac{0,21}{100} = 0,0021 \text{ м}^2$$

Диаметр песколовки составит:

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0021}{3,14}} =$$

0,051 м

Вертикальный размер принят исходя из конструктивных особенностей монтажа установки (не менее 0,025м):

$$H = 0,5 \text{ м}$$

Размеры песколовки представлены на рисунке П3.1

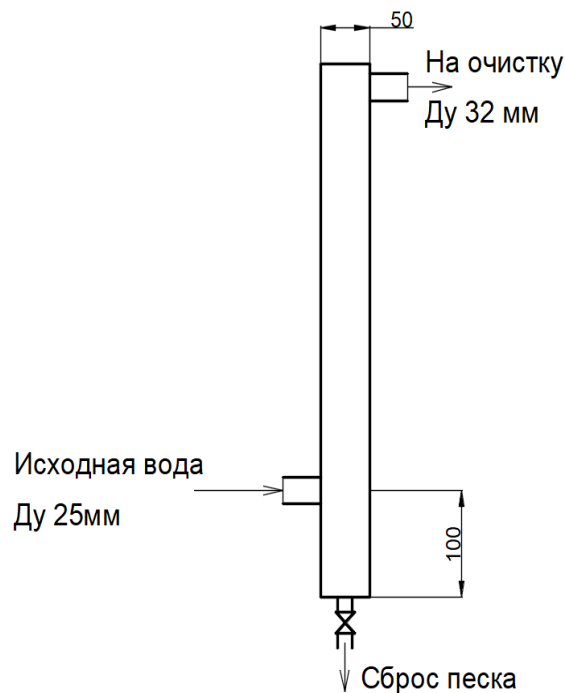


Рисунок П.3.1 Размеры песколовки

1.2. Вертикальный отстойник

Гидравлическая крупность отделяемой фазы определяется по формуле:

$$U_0 = \frac{1000 H_{set} K_{set}}{t_{set} \left(\frac{K_{set} H_{set}}{h_1} \right)^{n_2}}$$

где H_{set} – глубина проточной части в отстойнике, м. Принято 1 м.

K_{set} – коэффициент использования проточной части, 0,35

t_{set} – продолжительность отстаивания, 1200с

h_1 – глубина слоя, 0,5м,

n_2 – показатель степени, равный для городских сточных вод 0,2.

Тогда:

$$U_0 = \frac{1000 \cdot 1,0 \cdot 0,35}{1200 \left(\frac{1,0 \cdot 0,35}{0,5} \right)^{0,2}} = 0,313 \text{ мм/с}$$

Диаметр центральной части трубы определяется по формуле:

$$d_{en} = \sqrt{\frac{4q}{\pi \cdot V_{en}}}$$

где V_{en} - скорость движения рабочего потока в центральной трубе, от 0,03 м/с.

$$d_{en} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,15 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 0,04}} = 0,019 \text{ м}$$

Диаметр отстойника определяется по формуле:

$$D_{set} = \sqrt{\frac{4000q}{\pi K_{set}(U_0 - V_{tb})} + d_{en}^2}$$

Скорость турбулентной составляющей V_{tb} принимается равной 0.

Тогда:

$$D_{set} = \sqrt{\frac{4000 \cdot 1,15 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 0,35 \cdot 0,313} + 0,02^2} = 0,366 \text{ м}$$

Диаметр раструба:

$$d_p = 1,35 d_{en} = 1,35 \cdot 0,02 = 0,027 \text{ м}$$

Диаметр отражательного щита:

$$d_{щ} = 1,3 d_p = 1,3 \cdot 0,027 = 0,035 \text{ м}$$

Высота щели между низом центральной трубы и поверхностью отражательного щита:

$$H_1 = \frac{q}{\pi \cdot d_p \cdot V_{щ}};$$

где $V_{щ}$ – скорость движения в щели, 0,02 м/с.

Тогда:

$$H_1 = \frac{1,15 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 0,027 \cdot 0,02} = 0,007 \text{ м}$$

Высота цилиндрической части

$$H_{ц} = H_{set} + H_1 + H_2;$$

где H_2 – высота нейтрального слоя, 0,3 м.

$$H_{ц} = 1,3 \text{ м.}$$

Высота конусной части рассчитывается по формуле:

$$H_k = 0,5 D_{set} \cdot tg \alpha;$$

где α – угол раскрытия конусной части, 60° .

Тогда:

$$H_k = 0,5 \cdot 0,37 \cdot \sqrt{3} = 0,32$$

Общая высота отстойника составит:

$$H = H_{ц} + H_k = 1,62.$$

Размеры вертикального отстойника приведены на рисунке П 3.2.

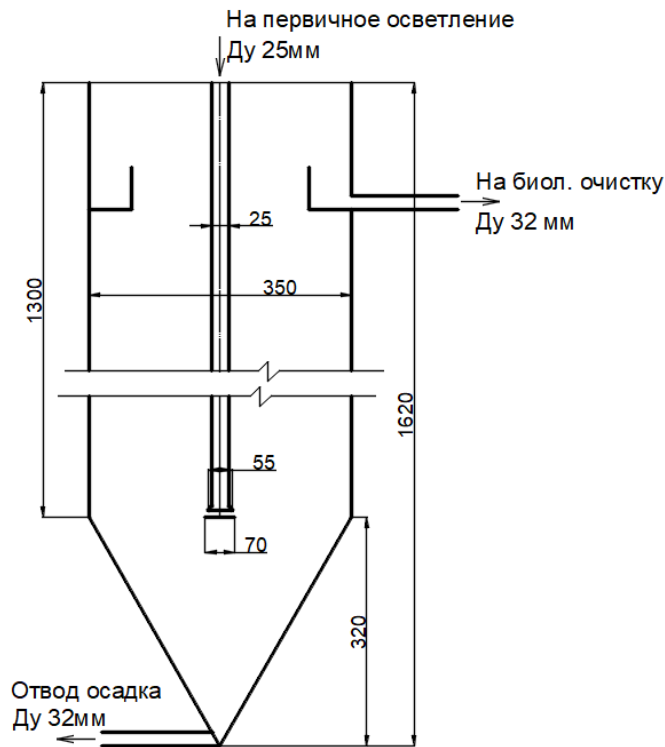


Рисунок П3.2 Размеры вертикального отстойника.

2. Расчет сооружений биологической очистки.

2.1. Анаэробный реактор культивирования ПАО.

Время пребывания в анаэробном реакторе при биологическом удалении фосфора определяется учетом фосфорного рецикла (искомая величина в данном исследовании), соответственно должно варьироваться конструктивно. Рекомендуемое время пребывания ($t_{ана}$) составляет 0,5-0,75 часа согласно стандарту ATV-DVWK-A 131E.

Коэффициент рециркуляции (R_f) находится в диапазоне 0,3-1.

Таким образом, минимальный и максимальный объем анаэробной зоны составят:

$$W_{ан. min, max} = 3600q * t_{ана}(1 + R_f)$$

Тогда:

$$W_{ан. min} = 0,042 * 0,5(1 + 0,3) = 0,0273 \text{ м}^3$$

$$W_{ан. max} = 0,042 * 0,75(1 + 1) = 0,063 \text{ м}^3$$

Предусматриваем 2 секции анаэробного биореактора (1 отключаемая).

Принимаем 2 круглых в плане биореактора высотой 1 м и диаметром 0,2 м.

Размеры анаэробного реакторы приведены на рисунке П3.3.

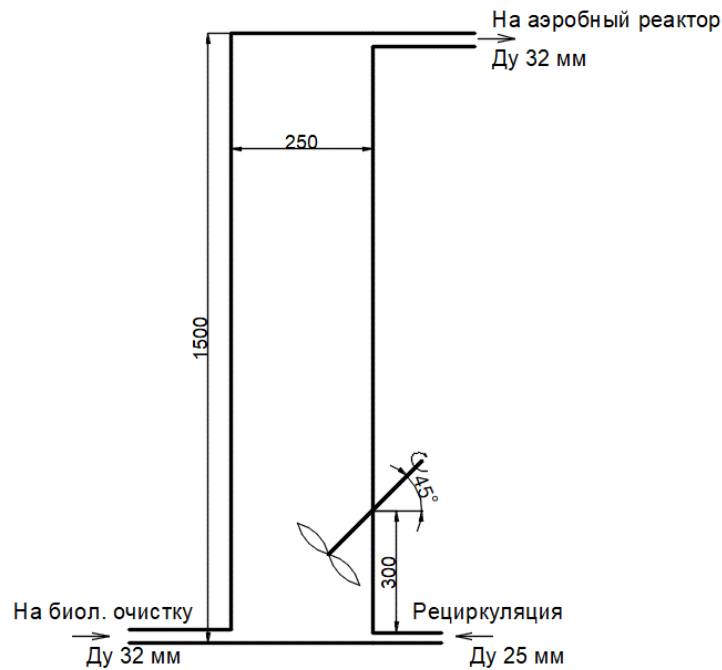


Рисунок П 3.3 Размеры анаэробного реактора

2.2. Эрлифтный биореактор-осветлитель.

Полезный объем биореактора-осветлителя определяется по формуле:

$$W = \frac{Q_{\text{сут}}(L_{\text{en}} - L_{\text{ex}})}{a_i \cdot (1 - A) \cdot 10^3 \cdot B_x};$$

где L_{en} – БПК на входе в сооружение, мг/л
 L_{ex} – БПК на выходе в сооружение, мг/л
 a_i – концентрация активного ила, мг/л
 B_x – нагрузка на активный ил, г/(г·сут)

Тогда:

$$W_{\text{min}} = \frac{1 \cdot (1 + 0,3) \cdot (200 - 15)}{3 \cdot (1 - 0,3) \cdot 10^3 \cdot 0,2} = 0,58 \text{ м}^3$$

$$W_{\text{max}} = \frac{1 \cdot (1 + 1) \cdot (200 - 15)}{3 \cdot (1 - 0,3) \cdot 10^3 \cdot 0,2} = 0,9 \text{ м}^3$$

Предусматривается 2 секции сооружения по 0,5 м³. Дальнейшие расчеты выполняются на все сооружение.

Рассчитывается окислительная мощность биологического реактора

$$OM = \rho \cdot a_i \cdot (1 - A) \cdot W,$$

где ρ – удельная скорость окисления, г/(г·ч).

$$OM = 0,006 \cdot 3 \cdot (1 - 0,3) \cdot 0,9 = 0,0114$$

Вычисляется требуемый расход воздуха

$$Q_{\text{air}} = \frac{OC}{k_{\text{исп}} \cdot M_O}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

где ОС – окислительная способность аэрационной системы, принимаемая равной окислительной мощности аэротенка-осветлителя ОМ, кг/ч;

$k_{исп}$ – коэффициент использования кислорода воздуха, определяемый исходя из глубины и типа аэраторов;

M_O – массовое содержание кислорода в подаваемом воздухе, кг/м³.

$$Q_{air} = \frac{0,0114}{0,07 \cdot 0,27} = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Компрессор HIBLOW HP-40

Назначается интенсивность аэрации в затопленном эрлифте q_{air} , м³/(м²·ч). Принимается $q_{air} = 10 \dots 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

По расходу воздуха и принятой интенсивности аэрации рассчитывается поперечная площадь затопленного эрлифта

$$\omega_a = \frac{Q_{air}}{q_{air}}, \text{ м}^2.$$

Тогда:

$$\omega_a = \frac{0,6}{10} = 0,06 \text{ м}^2$$

Задаем значением рабочей высоты Н, м.

$H = 0,9 \text{ м}$.

Принимается ширина осветлителя $B_c = (0,25 \dots 0,4) \cdot H$

$B_c = 0,35 \text{ м}$.

Глубина дна аэротенка-осветлителя относительно нижней кромки наклонного козырька определяется как

$$h_w = H - B_c$$

$h_w = 0,55 \text{ м}$.

Ширина зеркала защитной зоны принимается равной $B_s = 0,2 \cdot B_c$.

$B_s = 0,1 \text{ м}$.

Ширину зазора B_j между затопленной перегородкой и нижней кромкой наклонного козырька следует принимать равной $0,3 \dots 0,35$ от ширины B_c .

$B_j = 0,1 \text{ м}$.

Глубина погружения вертикальной разделительной перегородки под уровень свободной поверхности $z_s = 0,05 \cdot B_c$ при значении угла между наклонным козырьком и вертикальной плоскостью $\beta = 40^\circ$.

$z_s = 0,017 \text{ м}$

Ширина наклонной части, которая должна занимать участок дна, не находящийся в поле соударения с турбулентной затопленной струей, рассчитывается по формуле:

$$B_d = B_c - 0,175 \cdot h_w, \text{ м}.$$

$$B_d = 0,35 - 0,175 \cdot 0,55 = 0,25 \text{ м}$$

Высота наклонной части дна

$$H_d = B_d \cdot \operatorname{tg} \alpha_d, \text{ м},$$

где: α_d – угол наклонной поверхности, устраиваемой в месте сопряжения боковых стен и дна аэротенка-осветлителя, по отношению к горизонтальной плоскости. Угол α_d принимается равным 55° .

Тогда:

$$H_d = 0,25 \cdot \operatorname{tg} 55 = 0,35, \text{ м}$$

Ширина затопленного эрлифта B_a рассчитывается по формуле:

$$B_a = \frac{\omega_a}{W - H \cdot \omega_a} \cdot \left(B_j H + (B_c - B_s) \cdot \frac{(H - h_w + z_s)}{2} + h_w \cdot B_c - \frac{B_d \cdot H_d}{2} \right), \text{ м}.$$

$$B_a = \frac{0,06}{0,9 - 0,9 \cdot 0,06} \cdot \left(0,1 \cdot 0,9 + (0,35 - 0,1) \cdot \frac{(0,9 - 0,55 + 0,017)}{2} + 0,55 \cdot 0,35 - \frac{0,25 \cdot 0,35}{2} \right) = 0,024, \text{ м}.$$

Общая ширина секции аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации равна:

$$B = B_a + B_j + B_c, \text{ м}.$$

$$B = 0,012 + 0,1 + 0,35 = 0,46, \text{ м}.$$

Длина секции аэротенка-осветлителя

$$L = \frac{0,028}{0,011} = 2,5, \text{ м}.$$

Принято 2 секции по 1,2 м.

Размеры аэробного реактора-осветлителя приведены на рис. П 3.4, П 4.5.

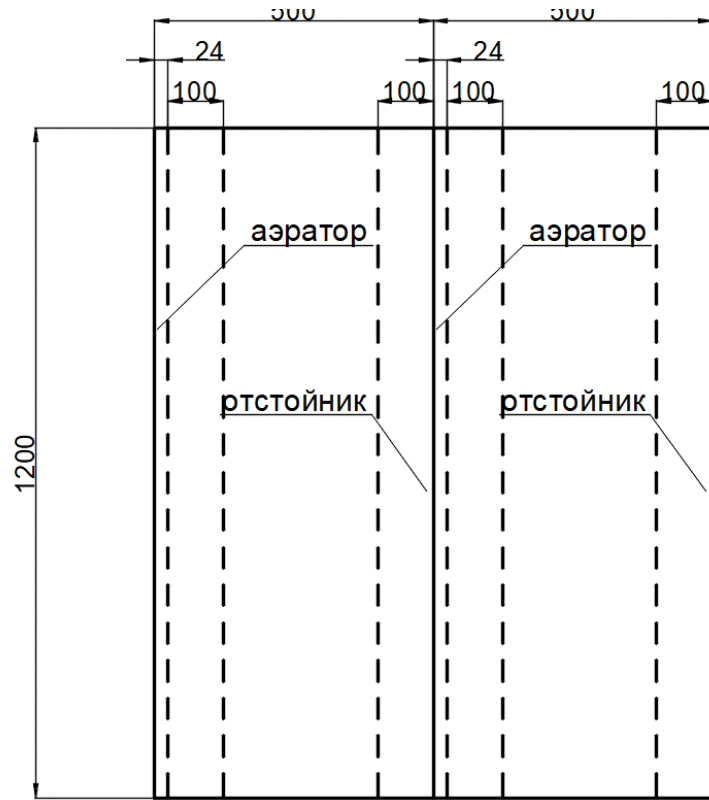


Рисунок П3.4. Размеры анаэробного реактора в плане

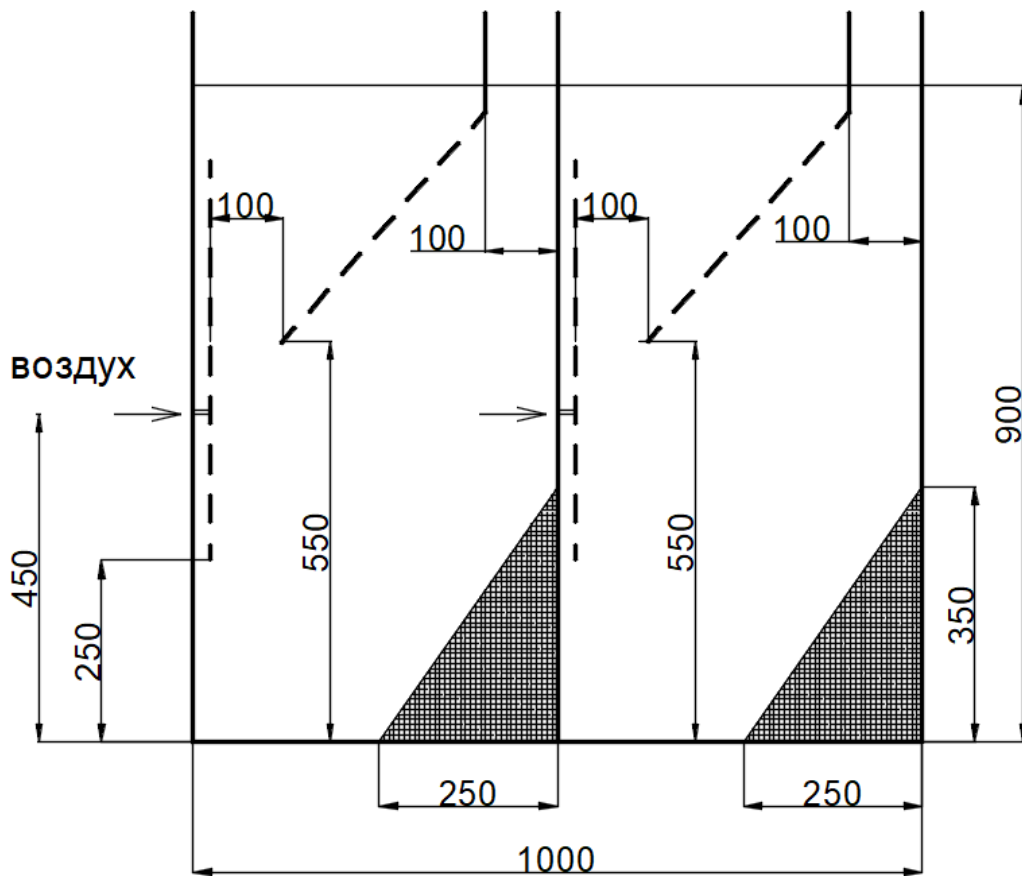


Рисунок П3.5. Размеры анаэробного реактора в разрезе

Приложение Г.

Сметный расчет реализации технологии БОСЭБ в части оборудования и устройства систем эрлифтной аэрации для п.г.т. Карло-Марксово

**Локальная смета на строительные работы № 2-2-1
на Станция биологической очистки с эрлифтным биореактором
КОС. БОСЭБ и воздуходувная**

Основание:
чертежи (спецификации) № 0820-РП-АС3

Сметная стоимость 26887,519 тыс. руб.
Сметная трудоемкость 11,3298 тыс. чел.-ч
Сметная заработная плата 3160,199 тыс. руб.
Средний разряд работ 3,9 разряд

Составлена в текущих ценах по состоянию на "24 июня" 2022 г.

№ п/п	Обоснование (шифр нормы)	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество	Стоимость единицы, руб.		Общая стоимость, руб.			Затраты труда рабочих, чел.-ч,	
					Всего	эксплуатации машин	Всего	заработной платы	эксплуатации машин	не занятых обслуживанием машин	
										заработной платы	в том числе заработной платы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Раздел 1. Технологическая конструкция											
1	E9-31-1	Монтаж щитов и блоков встроенных площадок с настилом из листовой стали, ребрами жесткости, составного сечения	т	23,9003	<u>34429,79</u> 8972,73	<u>3872,66</u> 2103,48	822882	214451	<u>92558</u> 50274	<u>31,68</u> 6,5212	<u>757,16</u> 155,86
2	E9-73-1	Изготовление площадок для обслуживания оборудования и трубопроводов	т	23,9003	<u>53756,43</u> 39656,80	<u>6976,41</u> 2461,37	1284795	947809	<u>166738</u> 58827	<u>152</u> 7,588	<u>3632,85</u> 181,36
3	C111-1814 вариант 8	Уголок стальной равнополочный, 50x6	т	4, 5669096	<u>98619,17</u> -	-	450385	-	-	-	-
4	C111-1804 вариант 7	Сталь листовая, толщиной 4мм	т	15, 7528608	<u>135312,32</u> -	-	2131556	-	-	-	-
5	C111-826 вариант 12	Профили гнутые стальные из горячекатаного листового проката, 50x6мм	т	4, 3453392	<u>134481,93</u> -	-	584370	-	-	-	-
6	E13-16-9	Огрунтовка металлических поверхностей за один раз грунтовкой ЭП-057	100 м2	12, 6274156	<u>11872,40</u> 1077,71	<u>179,85</u> 29,91	149918	13609	<u>2271</u> 378	<u>3,55</u> 0,1125	<u>44,83</u> 1,42

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	E13-30-3 K=5	Окраска металлических оштукатуренных поверхностей эмалью ЭП-5116	100 м2	12, 6274156	<u>18305,05</u> 5245,38	<u>794,05</u> 95,46	231145	66236	<u>10027</u> 1205	<u>18</u> 0,36	<u>227,29</u> 4,55
		Итого прямые затраты по разделу 1					5655051	1242105	<u>271594</u> 110684		<u>4662,13</u> 343,19
		Итого строительные работы, руб. в том числе: стоимость материалов, изделий и конструкций, руб. всего заработная плата, руб. Общепроизводственные расходы, руб. трудоемкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч заработная плата в общепроизводственных расходах, руб. Всего строительные работы, руб.					5655051 4141352 1352789 790852 440,19 182185 6445903				
		----- -									
		Всего по разделу 1					6445903				
		Раздел 2. Оборудование монтируемое									
8	M7-218-1 Указания по прим. РЭСНМО таб.1,к=0,75	Монтаж насосного агрегата лопастного центробежного одноступенчатого, многоступенчатого объемного, вихревого, поршневого, приводного, роторного на общей фундаментной плите или моноблочного, масса 0,064 т	шт	20	<u>11905,15</u> 7396,52	<u>173,43</u> 42,30	238103	147930	<u>3469</u> 846	<u>28,35</u> 0,1457	<u>567</u> 2,91
9	1808-1001 вариант 1	Насос канализационный Drain MTC 40F16.15/7	шт	14	<u>84832,00</u> -	- -	1187648	-	- -	- -	- -
10	1808-1001 вариант 2	Насос погружной Rexa UNI V05/T08-540	шт	6	<u>44303,00</u> -	- -	265818	-	- -	- -	- -
11	1808-1001 вариант 3	Насос погружной Rexa CUT GI03.29S-T15-2-540	шт	6	<u>97433,00</u> -	- -	584598	-	- -	- -	- -
12	M38-7-2 Указания по прим. РЭСНМО таб.1,к=0,9	Монтаж оборудования вида машин и механизмов в помещении, масса оборудования 0,05 т	шт	4	<u>12266,97</u> 6011,14	<u>1400,25</u> 959,40	49068	24045	<u>5601</u> 3838	<u>23,04</u> 3,2148	<u>92,16</u> 12,86
13	1808-1001 вариант 4	Погружная мешалка Иртыш ПМЗ 188-0,75/4-106	шт	4	<u>98600,00</u> -	- -	394400	-	- -	- -	- -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
14	M38-2-3	Монтаж оборудования вида сосудов или аппаратов без механизмов в помещении, масса оборудования 0,1 т	шт	2	<u>11789,67</u> 5659,00	<u>590,88</u> 298,20	23579	11318	<u>1182</u> 596	<u>22,2</u> 1,0341	<u>44,4</u> 2,07
15	1808-38014 вариант 1	Мультимедийный фильтр Runxin 1465	шт	2	<u>51000,00</u> -	<u>-</u> -	102000	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
16	M7-106-1 Указания по прим. РЭСНМО таб.1,к=1,3	Монтаж газовоздуходувки роторной, масса 0,1 т	шт	6	<u>24086,36</u> 12673,21	<u>368,56</u> 107,12	144518	76039	<u>2211</u> 643	<u>49,14</u> 0,3624	<u>294,84</u> 2,17
17	2302-12001 вариант 1	Воздуходувка Lutos DT 40/72	шт	6	<u>582398,00</u> -	<u>-</u> -	3494388	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
18	M12-802-2	Задвижки чугунные фланцевые на условное давление 1 МПа [10 кгс/см2], диаметр условного прохода 50 мм	10 шт	0,6	<u>14574,90</u> 12819,84	<u>329,73</u> 168,04	8745	7692	<u>198</u> 101	<u>48</u> 0,55	<u>28,8</u> 0,33
19	2307-11052 вариант 1	Задвижка шиберная с двухсторонним уплотнением и электроприводом тип 2905 DN50мм	шт	6	<u>296510,00</u> -	<u>-</u> -	1779060	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
20	M12-802-3	Задвижки чугунные фланцевые на условное давление 1 МПа [10 кгс/см2], диаметр условного прохода 65-100 мм	10 шт	0,6	<u>21374,29</u> 17093,12	<u>885,99</u> 439,24	12825	10256	<u>532</u> 264	<u>64</u> 1,439	<u>38,4</u> 0,86
21	2307-11052 вариант 2	Задвижка кольцевая клиновая фланцевая с электроприводом тип 2910/2913 DN100	шт	4	<u>311231,00</u> -	<u>-</u> -	1244924	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
22	2307-11052 вариант 3	Задвижка кольцевая клиновая фланцевая с электроприводом тип 2910/2913 DN65	шт	2	<u>292723,00</u> -	<u>-</u> -	585446	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
23	M38-1-2	Монтаж оборудования вида сосудов или аппаратов без механизмов на открытой площадке, масса оборудования 0,05 т	шт	1	<u>10279,11</u> 4511,91	<u>272,03</u> 112,08	10279	4512	<u>272</u> 112	<u>17,7</u> 0,4284	<u>17,7</u> 0,43
24	1914-13194 вариант 1	Станция приготовления реагента СРРф-200	шт	1	<u>225000,00</u> -	<u>-</u> -	225000	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
25	M34-53-4	Монтаж облучателя ультрафиолетового коротковолнового для местных облучений	комплект	2	<u>2752,18</u> 2752,18	<u>-</u> -	5504	5504	<u>-</u> -	<u>11,2</u> -	<u>22,4</u> -
26	1515-2031 вариант 2	Ультрафиолетовые лампы УФЛ J-Aqua 8	10шт	0,2	<u>14688,16</u> -	<u>-</u> -	2938	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
Итого прямые затраты по разделу 2							10358841	287296	<u>13465</u> 6400		<u>1105,7</u> 21,63
Итого оборудование, руб.							9863282				
Транспортные и заготовительно-складские затраты, руб.							387332				
Всего оборудование, руб.							10250614				
Итого строительные работы, руб.							495559				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		в том числе: стоимость материалов, изделий и конструкций, руб. всего заработная плата, руб. Общепроизводственные расходы, руб. трудоемкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч заработная плата в общепроизводственных расходах, руб. Всего строительные работы, руб.					194798 293696 166028 89,05 36859 661587				

		Всего по разделу 2					10912201				
		Раздел 3. Система аэрации А0 БОСЭБ									
27	M12-802-3	Задвижки чугунные фланцевые на условное давление 1 МПа [10 кгс/см ²], диаметр условного прохода 65-100 мм	10 шт	1,4	<u>21374,29</u> 17093,12	<u>885,99</u> 439,24	29924	23930	<u>1240</u> 615	<u>64</u> 1,439	<u>89,6</u> 2,01
28	C1630-66 вариант 22	Задвижка кольцевая клиновья фланцевая с выдвигаемым шпинделем тип 2117 DN80	шт	6	<u>27079,83</u> -	<u>-</u> -	162479	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
29	C1630-66 вариант 21	Задвижка кольцевая клиновья фланцевая с выдвигаемым шпинделем тип 2117 DN65	шт	8	<u>21959,84</u> -	<u>-</u> -	175679	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
30	M12-121-2	Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 110-140 мм	100 м	1,12	<u>47824,75</u> 42732,80	<u>4745,46</u> 1318,30	53564	47861	<u>5315</u> 1476	<u>160</u> 5,656	<u>179,2</u> 6,33
31	2407-1001 вариант 1	Комплект азраторов 120мм по 05.10.2020-03-ТХ	шт	2	<u>1170565,</u> <u>20</u> -	<u>-</u> -	2341130	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
32	M12-2-11	Трубопроводы из стальных труб с фланцами и сварными стыками на условное давление не более 2,5 МПа [25 кгс/см ²], монтируемые из готовых узлов, диаметр наружный 159 мм	т	0,1044	<u>77099,61</u> 47006,08	<u>20432,93</u> 7311,64	8049	4907	<u>2133</u> 763	<u>176</u> 24,3804	<u>18,37</u> 2,55
33	C113-48 вариант 1	Труба Ст 20 (ГОСТ 10704-91) 159 х 4,5 - 2	м	6	<u>1205,56</u> -	<u>-</u> -	7233	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
34	M12-2-9	Трубопроводы из стальных труб с фланцами и сварными стыками на условное давление не более 2,5 МПа [25 кгс/см ²], монтируемые из готовых узлов, диаметр наружный 108 мм	т	0,529254	<u>92699,76</u> 60707,28	<u>25586,72</u> 9303,38	49062	32130	<u>13542</u> 4924	<u>227,3</u> 30,7018	<u>120,3</u> 16,25

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
35	C113-48 вариант 2	Трубы нержавеющие бесшовные 108x3 108 12X18H10T	м	17	<u>1205,56</u>	-	20495	-	-	-	-
36	C113-48 вариант 3	Труба Ст 20 (ГОСТ 10704-91) 108 x 4,0 - 2 - ППУ - ОЦ	м	15	<u>767,91</u>	-	11519	-	-	-	-
37	C113-1515 вариант 3	Отвод 90, Ст 20 (ГОСТ 10704-91) 108 x 4, 0(5,0) - 2 - ППУ - ОЦ	шт	4	<u>3927,65</u>	-	15711	-	-	-	-
38	M12-2-7	Трубопроводы из стальных труб с фланцами и сварными стыками на условное давление не более 2,5 МПа [25 кгс/см ²], монтируемые из готовых узлов, диаметр наружный 76 мм	т	1,271305	<u>139613,88</u> 85812,80	<u>47165,08</u> 17144,33	177492	109094	<u>59961</u> 21796	<u>321,3</u> 56,6964	<u>408,47</u> 72,08
39	C113-48 вариант 4	Трубы нержавеющие бесшовные 76x2 76 10X17H13M2T	м	15	<u>2773,64</u>	-	41605	-	-	-	-
40	C113-48 вариант 6	Труба Ст 20 (ГОСТ 10704-91) 76 x 3,5 - 2 - ППУ - ОЦ	м	90	<u>598,65</u>	-	53879	-	-	-	-
41	C113-1523 вариант 3	Тройниковое ответвление, Ст 09Г2С (ГОСТ 10704-91) 108 x 4,0 - 76 x 3,5 - 2 - ППУ - ОЦ	шт	8	<u>21423,77</u>	-	171390	-	-	-	-
42	M12-2-5	Трубопроводы из стальных труб с фланцами и сварными стыками на условное давление не более 2,5 МПа [25 кгс/см ²], монтируемые из готовых узлов, диаметр наружный 45 мм	т	0,29565	<u>234863,52</u> 129800,88	<u>100286,32</u> 36991,92	69437	38376	<u>29650</u> 10937	<u>486</u> 121,1666	<u>143,69</u> 35,82
43	C113-48 вариант 5	Трубы нержавеющие бесшовные 42x2 42 12X18H10T.	м	150	<u>983,11</u>	-	147467	-	-	-	-
44	C113-1883 вариант 1	Хомут для тяжелых нагрузок 40-45 мм (1" 1/4), М8, не-ржавеющая сталь AISI 304	шт	32	<u>42,86</u>	-	1372	-	-	-	-
45	C113-1883 вариант 2	Хомут для тяжелых нагрузок 108-115 (4") мм, М10, нержа-веющая сталь AISI 304 с анкерным креплением	шт	32	<u>55,10</u>	-	1763	-	-	-	-
		Итого прямые затраты по разделу 3					3539250	256298	<u>111841</u> 40511		<u>959,63</u> 135,04
		Итого строительные работы, руб.					3539250				
		в том числе:									
		стоимость материалов, изделий и конструкций, руб.					3171111				
		всего заработная плата, руб.					296809				
		Общепроизводственные расходы, руб.					164820				
		трудоемкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч					86,48				
		заработная плата в общепроизводственных расходах, руб.					35791				
		Всего строительные работы, руб.					3704070				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

		Всего по разделу 3					3704070				
		Раздел 4. Лотковые системы БОСЭБ									
46	E9-75-1	Изготовление мелких индивидуальных листовых конструкций массой до 0,5 т [бачки, воронки, желоба, лотки и пр.]	т	1,5168	<u>98109,50</u> 67207,84	<u>16946,97</u> 6067,72	148812	101941	<u>25705</u> 9204	<u>257,6</u> 18,29	<u>390,73</u> 27,74
47	C111-1804 вариант 10	Сталь листовая 12x18Н10Т 2мм	т	1, 6138752	<u>87265,45</u> -	- -	140836	-	- -	- -	- -
48	E9-53-2	Монтаж лотков, решеток, затворов из полосовой и тонколистовой стали	т	1,5168	<u>39019,15</u> 17637,91	<u>671,94</u> 318,06	59184	26753	<u>1019</u> 482	<u>74,56</u> 1,1909	<u>113,09</u> 1,81
49	C113-1883 вариант 3	Анкер клиновой нержавеющей 10x132(М10)	шт	260	<u>55,10</u> -	- -	14326	-	- -	- -	- -
50	M12-2-12	Трубопроводы из стальных труб с фланцами и сварными стыками на условное давление не более 2,5 МПа [25 кг/см ²], монтируемые из готовых узлов, диаметр наружный 219 мм	т	0,24024	<u>62659,40</u> 40596,16	<u>12019,48</u> 4130,80	15053	9753	<u>2888</u> 992	<u>152</u> 13,9854	<u>36,52</u> 3,36
51	C113-190 вариант 2	Трубы стальные нержавеющей 250x4мм	м	8,8	<u>1001,33</u> -	- -	8812	-	- -	- -	- -
		Итого прямые затраты по разделу 4					387023	138447	<u>29612</u> 10678		<u>540,34</u> 32,91
		Итого строительные работы, руб. в том числе: стоимость материалов, изделий и конструкций, руб. всего заработная плата, руб. Общепроизводственные расходы, руб. трудоемкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч заработная плата в общепроизводственных расходах, руб.					387023				
		Всего строительные работы, руб.					475524				

		Всего по разделу 4					475524				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Раздел 5. Безнапорные и напорные системы (сток, ил) БОСЭБ									
		K0.3									
52	M12-121-5	Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 280-310 мм	100 м	0,16	<u>94960,54</u> 85465,60	<u>9093,51</u> 3482,07	15194	13674	<u>1455</u> 557	<u>320</u> 12,54	<u>51,2</u> 2,01
53	C113-1367 вариант 1	Трубы полиэтиленовые для подачи холодной воды PE 100 SDR 11(1,6МПа), наружный диаметр 250x22,7 мм	м	16	<u>1503,82</u> -	- -	24061	-	- -	- -	- -
54	C113-1010 вариант 3	Отвод ПЭ 100 SDR11 250x22,7 90гр	шт	2	<u>18691,81</u> -	- -	37384	-	- -	- -	- -
55	C113-1275 вариант 2	Заглушка ПЭ 100 SDR11 250x22,7	шт	2	<u>4945,05</u> -	- -	9890	-	- -	- -	- -
56	C113-1345 вариант 3	Седловая врезка 225/4" компрессионная с кольцом PN10	шт	16	<u>1137,69</u> -	- -	18203	-	- -	- -	- -
57	C113-1285 вариант 2	Муфта компрессионная 110/4" с наружной резьбой PN10	шт	16	<u>216,11</u> -	- -	3458	-	- -	- -	- -
58	M12-121-2	Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 110-140 мм	100 м	0,56	<u>47824,75</u> 42732,80	<u>4745,46</u> 1318,30	26782	23930	<u>2657</u> 738	<u>160</u> 5,656	<u>89,6</u> 3,17
59	C113-1360 вариант 1	Трубы полиэтиленовые для подачи холодной воды PE 100 SDR 11(1,6МПа), наружный диаметр 110x10 мм	м	56	<u>511,47</u> -	- -	28642	-	- -	- -	- -
60	C113-1064 вариант 2	Тройники разносторонние из полиэтилена диам. 110/63 мм для сварки ПЕ труб методом "Враструб"	шт	24	<u>676,36</u> -	- -	16233	-	- -	- -	- -
61	M12-121-1	Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 40-90 мм	100 м	0,5	<u>47486,79</u> 42732,80	<u>4415,80</u> 1121,07	23743	21366	<u>2208</u> 561	<u>160</u> 4,9	<u>80</u> 2,45
62	C113-1357	Трубы полиэтиленовые для подачи холодной воды PE 100 SDR 11(1,6МПа), наружный диаметр 63x5,8 мм	м	50	<u>224,24</u> -	- -	11212	-	- -	- -	- -
63	C113-1883 вариант 4	Хомут для тяжелых нагрузок 59-63 мм (2"), М8, нержавеющая сталь AISI 304 с анкерным креплением	шт	24	<u>50,20</u> -	- -	1205	-	- -	- -	- -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
64	M12-790-4	К3.2 Вентили, задвижки, клапаны стальные фланцевые предохранительные, пружинные однорычажные и двухрычажные обратные подъемные на условное давление до 2,5 МПа [25 кгс/см2], диаметр условного прохода 65-100 мм	10 шт	0,2	<u>23779,92</u> 17093,12	<u>1037,18</u> 500,64	4756	3419	<u>207</u> 100	<u>64</u> 1,613	<u>12,8</u> 0,32
65	C130-1175 вариант 2	Задвижка шиберная с двусторонним уплотнением тип 2005 DN100 с фланцами	шт	2	<u>1161,40</u> -	-	2323	-	-	-	-
66	M12-121-2	Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 110-140 мм	100 м	0,22	<u>47824,75</u> 42732,80	<u>4745,46</u> 1318,30	10521	9401	<u>1044</u> 290	<u>160</u> 5,656	<u>35,2</u> 1,24
67	C113-1360 вариант 4	Труба ПЭ 100 SDR11 110x10 PN16	м	22	<u>511,47</u> -	-	11252	-	-	-	-
68	C113-992 вариант 2	Отвод ПЭ 100 SDR11 110x10 PN16 90гр	шт	4	<u>518,39</u> -	-	2074	-	-	-	-
69	C113-1064 вариант 3	Буртовая втулка под фланец ПЭ 100 SDR11 110x10 PN16	шт	2	<u>676,36</u> -	-	1353	-	-	-	-
70	C113-1044 вариант 6	Тройник ПЭ 100 SDR11 63x5,8 PN16 90гр	шт	4	<u>386,88</u> -	-	1548	-	-	-	-
71	C113-1044 вариант 7	Тройник ПЭ 100 SDR11 110x63 PN16 90гр	шт	2	<u>386,88</u> -	-	774	-	-	-	-
72	C113-1206 вариант 2	Переход ПЭ 100 SDR11 110x63 PN16	шт	4	<u>223,20</u> -	-	893	-	-	-	-
73	M12-121-1	Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 40-90 мм	100 м	0,7	<u>47486,79</u> 42732,80	<u>4415,80</u> 1121,07	33241	29913	<u>3091</u> 785	<u>160</u> 4,9	<u>112</u> 3,43
74	C113-1357	Трубы полиэтиленовые для подачи холодной воды PE 100 SDR 11(1,6МПа), наружный диаметр 63x5,8 мм	м	30	<u>224,24</u> -	-	6727	-	-	-	-
75	C113-1355	Трубы полиэтиленовые для подачи холодной воды PE 100 SDR 11(1,6МПа), наружный диаметр 40x3,7 мм	м	40	<u>142,65</u> -	-	5706	-	-	-	-
76	C113-1056 вариант 3	Тройник компрессионный 50x40x50 переходной ПНД	шт	16	<u>186,27</u> -	-	2980	-	-	-	-
77	C113-1056 вариант 4	Тройник компрессионный 40x40x40 соединительный ПНД	шт	16	<u>186,27</u> -	-	2980	-	-	-	-
78	C113-1252 вариант 3	Заглушка компрессионная ПНД d 50 м	шт	32	<u>64,72</u> -	-	2071	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
79	C113-1883 вариант 4	Хомут для тяжелых нагрузок 59-63 мм (2"), М8, нержавеющая сталь AISI 304 с анкерным креплением	шт	10	<u>50,20</u> -	- -	502	-	- -	- -	- -
80	C113-1883 вариант 2	Хомут для тяжелых нагрузок 108-115 (4") мм, М10, нержа-вееющая сталь AISI 304 с анкерным креплением	шт	4	<u>55,10</u> -	- -	220	-	- -	- -	- -
81	C113-1883 вариант 1	Хомут для тяжелых нагрузок 40-45 мм (1" 1/4), М8, не-ржавеющая сталь AISI 304 К0.2 напорные линии иловых насосов	шт	16	<u>42,86</u> -	- -	686	-	- -	- -	- -
82	M12-2-6	Трубопроводы из стальных труб с фланцами и сварными стыками на условное давление не более 2,5 МПа [25 кгс/см2], монтируемые из готовых узлов, диаметр наружный 57 мм	т	0,27424	<u>181538,12</u> 109556,22	<u>64942,70</u> 23574,33	49785	30045	<u>17810</u> 6465	<u>410,2</u> 77,9612	<u>112,49</u> 21,38
83	C113-42 вариант 3	Труба оцинкованная 57 x 3,5	м	50	<u>665,31</u> -	- -	33266	-	- -	- -	- -
84	C113-41 вариант 2	Труба оцинкованная 40 x 3,5	м	4	<u>292,87</u> -	- -	1171	-	- -	- -	- -
85	C113-40 вариант 2	Труба оцинкованная 32 x 3,2	м	6	<u>260,17</u> -	- -	1561	-	- -	- -	- -
86	C113-117 вариант 2	Переход 159x57	10шт	0,6	<u>699,27</u> -	- -	420	-	- -	- -	- -
87	M12-790-2	Вентили, задвижки, клапаны стальные фланцевые предохранительные, пружинные однорычажные и двухрычажные обратные подъемные на условное давление до 2,5 МПа [25 кгс/см2], диаметр условного прохода 32-40 мм	10 шт	0,4	<u>14730,82</u> 12819,84	<u>522,60</u> 260,01	5892	5128	<u>209</u> 104	<u>48</u> 0,846	<u>19,2</u> 0,34
88	C130-1181 вариант 2	Кран шаровой сталь BALLOMAX ДУ 32 РУ40 ВР BROEN	шт	4	<u>282,75</u> -	- -	1131	-	- -	- -	- -
89	C113-1883 вариант 4	Хомут для тяжелых нагрузок 59-63 мм (2"), М8, нержавеющая сталь AISI 304 с анкерным креплением К0.2, К3.2, К0.4	шт	16	<u>50,20</u> -	- -	803	-	- -	- -	- -
90	M12-121-1	Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 40-90 мм	100 м	0,86	<u>47486,79</u> 42732,80	<u>4415,80</u> 1121,07	40839	36750	<u>3798</u> 964	<u>160</u> 4,9	<u>137,6</u> 4,21
91	C113-1357 вариант 1	Труба ПЭ 100 SDR11 63x5.8 PN16	м	70	<u>224,24</u> -	- -	15697	-	- -	- -	- -
92	C113-1355 вариант 1	Труба ПЭ 100 SDR11 40x3,7 PN16	м	16	<u>142,65</u> -	- -	2282	-	- -	- -	- -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
93	C113-1044 вариант 5	Тройник ПЭ 100 SDR11 63x5,8 PN16 90гр	шт	18	<u>264,48</u>	-	4761	-	-	-	-
94	C113-1203 вариант 2	Переход ПЭ 100 SDR11 63x40 PN16	шт	12	<u>108,75</u>	-	1305	-	-	-	-
95	C113-990 вариант 3	Отвод ПЭ 100 SDR11 63x5,8 PN16 90гр	шт	18	<u>183,69</u>	-	3306	-	-	-	-
96	C113-1883 вариант 4	Хомут для тяжелых нагрузок 59-63 мм (2"), М8, нержавеющая сталь AISI 304 с анкерным креплением	шт	30	<u>50,20</u>	-	1506	-	-	-	-
97	M12-2-6	Трубопроводы из стальных труб с фланцами и сварными стыками на условное давление не более 2,5 МПа [25 кгс/см ²], монтируемые из готовых узлов, диаметр наружный 57 мм	т	0,3696	<u>181538,12</u> 109556,22	<u>64942,70</u> 23574,33	67096	40492	<u>24003</u> 8713	<u>410,2</u> 77,9612	<u>151,61</u> 28,81
98	C113-139	Трубы стальные электросварные прямошовные из стали марки 20, наружный диаметр 57 мм, толщина стенки 3,5 мм	м	80	<u>331,66</u>	-	26533	-	-	-	-
99	M12-2-4	Трубопроводы из стальных труб с фланцами и сварными стыками на условное давление не более 2,5 МПа [25 кгс/см ²], монтируемые из готовых узлов, диаметр наружный 32-38 мм	т	0,04635	<u>282338,00</u> 155974,72	<u>121359,66</u> 44214,33	13086	7229	<u>5625</u> 2049	<u>584</u> 146,1036	<u>27,07</u> 6,77
100	C113-132 вариант 1	Трубы стальные электросварные прямошовные из стали марки 20, наружный диаметр 32 мм, толщина стенки 3 мм	м	15	<u>147,39</u>	-	2211	-	-	-	-
101	M12-790-2	Вентили, задвижки, клапаны стальные фланцевые предохранительные, пружинные однорычажные и двухрычажные обратные подъемные на условное давление до 2,5 МПа [25 кгс/см ²], диаметр условного прохода 32-40 мм	10 шт	0,4	<u>14730,82</u> 12819,84	<u>522,60</u> 260,01	5892	5128	<u>209</u> 104	<u>48</u> 0,846	<u>19,2</u> 0,34
102	C130-1181 вариант 2	Кран шаровой сталь BALLOMAX ДУ 32 РУ40 ВР BROEN	шт	4	<u>282,75</u>	-	1131	-	-	-	-
103	C113-1883 вариант 4	Хомут для тяжелых нагрузок 59-63 мм (2"), М8, нержавеющая сталь AISI 304 с анкерным креплением	шт	30	<u>50,20</u>	-	1506	-	-	-	-
104	E13-26-6 к=2	Окраска металлических огрунтованных поверхностей эмалью ПФ-115	100 м2	0,24	<u>11206,26</u> 2109,81	<u>225,81</u> 42,79	2690	506	<u>54</u> 10	<u>7,24</u> 0,1608	<u>1,74</u> 0,04

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
105	M12-121-1	X1 Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 40-90 мм	100 м	0,38	<u>47486,79</u> 42732,80	<u>4415,80</u> 1121,07	18045	16238	<u>1678</u> 426	<u>160</u> 4,9	<u>60,8</u> 1,86
106	C113-1353 вариант 2	Труба ПЭ 100 SDR11 25x2,3 PN16	м	38	<u>34,40</u> -	- -	1307	-	- -	- -	- -
107	C113-1883 вариант 5	Хомут 3/4" 23-28 трубный М8 нержавеющая сталь с ан-кером	шт	12	<u>30,62</u> -	- -	367	-	- -	- -	- -
108	M12-121-1	X2 Трубопроводы из полиэтиленовых труб с применением готовых деталей, диаметр наружный 40-90 мм	100 м	0,38	<u>47486,79</u> 42732,80	<u>4415,80</u> 1121,07	18045	16238	<u>1678</u> 426	<u>160</u> 4,9	<u>60,8</u> 1,86
109	C113-1353 вариант 2	Труба ПЭ 100 SDR11 25x2,3 PN16	м	38	<u>34,40</u> -	- -	1307	-	- -	- -	- -
110	C113-1883 вариант 5	Хомут 3/4" 23-28 трубный М8 нержавеющая сталь с ан-кером КОС Вентиляция	шт	12	<u>30,62</u> -	- -	367	-	- -	- -	- -
111	E20-32-1	Установка вентиляторов осевых массой до 0,025 т	шт	3	<u>1733,59</u> 1658,57	<u>66,86</u> 35,16	5201	4976	<u>201</u> 105	<u>6,21</u> 0,1231	<u>18,63</u> 0,37
112	C130-62 вариант 10	Вытяжной вентилятор ВЕНТС ОБ 4Д 400 L3740куб/час	шт	2	<u>12775,94</u> -	- -	25552	-	- -	- -	- -
113	C130-62 вариант 13	Рекуператор "PRANA-200С"	шт	1	<u>66098,27</u> -	- -	66098	-	- -	- -	- -
114	E18-6-3	Установка конвекторов	100 кВт	0,01	<u>40023,82</u> 36370,56	<u>3303,29</u> 1879,15	400	364	<u>33</u> 19	<u>142,68</u> 6,8996	<u>1,43</u> 0,07
115	& C130-420- Д вариант 1	Обогреватель конвекторный Delta-3003	шт	1	<u>2263,46</u> -	- -	2263	-	- -	- -	- -
116	E20-12-1	Установка решеток жалюзийных стальных неподвижных односекционных размером 150x490 мм	решетка	4	<u>569,45</u> 452,69	<u>45,71</u> 19,76	2278	1811	<u>183</u> 79	<u>1,82</u> 0,0745	<u>7,28</u> 0,3
117	C130-595-1 вариант 6	Приточная решетка P2 Д530	шт	4	<u>599,87</u> -	- -	2399	-	- -	- -	- -
118	E16-10-8	Прокладка трубопроводов отопления и водоснабжения из стальных электросварных труб диаметром 200 мм	100 м	0,2	<u>292745,42</u> 71895,86	<u>10638,56</u> 5263,22	58549	14379	<u>2128</u> 1053	<u>272,24</u> 19,3859	<u>54,45</u> 3,88
		Итого прямые затраты по разделу 5					792662	280987	<u>68271</u> 23548		<u>1053,1</u> 82,85
		Итого строительные работы, руб. в том числе:					792662				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		стоимость материалов, изделий и конструкций, руб. всего заработная плата, руб. Общепроизводственные расходы, руб. трудоемкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч заработная плата в общепроизводственных расходах, руб. Всего строительные работы, руб.					443404 304535 172000 91,98 38078 964662					
		----- -										
		Всего по разделу 5					964662					
		Раздел 6. Оборудование монтируемое										
119	M38-1-5	Монтаж оборудования вида сосудов или аппаратов без механизмов на открытой площадке, масса оборудования 1 т	шт	1	<u>23420,34</u> 8157,12	<u>1534,73</u> 696,03	23420	8157	<u>1535</u> 696	<u>32</u> 2,1956	<u>32</u> 2,2	
120	1505-10012-1 вариант 1	Павильон технологический 2400х2400 в комплекте с освещением, вентиляцией. Каркас – труба 100х10, ст.3. Обшивка – сэндвич панели 100 мм ГРЩ, Секция 1,2	шт	1	<u>500000,00</u> -	- -	500000	-	- -	- -	- -	
121	M8-573-4	Шкаф [пульт] управления навесной, высота, ширина и глубина до 600х600х350 мм	шт	1	<u>1556,05</u> 880,80	<u>206,55</u> 89,25	1556	881	<u>207</u> 89	<u>3,2</u> 0,2946	<u>3,2</u> 0,29	
122	& C1111-8-2 вариант 1	Заглушка 24 модуля	шт	3	<u>489,63</u> -	- -	1469	-	- -	- -	- -	
123	& C1111-8-2 вариант 2	Замок Тип 405	шт	3	<u>1346,43</u> -	- -	4039	-	- -	- -	- -	
124	1517-1980-7 вариант 42	XL3 800 Щит шир.660 в.1550	шт	2	<u>36512,10</u> -	- -	73024	-	- -	- -	- -	
125	& C1111-8-2 вариант 3	ПЛАСТИНАДРХ3 160/250 С/БЕЗ ДИФ	шт	4	<u>2802,99</u> -	- -	11212	-	- -	- -	- -	
126	& C1111-8-2 вариант 4	XL3ЛпVis63/160A/DPX125в200 24м	шт	2	<u>2050,23</u> -	- -	4100	-	- -	- -	- -	
127	& C1111-8-2 вариант 4	XL3ЛпVis63/160A/DPX125в200 24м	шт	3	<u>2050,23</u> -	- -	6151	-	- -	- -	- -	
128	& C1111-8-2 вариант 5	XL3 800 Л.п.на винтах 24м в.50	шт	1	<u>1406,41</u> -	- -	1406	-	- -	- -	- -	
129	& C1111-8-2 вариант 11	XL3 800 Л.п.на винтах 24м в100	шт	1	<u>1266,87</u> -	- -	1267	-	- -	- -	- -	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
130	& С1111-8-2 вариант 5	XL3 800 Л.п.на винтах 24м в.50	шт	1	<u>1406,41</u>	-	1406	-	-	-	-
131	& С1111-8-2 вариант 6	XL3 800 Л.п.на винтах 24м в 400	шт	2	<u>4284,03</u>	-	8568	-	-	-	-
132	& С1111-8-2 вариант 10	XL3 800 Л.п.на винтах 24м в 500	шт	1	<u>4284,03</u>	-	4284	-	-	-	-
133	& С1111-8-2 вариант 7	XL3 800Дв.д/щит мет.660X1550	шт	2	<u>13953,63</u>	-	27907	-	-	-	-
134	С1110-100 вариант 3	Комплект для заземления	шт	2	<u>16524,10</u>	-	33048	-	-	-	-
135	С1110-100 вариант 4	Шина Земли 440мм 24мод	шт	1	<u>4284,10</u>	-	4284	-	-	-	-
136	С1110-100 вариант 1	Viking Шина мед.плоск.18x4мм	шт	1	<u>4284,10</u>	-	4284	-	-	-	-
137	С1110-100 вариант 2	Подставка DPX3 160/250 иDPX-IS 250 - 20 мод	шт	2	<u>795,70</u>	-	1591	-	-	-	-
138	M8-526-3	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 250 А	шт	4	<u>1484,18</u> 854,66	<u>38,21</u> 12,15	5937	3419	<u>153</u> 49	<u>3,2</u> 0,0421	<u>12,8</u> 0,17
139	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	4	<u>5983,15</u>	-	23933	-	-	-	-
140	M8-526-1	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 25 А	шт	5	<u>753,18</u> 427,33	<u>38,21</u> 12,15	3766	2137	<u>191</u> 61	<u>1,6</u> 0,0421	<u>8</u> 0,21
141	1504-1401 вариант 10	Авт.Выкл.Дх3 3п С6а 10ка	шт	1	<u>1039,21</u>	-	1039	-	-	-	-
142	1504-1401 вариант 11	Авт.Выкл.Дх3 3п С10а 10ка	шт	2	<u>1039,21</u>	-	2078	-	-	-	-
143	1504-1401 вариант 12	АВТ.ВЫКЛ.DPX3 160 3P 25A 16kA	шт	2	<u>1039,21</u>	-	2078	-	-	-	-
144	M8-526-2	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 100 А	шт	1	<u>1293,83</u> 747,82	<u>38,21</u> 12,15	1294	748	<u>38</u> 12	<u>2,8</u> 0,0421	<u>2,8</u> 0,04
145	1504-1399 вариант 6	Авт.Выкл.Дх3 3п С40а 10ка	шт	1	<u>5559,13</u>	-	5559	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
146	M8-526-3	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 250 А	шт	2	<u>1484,18</u> 854,66	<u>38,21</u> 12,15	2968	1709	<u>76</u> 24	<u>3,2</u> 0,0421	<u>6,4</u> 0,08
147	1504-1401 вариант 13	АВТ.ВЫКЛ.DPX3 160 3P 160A 16kA	шт	1	<u>13270,00</u> -	-	13270	-	-	-	-
148	1504-1401 вариант 14	АВТ.ВЫКЛ.DPX3 250 3P 200A 25kA	шт	1	<u>15270,00</u> -	-	15270	-	-	-	-
149	& C1111-8-2 вариант 8	Пластина для рейки DPX3 160	шт	4	<u>826,23</u> -	-	3305	-	-	-	-
150	& C1111-8-2 вариант 9	Пластина для рейки DPX3 250	шт	1	<u>826,23</u> -	-	826	-	-	-	-
151	1504-1401 вариант 9	Выключатель автоматический, номинальный ток 25А, число полюсов 3, номинальный ток расцепителя 0,3-16,0 А АЕ2023-10	шт	1	<u>1239,21</u> -	-	1239	-	-	-	-
152	M8-526-2	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 100 А	шт	1	<u>1293,83</u> 747,82	<u>38,21</u> 12,15	1294	748	<u>38</u> 12	<u>2,8</u> 0,0421	<u>2,8</u> 0,04
153	M8-575-1	Установка приборов или аппаратов, снятых перед транспортировкой	шт	1	<u>447,59</u> 440,40	<u>5,49</u> 3,29	448	440	<u>5</u> 3	<u>1,6</u> 0,0126	<u>1,6</u> 0,01
154	1504-15411 вариант 1	Компенсаторы реактивной мощности АУКРМ-0,4 ЦР-1	шт	1	<u>36404,00</u> -	-	36404	-	-	-	-
155	M8-572-6	Блок управления шкафного исполнения или распределительный пункт [шкаф], устанавливаемый на полу, высота и ширина до 1200x1000 мм	шт	1	<u>5764,31</u> 1321,20	<u>751,88</u> 366,68	5764	1321	<u>752</u> 367	<u>4,8</u> 1,2027	<u>4,8</u> 1,2
156	1517-1980-7 вариант 49	Щит распределительный 1550x660x800	шт	1	<u>15891,38</u> -	-	15891	-	-	-	-
157	M8-526-3	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 250 А	шт	3	<u>1484,18</u> 854,66	<u>38,21</u> 12,15	4453	2564	<u>115</u> 36	<u>3,2</u> 0,0421	<u>9,6</u> 0,13
158	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	1	<u>5983,15</u> -	-	5983	-	-	-	-
159	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	2	<u>5983,15</u> -	-	11966	-	-	-	-
160	& C1111-8-2 вариант 1	Заглушка 24 модуля	шт	2	<u>489,63</u> -	-	979	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
161	& С1111-8-2 вариант 2	Замок Тип 405	шт	1	<u>1346,43</u>	-	1346	-	-	-	-
162	1517-1980-7 вариант 43	XL3 800 Щит 1995x700x225	шт	1	<u>36512,10</u>	-	36512	-	-	-	-
163	1517-1980-7 вариант 45	XL3 800 Устр. фиксации24м.	шт	7	<u>2240,10</u>	-	15681	-	-	-	-
164	1517-1980-7 вариант 44	XL3 800 Бок.пан.д.щит1995мм	шт	1	<u>4688,10</u>	-	4688	-	-	-	-
165	& С1111-8-2 вариант 3	ПЛАСТИНАДРХ3 160/250 С/БЕЗ ДИФ	шт	1	<u>2802,99</u>	-	2803	-	-	-	-
166	& С1111-8-2 вариант 5	XL3 800 Л.п.на винтах 24м в.50	шт	1	<u>1406,41</u>	-	1406	-	-	-	-
167	& С1111-8-2 вариант 12	XL3 800 Л.п.на винтах 24м в 300	шт	1	<u>4284,03</u>	-	4284	-	-	-	-
168	& С1111-8-2 вариант 13	XL3800Дв.д/щит мет700X1950IP55	шт	1	<u>13953,63</u>	-	13954	-	-	-	-
169	С1110-100 вариант 3	Комплект для заземления	шт	1	<u>16524,10</u>	-	16524	-	-	-	-
170	С1110-100 вариант 1	Viking Шина мед.плоск.18x4мм	шт	2	<u>4284,10</u>	-	8568	-	-	-	-
171	С1110-100 вариант 2	Подставка ДРХ3 160/250 иДРХ-IS 250 - 20 мод	шт	1	<u>795,70</u>	-	796	-	-	-	-
172	M8-526-1	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 25 А	шт	59	<u>753,18</u> 427,33	<u>38,21</u> 12,15	44438	25212	<u>2254</u> 717	1,6 0,0421	<u>94,4</u> 2,48
173	1504-1401 вариант 15	Авт.Выкл.Дх3 3п С1а 10ка	шт	7	<u>7086,00</u>	-	49602	-	-	-	-
174	1504-1401 вариант 16	Авт.Выкл.Дх3 3п С2а 10ка	шт	3	<u>7086,00</u>	-	21258	-	-	-	-
175	1504-1401 вариант 17	Авт.Выкл.Дх3 3п С4а 10ка	шт	26	<u>7086,00</u>	-	184236	-	-	-	-
176	1504-1401 вариант 21	Авдт Дх3 1п+Н С6а 30та-Ас	шт	3	<u>3235,00</u>	-	9705	-	-	-	-
177	1504-1401 вариант 10	Авт.Выкл.Дх3 3п С6а 10ка	шт	14	<u>1039,21</u>	-	14549	-	-	-	-
178	1504-1401 вариант 11	Авт.Выкл.Дх3 3п С10а 10ка	шт	2	<u>1039,21</u>	-	2078	-	-	-	-
179	1504-1401 вариант 18	Авт.Выкл.Дх3 3п С16а 10ка	шт	1	<u>5897,00</u>	-	5897	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
180	1504-1401 вариант 19	Авт.Выкл.Дх3 3п С20а 10ка	шт	5	<u>6782,00</u>	-	33910	-	-	-	-
181	M8-526-2	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 100 А	шт	2	<u>1293,83</u> 747,82	<u>38,21</u> 12,15	2588	1496	<u>76</u> 24	<u>2,8</u> 0,0421	<u>5,6</u> 0,08
182	1504-1401 вариант 20	Авт.Выкл.Дх3 3п С40а 10ка	шт	2	<u>7678,00</u>	-	15356	-	-	-	-
183	M8-526-3	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 250 А	шт	1	<u>1484,18</u> 854,66	<u>38,21</u> 12,15	1484	855	<u>38</u> 12	<u>3,2</u> 0,0421	<u>3,2</u> 0,04
184	1504-1401 вариант 22	Выключатель без расцепителя - DPX?-I 250 - 3П - 250 А	шт	1	<u>23605,00</u>	-	23605	-	-	-	-
185	& С1111-8-2 вариант 9	Пластина для рейки DPX3 250	шт	1	<u>826,23</u>	-	826	-	-	-	-
186	M11-96-1	Установка съемных и выдвижных блоков [модулей, ячеек, ТЭЗов], масса до 5 кг	шт	1	<u>418,13</u> 412,64	<u>5,49</u> 3,29	418	413	<u>5</u> 3	<u>1,6</u> 0,0126	<u>1,6</u> 0,01
187	1504-13247 вариант 1	Блок питания 24 В, 30 Вт	шт	1	<u>5322,88</u>	-	5323	-	-	-	-
188	M8-573-4	ЩР-2 Щкаф [пульт] управления навесной, высота, ширина и глубина до 600x600x350 мм	шт	1	<u>1556,05</u> 880,80	<u>206,55</u> 89,25	1556	881	<u>207</u> 89	<u>3,2</u> 0,2946	<u>3,2</u> 0,29
189	& С1111-8-2 вариант 16	Щиток Ip65; 3x12 Мод. с N+Pe	шт	1	<u>13953,63</u>	-	13954	-	-	-	-
190	& С1111-8-2 вариант 1	Заглушка 24 модуля	шт	1	<u>489,63</u>	-	490	-	-	-	-
191	& С1111-8-2 вариант 14	XL3 125 Замок к ключу №850	шт	1	<u>489,63</u>	-	490	-	-	-	-
192	M8-526-2	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 100 А	шт	1	<u>1293,83</u> 747,82	<u>38,21</u> 12,15	1294	748	<u>38</u> 12	<u>2,8</u> 0,0421	<u>2,8</u> 0,04
193	1504-1401 вариант 42	распред. блок 4пх13 конт.номинальный ток 40А,	шт	1	<u>2448,03</u>	-	2448	-	-	-	-
194	M8-526-1	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 25 А	шт	8	<u>753,18</u> 427,33	<u>38,21</u> 12,15	6025	3419	<u>306</u> 97	<u>1,6</u> 0,0421	<u>12,8</u> 0,34
195	1504-1401 вариант 15	Авт.Выкл.Дх3 3п С1а 10ка	шт	2	<u>7086,00</u>	-	14172	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
196	1504-1401 вариант 16	Авт.Выкл.Дх3 3п С2а 10ка	шт	1	<u>7086,00</u>	-	7086	-	-	-	-
197	1504-1401 вариант 17	Авт.Выкл.Дх3 3п С4а 10ка	шт	1	<u>7086,00</u>	-	7086	-	-	-	-
198	1504-1401 вариант 21	Авдт Дх3 1п+Н С6а 30та-Ас	шт	2	<u>3235,00</u>	-	6470	-	-	-	-
199	1504-1401 вариант 11	Авт.Выкл.Дх3 3п С10а 10ка	шт	1	<u>1039,21</u>	-	1039	-	-	-	-
200	1504-1401 вариант 19	Авт.Выкл.Дх3 3п С20а 10ка	шт	1	<u>6782,00</u>	-	6782	-	-	-	-
201	M8-573-4	ЩП -3 Щкаф [пульт] управления навесной, высота, ширина и глубина до 600x600x350 мм	шт	1	<u>1556,05</u>	<u>206,55</u>	1556	881	<u>207</u>	<u>3,2</u>	<u>3,2</u>
202	& С1111-8-2 вариант 16	Щиток Ip65; 3x12 Мод. с N+Pe	шт	1	<u>880,80</u>	<u>89,25</u>	13954	-	<u>89</u>	<u>0,2946</u>	<u>0,29</u>
203	& С1111-8-2 вариант 17	Кабельный ввод пластик IP 68 серый RAL 7035 PG 21	шт	9	<u>4161,63</u>	-	37455	-	-	-	-
204	& С1111-8-2 вариант 18	Гайка пластик серый RAL 7035 PG 21	шт	9	<u>41,65</u>	-	375	-	-	-	-
205	& С1111-8-2 вариант 1	Заглушка 24 модуля	шт	1	<u>489,63</u>	-	490	-	-	-	-
206	& С1111-8-2 вариант 14	XL3 125 Замок к ключу №850	шт	1	<u>489,63</u>	-	490	-	-	-	-
207	M8-526-1	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 25 А	шт	9	<u>753,18</u>	<u>38,21</u>	6779	3846	<u>344</u>	<u>1,6</u>	<u>14,4</u>
208	1504-1401 вариант 15	Авт.Выкл.Дх3 3п С1а 10ка	шт	2	<u>427,33</u>	<u>12,15</u>	14172	-	<u>109</u>	<u>0,0421</u>	<u>0,38</u>
209	1504-1401 вариант 16	Авт.Выкл.Дх3 3п С2а 10ка	шт	4	<u>7086,00</u>	-	28344	-	-	-	-
210	1504-1401 вариант 10	Авт.Выкл.Дх3 3п С6а 10ка	шт	1	<u>1039,21</u>	-	1039	-	-	-	-
211	1504-1401 вариант 18	Авт.Выкл.Дх3 3п С16а 10ка	шт	1	<u>5897,00</u>	-	5897	-	-	-	-
212	1504-1401 вариант 24	Выключатель-Разъедин.3п 20а 2м	шт	1	<u>3820,00</u>	-	3820	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
213	M8-573-1	Пульт управления 1ПУ1, 1ПУ2, 1ПУ3 Пульт управления напольный высотой до 1200 мм, глубиной и шириной по фронту до 700х600 мм	шт	1	<u>4208,70</u> 880,80	<u>623,40</u> 299,89	4209	881	<u>623</u> 300	<u>3,2</u> 0,9843	<u>3,2</u> 0,98
214	& C1111-8-2 вариант 1	Заглушка 24 модуля	шт	4	<u>489,63</u> -	-	1959	-	-	-	-
215	& C1111-8-2 вариант 2	Замок Тип 405	шт	2	<u>1346,43</u> -	-	2693	-	-	-	-
216	& C1111-8-2 вариант 19	XL3 400 Шк. монобл. IP55 в.800	шт	2	<u>1836,03</u> -	-	3672	-	-	-	-
217	& C1111-8-2 вариант 20	XL3 400 Рейка сталь ш.515	шт	7	<u>1836,03</u> -	-	12852	-	-	-	-
218	& C1111-8-2 вариант 21	Рейка универсальная	шт	2	<u>1836,03</u> -	-	3672	-	-	-	-
219	& C1111-8-2 вариант 22	XL3400Л.п.150мм мет.д.шк./щит	шт	6	<u>1836,03</u> -	-	11016	-	-	-	-
220	& C1111-8-2 вариант 23	Металлическая лицевая панель выс. 150 мм	шт	2	<u>1836,03</u> -	-	3672	-	-	-	-
221	& C1111-8-2 вариант 24	Металлическая лицевая панель выс. 200 мм	шт	2	<u>3060,03</u> -	-	6120	-	-	-	-
222	C1110-100 вариант 3	Комплект для заземления	шт	2	<u>16524,10</u> -	-	33048	-	-	-	-
223	C1110-100 вариант 4	Шина Земли 440мм 24мод	шт	2	<u>4284,10</u> -	-	8568	-	-	-	-
224	M8-526-1	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 25 А	шт	10	<u>753,18</u> 427,33	<u>38,21</u> 12,15	7532	4273	<u>382</u> 122	<u>1,6</u> 0,0421	<u>16</u> 0,42
225	1504-1401 вариант 15	Авт.Выкл.Дх3 3п С1а 10ка	шт	4	<u>7086,00</u> -	-	28344	-	-	-	-
226	1504-1401 вариант 25	Авт.Выкл.Дх3 3п С3а 10ка	шт	4	<u>7086,00</u> -	-	28344	-	-	-	-
227	1504-1401 вариант 24	Выключатель-Разъедин.3п 20а 2м	шт	2	<u>3820,00</u> -	-	7640	-	-	-	-
228	M8-81-1	Аппарат управления и сигнализации, количество подключаемых концов до 2	шт	6	<u>513,84</u> 427,33	<u>82,43</u> 42,01	3083	2564	<u>495</u> 252	<u>1,6</u> 0,1375	<u>9,6</u> 0,83
229	C1547-1 вариант 1	Лампа AD22DS(LED)матрица d=22мм зеленый 24В AC/DC	шт	2	<u>244,89</u> -	-	490	-	-	-	-
230	C1547-1 вариант 2	Лампа AD22DS(LED)матрица d=22мм красный 24В AC/DC	шт	4	<u>244,89</u> -	-	980	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
231	1504-1401 вариант 26	Клемм.син.1x6-25+16x1.5-16мм2	шт	4	<u>683,00</u>	-	2732	-	-	-	-
232	M8-81-2	Аппарат управления и сигнализации, количество подключаемых концов до 6	шт	4	<u>514,56</u>	<u>82,43</u>	2058	1709	<u>330</u>	<u>1,6</u>	<u>6,4</u>
		Программируемое реле, 24VDC, 16Д, 8ДА, 16Р	шт	2	<u>9500,00</u>	-	19000	-	-	-	-
233	1504-1401 вариант 27	Информационная программируемая панель оператора	шт	2	<u>5400,00</u>	-	10800	-	-	-	-
234	1504-1401 вариант 28	Кабель MicroUSB-USB	шт	1	<u>400,00</u>	-	400	-	-	-	-
235	1504-1401 вариант 29	Модуль расширения, 24VDC, 8xDI(24), 8xDO(P)	шт	1	<u>489,65</u>	-	490	-	-	-	-
236	1504-1401 вариант 1	Плата с реле с включением разъемов жестко закрепленных	плата	54	<u>129,91</u>	<u>16,36</u>	7015	6132	<u>883</u>	<u>0,48</u>	<u>25,92</u>
237	M10-1-8	Промежуточные реле KIPPRIBOR	шт	54	<u>240,00</u>	-	12960	-	-	-	-
238	1504-1401 вариант 30	Монтажная колодка с винтовыми клеммами для реле серии SR с катушкой 24 VDC	шт	54	<u>258,00</u>	-	13932	-	-	-	-
239	1504-1401 вариант 31	Установка съемных и выдвижных блоков [модулей, ячеек, ТЭЗов], масса до 5 кг	шт	4	<u>418,13</u>	<u>5,49</u>	1673	1651	<u>22</u>	<u>1,6</u>	<u>6,4</u>
240	M11-96-1	Блок питания 24В 60 Вт	шт	4	<u>412,64</u>	<u>3,29</u>			<u>13</u>	<u>0,0126</u>	<u>0,05</u>
241	1504-13247 вариант 2	Кабель для интерфейса RS-485, ТУ 3574- 015-39793330-2009	1000м	0,006	<u>6322,88</u>	-	25292	-	-	-	-
242	C157-245 вариант 2	Клемма винтовая проходная, 2.5 мм2, серая, синяя, красная	шт	130	<u>159122,24</u>	-	955	-	-	-	-
243	1504-1401 вариант 32	Блок перемычек на 10 контактов, 2.5 мм?	шт	40	<u>40,00</u>	-	5200	-	-	-	-
244	1504-1401 вариант 33	Маркировка винтовых клемм, 2.5мм2, (пустая) (упаковка)	шт	3	<u>1849,00</u>	-	73960	-	-	-	-
245	1504-1401 вариант 34	Заглушка для одноуровневых винтовых клемм, серая	шт	10	<u>400,00</u>	-	1200	-	-	-	-
246	1504-1401 вариант 35	Профиль перфорированный монтажный длиной 2 м	шт	10	<u>100,00</u>	-	1000	-	-	-	-
247	M8-397-1	Кабель-канал перфорированный 40x60	шт	6	<u>14765,34</u>	<u>4953,74</u>	1772	451	<u>594</u>	<u>14,4</u>	<u>1,73</u>
248	1504-1401 вариант 36	Провод сечением до 6 мм2, прокладываемый по перфорированным профилям	100 м	0,12	<u>3756,96</u>	<u>2006,16</u>			<u>241</u>	<u>7,4616</u>	<u>0,9</u>
249	M8-400-1		шт	6	<u>500,00</u>	-	3000	-	-	-	-
			100 м	3	<u>4423,03</u>	<u>2716,55</u>	13269	5009	<u>8150</u>	<u>6,4</u>	<u>19,2</u>
					<u>1669,76</u>	<u>1080,97</u>			<u>3243</u>	<u>4,1338</u>	<u>12,4</u>

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
250	C157-245 вариант 3	Провод монтажный для электрических установок на напряжение до 450/750 В. ТУ 16-705.502-2011. ГОСТ 31947-2012 ПуВнг(А)-LS 1,5 Пульт управления 1ПУ4	1000м	0,3	<u>13240,29</u> -	- -	3972	-	- -	- -	- -
251	M8-573-1	Пульт управления напольный высотой до 1200 мм, глубиной и шириной по фронту до 700х600 мм	шт	1	<u>4208,70</u> 880,80	<u>623,40</u> 299,89	4209	881	<u>623</u> 300	<u>3,2</u> 0,9843	<u>3,2</u> 0,98
252	1517-1980-7 вариант 46	Щиток Рлехо 3 IP65; 2x12 Мод. с N+Pe	шт	1	<u>12219,38</u> -	- -	12219	-	- -	- -	- -
253	& C1111-8-2 вариант 25	Заглушка 5 мод	шт	1	<u>489,63</u> -	- -	490	-	- -	- -	- -
254	& C1111-8-2 вариант 14	XL3 125 Замок к ключу №850	шт	1	<u>489,63</u> -	- -	490	-	- -	- -	- -
255	M8-526-1	Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 25 А	шт	1	<u>753,18</u> 427,33	<u>38,21</u> 12,15	753	427	<u>38</u> 12	<u>1,6</u> 0,0421	<u>1,6</u> 0,04
256	1504-1401 вариант 15	Авт.Выкл.Дх3 3п С1а 10ка	шт	1	<u>7086,00</u> -	- -	7086	-	- -	- -	- -
257	M8-538-4	Выключатель путевой или конечный контактный, малогабаритный, одно-, двухкнопочный или микропереключатель, устанавливаемый на металлическом основании	шт	1	<u>317,20</u> 256,40	<u>7,00</u> 1,03	317	256	<u>7</u> 1	<u>0,96</u> 0,0041	<u>0,96</u> -
258	1504-1401 вариант 37	Переключатель - 1П - 250 В~ - 20 А	шт	1	<u>1039,21</u> -	- -	1039	-	- -	- -	- -
259	M8-81-1	Аппарат управления и сигнализации, количество подключаемых концов до 2	шт	1	<u>513,84</u> 427,33	<u>82,43</u> 42,01	514	427	<u>82</u> 42	<u>1,6</u> 0,1375	<u>1,6</u> 0,14
260	C1547-1 вариант 2	Лампа AD22DS(LED)матрица d=22мм красный 24В AC/DC	шт	1	<u>244,89</u> -	- -	245	-	- -	- -	- -
261	1504-1401 вариант 26	Клемм.син.1x6-25+16x1.5-16мм2	шт	2	<u>683,00</u> -	- -	1366	-	- -	- -	- -
262	M10-1-8	Плата с реле с включением разъемов жестко закрепленных	плата	2	<u>129,91</u> 113,55	<u>16,36</u> 7,42	260	227	<u>33</u> 15	<u>0,48</u> 0,0278	<u>0,96</u> 0,06
263	1504-1401 вариант 1	Модуль расширения, 24VDC, 8xDI(24), 8xDO(P)	шт	2	<u>489,65</u> -	- -	979	-	- -	- -	- -
264	1504-1401 вариант 31	Монтажная колодка с винтовыми клеммами для реле серии SR с катушкой 24 VDC	шт	2	<u>258,00</u> -	- -	516	-	- -	- -	- -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
265	M8-526-3	Оборудование Выключатель автоматический [автомат] одно-, двух-, трехполюсный, устанавливаемый на конструкции на стене или колонне, ток до 250 А	шт	41	<u>1484,18</u> 854,66	<u>38,21</u> 12,15	60851	35041	<u>1567</u> 498	<u>3,2</u> 0,0421	<u>131,2</u> 1,73
266	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	1	<u>5983,15</u> -	-	5983	-	-	-	-
267	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	4	<u>5983,15</u> -	-	23933	-	-	-	-
268	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	4	<u>5983,15</u> -	-	23933	-	-	-	-
269	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	1	<u>5983,15</u> -	-	5983	-	-	-	-
270	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	3	<u>5983,15</u> -	-	17949	-	-	-	-
271	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	7	<u>5983,15</u> -	-	41882	-	-	-	-
272	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	2	<u>5983,15</u> -	-	11966	-	-	-	-
273	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	18	<u>5983,15</u> -	-	107697	-	-	-	-
274	1517-1980-7 вариант 1	Блок распределительный 1П 250А 11конт	шт	1	<u>5983,15</u> -	-	5983	-	-	-	-
275	M11-31-1	Приборы, устанавливаемые на конструкциях, масса до 5 кг	шт	41	<u>246,80</u> 220,20	-	10119	9028	-	<u>0,8</u> -	<u>32,8</u> -
276	1504-1396 вариант 1	Поплавковый выключатель	шт	41	<u>13321,00</u> -	-	546161	-	-	-	-
277	M8-538-4	Выключатель путевой или конечный контактный, малогабаритный, одно-, двухкнопочный или микропереключатель, устанавливаемый на металлическом основании	шт	1	<u>317,20</u> 256,40	<u>7,00</u> 1,03	317	256	<u>7</u> 1	<u>0,96</u> 0,0041	<u>0,96</u> -
278	1504-1401 вариант 37	Переключатель - 1П - 250 В~ - 20 А	шт	1	<u>1039,21</u> -	-	1039	-	-	-	-
279	1504-1401 вариант 38	Корпус поста КП101	шт	1	<u>1039,21</u> -	-	1039	-	-	-	-
280	M8-594-1	Светильник с люминесцентными лампами, отдельно устанавливаемый, на штырях, количество ламп в светильнике 1	100 шт	0,34	<u>84939,27</u> 55930,80	<u>20324,96</u> 15942,21	28879	19016	<u>6910</u> 5420	<u>203,2</u> 58,7929	<u>69,09</u> 19,99
281	C1547-4 вариант 19	Светодиодный светильник LED ДСП 1200, 3500лм, 40Вт, 6000К, IP65	шт	18	<u>1932,01</u> -	-	34776	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
282	C1547-4 вариант 20	Светодиодный светильник ARCTIC STANDARD 1200 TH EM 4000K, 36Вт, IP65, с блоком аварийного питания	шт	8	<u>1932,01</u>	-	15456	-	-	-	-
283	C1547-4 вариант 18	Светодиодный светильник LED ДПП 2901, 8Вт, 700 лм, 4000К, IP65, белый,, круг. 160_48 мм, с датчиком	шт	2	<u>1932,01</u>	-	3864	-	-	-	-
284	C1547-4 вариант 22	Светодиодный светильник LED ДПП 3901, 18Вт, 1600 лм, 6500К, IP65	шт	6	<u>1197,61</u>	-	7186	-	-	-	-
285	M8-593-11	Световой настенный указатель с лампами накаливания	100 шт	0,02	<u>40402,03</u>	<u>3207,47</u>	808	722	<u>64</u>	<u>131,2</u>	<u>2,62</u>
286	C1547-4 вариант 21	Светильник аварийный эвакуационный светодиодный ССА1-01, 1 Вт, 1,5 ч., "ВЫХОД"	шт	2	<u>708,01</u>	-	1416	-	-	-	-
287	C1547-4 вариант 17	Переносной светильник LED СРП-01 1000 LUM 12/24 В АС, 10Вт, 10м	шт	3	<u>708,01</u>	-	2124	-	-	-	-
288	M8-603-1	Монтаж ящика с понижающим трансформатором	шт	2	<u>696,58</u>	<u>37,80</u>	1393	1084	<u>76</u>	<u>1,97</u>	<u>3,94</u>
289	1517-2346	Ящик с понижающим трансформатором 282x205x130мм ЯТП-0,25	шт	2	<u>1552,84</u>	-	3106	-	-	-	-
290	1504-17151 вариант 2	Распаячная коробка ОП 100x100x55мм, крышка, IP54, 8вх.	шт	34	<u>59,59</u>	-	2026	-	-	-	-
291	1504-17151 вариант 3	Соединительная клемма СК-415 (2,5мм2)	шт	111	<u>25,00</u>	-	2775	-	-	-	-
292	M8-591-1	Выключатель одноклавишный неутропленного типа при открытой проводке	100 шт	0,12	<u>16121,05</u>	<u>204,20</u>	1935	1744	<u>25</u>	<u>52,8</u>	<u>6,34</u>
293	290902-55 вариант 3	Выключатель 1-кл. открытой установки IP54 10А "Вуокса"	шт	12	<u>254,44</u>	-	3053	-	-	-	-
294	M8-591-8	Розетка штепсельная неутропленного типа при открытой проводке	100 шт	0,04	<u>17442,25</u>	<u>204,20</u>	698	634	<u>8</u>	<u>57,6</u>	<u>2,3</u>
295	1504-17120 вариант 2	Розетка 2П+3 открытой установки IP54 16А "Вуокса"	шт	4	<u>223,65</u>	-	895	-	-	-	-
296	1517-1556 вариант 1	Коробка уравнивания потенциалов	шт	3	<u>75,00</u>	-	225	-	-	-	-
297	1517-1556 вариант 2	Ответвительная коробка	шт	10	<u>75,00</u>	-	750	-	-	-	-
298	1517-1556 вариант 3	Съемный кабельный сальник	шт	28	<u>75,00</u>	-	2100	-	-	-	-
299	1517-1556 вариант 4	Зажим контактный винтовой ЗВИ-3 1,0-2, 5мм2	шт	6	<u>75,00</u>	-	450	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
300	M8-395-2	Лоток металлический штампованный по установленным конструкциям, ширина лотка до 400 мм	100 м	1,26	<u>20772,04</u> 12296,22	<u>7725,06</u> 3145,50	26173	15493	<u>9734</u> 3963	<u>47,13</u> 11,7107	<u>59,38</u> 14,76
301	2405-1470 вариант 1	Лоток проволочный, гальванически оцинкованная сталь, 80x500x3000	1м	21	<u>624,46</u> -	- -	13114	-	- -	- -	- -
302	2405-1470 вариант 4	Крышка лотка прямая, сталь оцинкованная, осн. 500мм, L=3000	1м	21	<u>1839,83</u> -	- -	38636	-	- -	- -	- -
303	2405-1470 вариант 2	Лоток проволочный, гальванически оцинкованная сталь, 80x300x3000	1м	33	<u>624,46</u> -	- -	20607	-	- -	- -	- -
304	2405-1470 вариант 5	Крышка лотка прямая, сталь оцинкованная, осн. 300мм, L=3000	1м	33	<u>837,37</u> -	- -	27633	-	- -	- -	- -
305	2405-1470 вариант 3	Лоток проволочный, гальванически оцинкованная сталь, 30x100x3000	1м	72	<u>624,46</u> -	- -	44961	-	- -	- -	- -
306	2405-1470 вариант 6	Крышка лотка прямая, сталь оцинкованная, осн. 100мм, L=3000	1м	72	<u>361,64</u> -	- -	26038	-	- -	- -	- -
307	2405-1470 вариант 7	Перегородка лотка SEP, сталь оцинкованная, H=80, L=3000	1м	30	<u>540,96</u> -	- -	16229	-	- -	- -	- -
308	1504-17151 вариант 4	Консоль усиленная LP на лоток с осн.500 , сталь оцинк.	шт	54	<u>1332,00</u> -	- -	71928	-	- -	- -	- -
309	1504-17151 вариант 5	Скоба ТМ для лотка с основ. 500 мм, сталь оцинк.	шт	16	<u>986,00</u> -	- -	15776	-	- -	- -	- -
310	1504-17151 вариант 6	Держатель для крышки на пров. лоток, полипропилен	шт	200	<u>30,00</u> -	- -	6000	-	- -	- -	- -
311	1504-17151 вариант 7	Гайка с насечкой, препятствующей откручиванию, гальв. оцинкованная сталь, М6	шт	440	<u>30,00</u> -	- -	13200	-	- -	- -	- -
312	1504-17151 вариант 8	Винт для монтажа проволочных лотков М6x20	шт	220	<u>30,00</u> -	- -	6600	-	- -	- -	- -
313	1504-17151 вариант 9	Шайба для соединения проволочного лотка	шт	220	<u>10,00</u> -	- -	2200	-	- -	- -	- -
314	1504-17151 вариант 10	Усиленный анкер с болтом М10	шт	130	<u>30,00</u> -	- -	3900	-	- -	- -	- -
315	1504-17151 вариант 11	Винт для обеспечения электрического контакта крышек, гальв. оцинкованная сталь, М5x8	шт	50	<u>30,00</u> -	- -	1500	-	- -	- -	- -
316	1504-17151 вариант 12	Комплект крепежный для проволочного лотка №1	шт	169	<u>30,00</u> -	- -	5070	-	- -	- -	- -
317	1504-17151 вариант 13	С-образный профиль 41x41, L400, толщ.2,5 мм	шт	54	<u>30,00</u> -	- -	1620	-	- -	- -	- -
318	1504-17151 вариант 14	Винт для крепления к С-образному профилю М10x30	шт	120	<u>20,00</u> -	- -	2400	-	- -	- -	- -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
319	1504-17151 вариант 15	Гайка с насечкой, препятствующей откручиванию М10	шт	120	<u>10,00</u>	-	1200	-	-	-	-
320	1504-17151 вариант 16	Клемма заземления для проволочного лотка	шт	70	<u>10,00</u>	-	700	-	-	-	-
321	1504-17151 вариант 17	Ограничитель радиуса изгиба кабеля	шт	100	<u>10,00</u>	-	1000	-	-	-	-
322	1504-17151 вариант 18	Скоба ТМ для лотка с основ. 100 мм, сталь оцинк. по методу Сендзимира	шт	80	<u>10,00</u>	-	800	-	-	-	-
323	1504-17151 вариант 6	Держатель для крышки на пров. лоток, полипропилен	шт	140	<u>30,00</u>	-	4200	-	-	-	-
324	1504-17151 вариант 19	Стандартный анкер с болтом М8	шт	200	<u>30,00</u>	-	6000	-	-	-	-
Итого прямые затраты по разделу 6							3319150	167781	<u>37238</u> 17568		<u>630,6</u> 63,91
Итого оборудование, руб.							2273367				
Транспортные и заготовительно-складские затраты, руб.							89187				
Всего оборудование, руб.							2362554				
Итого строительные работы, руб.							1045783				
в том числе:											
стоимость материалов, изделий и конструкций, руб.							840764				
всега заработная плата, руб.							185349				
Общепроизводственные расходы, руб.							104656				
трудоёмкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч							65,32				
заработная плата в общепроизводственных расходах, руб.							27032				
Всего строительные работы, руб.							1150439				

-											
Всего по разделу 6							3512993				
Раздел 7. Внутренние сети											
325	M8-409-1	Труба винилпластовая по стенам и колоннам с креплением накладными скобами, диаметр до 25 мм	100 м	3,31	<u>34096,88</u> 10140,15	<u>19905,87</u> 7843,17	112861	33564	<u>65888</u> 25961	<u>42,33</u> 29,9834	<u>140,11</u> 99,25
326	C113-1673 вариант 1	Трубы гофрированные. диам. 20x1,9 мм	м	331	<u>56,82</u>	-	18807	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
327	C113-6 вариант 1	Трубы стальные сварные водогазопроводные с резьбой, черные легкие неоцинкованные, диаметр условного прохода 50 мм, толщина стенки 3 мм	м	9	<u>295,96</u> -	- -	2664	-	- -	- -	- -
328	M8-409-2	Труба винилпластовая по стенам и колоннам с креплением накладными скобами, диаметр до 50 мм	100 м	0,26	<u>44827,13</u> 11450,49	<u>29827,76</u> 11818,69	11655	2977	<u>7755</u> 3073	<u>47,8</u> 45,0698	<u>12,43</u> 11,72
329	C113-1354 вариант 5	Трубы гофрированные, наружный диаметр 32x3 мм	м	26	<u>134,91</u> -	- -	3508	-	- -	- -	- -
330	C1545-239 вариант 1	Крепеж-клипса для трубы 20мм	100шт	6,62	<u>623,41</u> -	- -	4127	-	- -	- -	- -
331	C1545-239 вариант 2	Крепеж-клипса для трубы 32мм	100шт	0,52	<u>745,69</u> -	- -	388	-	- -	- -	- -
332	M8-412-3	Провод первый одножильный или многожильный в общей оплетке в положенных трубах или металлорукавах, суммарное сечение до 16 мм ²	100 м	3,57	<u>3284,96</u> 2922,08	<u>98,92</u> 50,41	11727	10432	<u>353</u> 180	<u>11,2</u> 0,165	<u>39,98</u> 0,59
333	M8-147-1	Кабель до 35 кВ, прокладываемый по установленным конструкциям и лоткам с креплением на поворотах и в конце трассы, масса 1 м до 1 кг	100 м	24,09	<u>6934,08</u> 4174,40	<u>1451,86</u> 628,51	167042	100561	<u>34975</u> 15141	<u>16</u> 2,2584	<u>385,44</u> 54,4
334	C153-361 вариант 15	Кабель силовой с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных композиций пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К71-310- 2001, ГОСТ 31565-2012, марка ВВГнг(A)-LS 5x2,5	1000м	0,49	<u>180295,78</u> -	- -	88345	-	- -	- -	- -
335	C153-361 вариант 16	Кабель силовой с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных композиций пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К71-310- 2001, ГОСТ 31565-2012, марка ВВГнг(A)-LS 5x1,5	1000м	0,286	<u>117259,78</u> -	- -	33536	-	- -	- -	- -
336	C153-361 вариант 17	Кабель силовой с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных композиций пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К71-310- 2001, ГОСТ 31565-2012, марка ВВГнг(A)-LS 4x4	1000м	0,006	<u>232634,02</u> -	- -	1396	-	- -	- -	- -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
337	C153-361 вариант 18	Кабель силовой с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных композиций пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К71-310- 2001, ГОСТ 31565-2012, марка ВВГнг(A)-LS 4x2,5	1000м	0,102	<u>146329,78</u>	-	14926	-	-	-	-
338	C153-361 вариант 19	Кабель силовой с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных композиций пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К71-310- 2001, ГОСТ 31565-2012, марка ВВГнг(A)-LS 4x1,5	1000м	0,161	<u>95362,42</u>	-	15353	-	-	-	-
339	C153-361 вариант 20	Кабель силовой с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных композиций пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К71-310- 2001, ГОСТ 31565-2012, марка ВВГнг(A)-LS 3x2,5	1000м	0,083	<u>104579,14</u>	-	8680	-	-	-	-
340	C153-361 вариант 2	Кабель силовой с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридных композиций пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К71-310- 2001, ГОСТ 31565-2012, марка ВВГнг(A)-LS 3x1,5	1000м	0,391	<u>91996,42</u>	-	35971	-	-	-	-
341	C153-361 вариант 3	Кабель контрольный, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К73 .079-2007, ГОСТ 1508-78, ГОСТ 31565-2012 КВБбШнг(A) 7x2, 5-0,66	1000м	0,243	<u>273980,74</u>	-	66577	-	-	-	-
342	C153-361 вариант 3	Кабель контрольный, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К73 .079-2007, ГОСТ 1508-78, ГОСТ 31565-2012 КВБбШнг(A) 7x2, 5-0,66	1000м	0,043	<u>273980,74</u>	-	11781	-	-	-	-
343	C153-361 вариант 21	Кабель контрольный, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К73 .079-2007, ГОСТ 1508-78, ГОСТ 31565-2012 КВБбШнг(A) 4x0, 75-0,66	1000м	0,505	<u>55154,02</u>	-	27853	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
344	C153-361 вариант 22	Кабель контрольный, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К73 .079-2007, ГОСТ 1508-78, ГОСТ 31565-2012 КВВГнг(A)-LS 10x0,75	1000м	0,159	<u>128594,02</u>	-	20446	-	-	-	-
345	C153-361 вариант 23	Кабель контрольный, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К73 .079-2007, ГОСТ 1508-78, ГОСТ 31565-2012 КВВГнг(A)-LS 14x0,75	1000м	0,007	<u>183674,02</u>	-	1286	-	-	-	-
346	C153-361 вариант 24	Кабель контрольный, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К73 .079-2007, ГОСТ 1508-78, ГОСТ 31565-2012 КВВГнг(A)-LS 27x0,75	1000м	0,186	<u>306074,02</u>	-	56930	-	-	-	-
347	C153-361 вариант 25	Кабель контрольный, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К73 .079-2007, ГОСТ 1508-78, ГОСТ 31565-2012 КВВГнг(A)-LS 7x0,75	1000м	0,014	<u>89426,02</u>	-	1252	-	-	-	-
348	C153-361 вариант 26	Кабель контрольный, с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката пониженной пожарной опасности. ТУ 16.К73 .079-2007, ГОСТ 1508-78, ГОСТ 31565-2012 КВВГнг(A)-LS 4x0,75	1000м	0,09	<u>64946,02</u>	-	5845	-	-	-	-
349	M8-403-2	Провод двух-, трехжильный в готовых каналах стен и перекрытий	100 м	2	<u>9597,07</u>	<u>4174,69</u>	19194	9965	<u>8349</u>	<u>20,8</u>	<u>41,6</u>
					4982,64	1661,06			3322	6,3525	12,71
350	C157-245 вариант 4	Провод силовой, желто-зеленый, многопроволочный ПуВнг, сечение 1,5 мм2	1000м	0,2	<u>13240,29</u>	-	2648	-	-	-	-
		Итого прямые затраты по разделу 7					744798	157499	<u>117320</u>		<u>619,56</u>
		Итого строительные работы, руб.					744798		47677		178,67
		в том числе:									
		стоимость материалов, изделий и конструкций, руб.					469979				
		всего заработная плата, руб.					205176				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Общепроизводственные расходы, руб. трудоёмкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч зарплата в общепроизводственных расходах, руб. Всего строительные работы, руб.					127368 77,43 32045 872166				
		----- -									
		Всего по разделу 7					872166				
		Итого прямые затраты по смете					24796775	2530413	649341		9571,06
		Итого оборудование, руб. Транспортные и заготовительно-складские затраты, руб. Всего оборудование, руб.					12136649 476519 12613168		257066		858,2
		Итого строительные работы, руб. в том числе: стоимость материалов, изделий и конструкций, руб. всего зарплата, руб.					12660126 9480372 2787479				
		Общепроизводственные расходы, руб. трудоёмкость в общепроизводственных расходах, чел.-ч зарплата в общепроизводственных расходах, руб. Всего строительные работы, руб.					1614225 900,54 372720 14274351				
		----- -									
		Всего по смете					26887519				
		Сметная трудоёмкость, чел.-ч					11329,8				
		Сметная зарплата, руб.					3160199				

Составил _____ Крысько А.А.
[должность, подпись (инициалы, фамилия)]

Проверил _____ Гладкая Е.Д.
[должность, подпись (инициалы, фамилия)]

Материалы внедрения технологии БОСЭБ

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
(Минстрой ДНР)

УТВЕРЖДАЮ:

Первый Заместитель Министра
строительства и жилищно-
коммунального хозяйства Донецкой
Народной Республики



Ю.А. Мерваезова

РЕШЕНИЕ

Научно-технического совета

от 14.10. 2022 г.

г. Донецк

№ 2

«О рассмотрении «Рекомендаций по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами», разработанных сотрудниками Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» к.т.н., доцентом Рожковым В.С. и д.т.н., профессором Нездойминовым В.И.»;

С целью рассмотрения научных рекомендаций и выработки предложений по внедрению и использованию новейших достижений науки и научно-технических разработок, Научно-технический совет Министерства строительства жилищно-коммунального хозяйства Донецкой Народной Республики

РЕШИЛ:

1. Одобрить «Рекомендации по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами», разработанные сотрудниками Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» к.т.н., доцентом Рожковым В.С. и д.т.н., профессором Нездойминовым В.И.;

2. Рекомендовать к внедрению «Рекомендации по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами» в строительных, проектных и научно-исследовательских

организациях ДНР, осуществляющих проектирование и эксплуатацию станций биологической очистки сточных вод.

3. Рекомендовать департаменту жилищно-коммунального хозяйства Минстроя ДНР совместно с ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» разработать информационные материалы по практическому использованию указанных в пункте 2 настоящего решения рекомендаций и направить их в строительные, проектные и научно-исследовательские организации ДНР, осуществляющих проектирование и эксплуатацию станций биологической очистки сточных вод

Заместитель председателя Совета



В.Н. Дубовка

Члены президиума:



Л.В. Семченков



Р.И. Теряев

Ответственный секретарь НТС



Е.Г. Задерей

Прошито, пронумеровано и скреплено
Печатью 1 (два) листов

Директор департамента
территориального развития
Минстрой ДНР Л.В. Семченков





КОПИЯ

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

**СЛУЖБА ГОСУДАРСТВЕННОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
(СЛУЖБА СТРОЙЭКСПЕРТИЗЫ ДНР)**

ул. Университетская, 13, г. Донецк, 283001, код 51018267, тел/факс (062) 303-26-54 e-mail: expert@minstroy-dnr.ru



УТВЕРЖДАЮ:
Врио начальника Службы
государственной строительной
экспертизы Донецкой Народной
Республики

Ю.В. Борисенко

№ 0821-21

«24» 11/01/21 2021 г.

ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по рассмотрению рабочего проекта «Строительство объектов канализационных систем в пгт. Карло-Марксово»

Заказчик: Республиканская дирекция капитального строительства Донецкой Народной Республики

Генеральный проектировщик: ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Категория сложности объекта строительства (по проекту): V

Источник финансирования: бюджетные средства

По результатам рассмотрения рабочего проекта «Строительство объектов канализационных систем в пгт. Карло-Марксово» и снятия замечаний по письмам Службы стройэкспертизы ДНР от 30.12.2020 № 2618/01 и от 30.04.2021 № 818/01 установлено, что представленная проектно-сметная документация разработана в соответствии с исходными данными на проектирование с соблюдением требований к прочности, надёжности и долговечности объектов строительства, их эксплуатационной безопасности, инженерному обеспечению; энергосбережения; санитарного и эпидемиологического благополучия населения; пожарной безопасности; охране труда и промышленной безопасности; экологической безопасности; сметной части проекта строительства и **рекомендуется к утверждению** в установленном порядке с такими основными технико-экономическими показателями:

Показатели	д. измерения	Количество
1	2	3
Вид строительства	Новое строительство	

Копия Верна



С.В. Яковлева

КОПИЯ

(продолжение)

КОПИЯ

(окончание)

1	2	3
Напорный канализационный коллектор ф63 по ул. Маяковского / самотечный ф 200	м	281,5 / 2,5
Расчетная / Установленная электрическая мощность КНС №1	кВт	5,562 / 10,612
Расчетная / Установленная электрическая мощность КНС №3	кВт	1,602 / 2,677
Расчетная / Установленная электрическая мощность КНС №4	кВт	2,867 / 5,212
Расчетная / Установленная электрическая мощность КОС	кВт	85,83 / 129,85
Годовой расход электроэнергии КОС	кВт*час	300748
Годовой расход электроэнергии КНС №1	кВт*час	19489
Годовой расход электроэнергии КНС №3	кВт*час	5613
Годовой расход электроэнергии КНС №4	кВт*час	10028
Продолжительность строительства	мес.	8
Общая сметная стоимость объекта строительства в текущих ценах по состоянию на 21.06.2021 года, в том числе:	тыс. рос. руб.	83549,280
строительные работы	тыс. рос. руб.	51347,327
оборудование	тыс. рос. руб.	27081,226
прочие затраты	тыс. рос. руб.	5120,727

Примечания:

1. Срок действия данного заключения: согласно п. 8.7 «Порядка государственной экспертизы проектной документации на строительство».

2. Данное заключение является действительным при условии наличия положительных экспертных заключений в соответствии с п. 8.3.1 «Порядка государственной экспертизы проектной документации на строительство»:

2.1. Экспертные заключения Департамента надзорной деятельности и профилактической работы МЧС ДНР от 18.03.2021г. №12/1995 и от 22.03.2021г. №12/2098;

2.2. Экспертное заключение Государственной санитарно-эпидемиологической экспертизы МЗ ДНР от 10.12.2020г. №01-02-1/1951.

2.3. Заключение Государственного комитета по экологической политике и природным ресурсам ДНР от 01.04.2021 г. №03-07/1440

2.4. Заключение ГУП ДНР «ДОНЕЦКИЙ ЭТЦ» от 14.08.2020г. №01.-01.-15.-0328.21.

3. Приложение к заключению на 61 странице является его неотъемлемой частью.

Главный эксперт (заведующий сектором)

 М.О. Попова

Ответственный эксперт (начальник отдела)

 А.С. Анпилов

Ответственный эксперт (заведующий сектором)

 И.А. Цецладзе

Ответственный эксперт (заведующий сектором)

 В.А. Манойленко

Ответственный эксперт (главный специалист)

 О.А. Писанец

Ответственный эксперт (главный специалист)

 Е.О. Фролова

Ответственный эксперт (главный специалист)

 Н.С. Шинкаренко

Ответственный эксперт (главный специалист)

 В.Е. Джерих

Копия выдана 21.06.2021 г. РРДЭС/ДЕР



КОПИЯ ВЕРНА

«Утверждаю»

Генеральный директор

ООО «ЭКОС Инвест»

М.Г. Зубов



«9» февраля 2023г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Рожкова Виталия Сергеевича

на тему «Очистка сточных вод населенных пунктов в системах с эрлифтными биореакторами»

Комиссия ЭКОС Групп в составе генерального директора ООО «ЭКОС Инвест» Зубова М.Г., генерального директора АО «ЭКОС» Сипковой Е.В., зам. генерального директора ООО «НИЦ ЭкоТех» по научной и образовательной работе Вильсон Е.В. рассмотрела вопрос использования результатов диссертационной работы Рожкова В.С., представленных в виде рекомендаций по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами и установила следующее.

- В диссертационной работе, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, рассмотрены вопросы разработки эффективных схем биологической очистки от органических загрязнений и биогенных элементов с применением эрлифтных биореакторов. Показано, что в классическом варианте, в зоне уплотнения во вторичном отстойнике происходит выделение фосфора фосфатов до значимых концентраций в очищенную воду, что в целом ухудшает показатели качества очистки воды. В диссертационной работе предложен способ решения этой проблемы путем исключения из технологической схемы вторичного отстойника и устройства системы симультанной нитри-денитрификации с затопленным эрлифтом, создающим рециркуляцию иловой смеси как в зоне очистки, так и в зоне илоразделения. Предложенная конструктивная особенность позволяет сократить расходы на электроэнергию на 15-20%, сократить продолжительность обработки сточных вод на 3 – 4 часа, а, следовательно, снизить требуемые объемы сооружений. Данная технологическая схема целесообразна от сверхмалых до больших (до 40.000 м³/сут) очистных

сооружений централизованных систем водоотведения. На данную технологию получен патент 132076 (UA) в 2019 г.

- В рекомендациях, разработанных по результатам исследовательской части диссертационной работы и опубликованных в ГОУ ВПО «ДОННАСА» в 2022г., приведены положения по расчету и проектированию сооружений биологической очистки городских сточных вод в схемах с эрлифтными биореакторами от органических веществ, соединений азота и фосфора.

- Предложенные решения и способ расчета являются перспективными для последующего внедрения в проекты очистки городских сточных вод с учетом снижения эксплуатационных затрат на аэрацию, перекачивание и перемешивание иловой смеси. При этом, использование данного технологического решения позволяет добиваться качества очистки сточных вод, в том числе по фосфатам, в соответствии с требованиями к сбросу в водоемы категории Б (бассейн Азовского моря), позволяет стабилизировать работу сооружений, повысить надежность и обеспеченность процесса очистки.

Рассмотренные рекомендации приняты для использования специалистами АО «ЭКОС» при расчетах и проектировании сооружений биологической очистки городских сточных вод и близких по составу производственных сточных вод.

Генеральный директор ООО "Экос Инвест"
к.т.н., , основатель ЭКОС Групп, заслуженный изобретатель
и рационализатор, лауреат премии Правительства РФ
в области науки и техники, консультант-эксперт
по международным проектам, председатель секции ЭТС РАВВ

М.Г. Зубов

Генеральный директор АО «ЭКОС».,

Е.В. Сипкова

Зам. генерального директора ООО «НИЦ Экостех»
по научной и образовательной работе.

к.т.н., зам. председателя секции ЭТС РАВВ,
член Технического совета МЖКХ Ростовской области

Е.В Вильсон

Подписи заверено

Руководитель филиала
по управлению
ТК ЭКОС



Баронина Е.С.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«ПРОЕКТНЫЙ МИР»

83017, ДНР, г.о. Донецкий, г.Донецк, бул. Шевченко, д. 44,
ОГРН 1229300129112, ИНН 9303023878, КПП 930301001,
email: project_world@bk.ru, +7 949 309-18-99

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «ПРОЕКТНЫЙ МИР»

А.А. Бармотин



06 февраля 2023 года

АКТ

**внедрения результатов диссертационной работы
Рожкова Виталия Сергеевича
на тему «Биологическая очистка сточных вод в сооружениях
с эрлифтной аэрацией»**

Комиссия ООО «ПРОЕКТНЫЙ МИР» в составе директора Бармотина Александра Александровича, и.о. главного инженера Крайнова Михаила Адамовича, рассмотрели вопрос использования результатов диссертационной работы Рожкова В.С., представленных в виде рекомендаций по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами (В.С. Рожков, В.И. Нездойминов, Макеевка – 2022) и установила следующее:

- в рекомендациях приведены положения по расчету и проектированию сооружений биологической очистки городских сточных вод от органических веществ, соединений азота и фосфора в схемах с эрлифтными биореакторами;
- предложенные технологии превосходят все использующиеся в настоящее время технологические схемы, что соответствует требованиям Наилучших Доступных Технологий при более низких, чем у известных технологий, эксплуатационных затратах за счет меньшего объема рециркуляции и расхода воздуха;
- рассмотренные рекомендации приняты для использования специалистами ООО «ПРОЕКТНЫЙ МИР» при расчетах и проектировании сооружений биологической очистки сточных вод.

Директор, к.т.н., доц., А.А. Бармотин

И.о. главного инженера, М.А. Крайнов

«Утверждаю»

Генеральный директор



В.И. Москаленко

«25» января 2023г.

АКТ

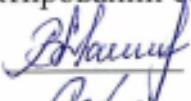


внедрения результатов диссертационной работы
Рожкова Виталия Сергеевича
на тему «Биологическая очистка сточных вод в сооружениях с эрлифтной
аэрацией»

Комиссия ООО Фирма «Промстройремонт» в составе Москаленко В.И., Сова А.Ф., Марченко А.И., рассмотрела вопрос использования результатов диссертационной работы Рожкова В.С., представленных в виде рекомендаций по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами (В.С. Рожков, В.И. Нездойминов, Макеевка – 2022) и установила:

представленная в рекомендациях технология «БОСЭБ» позволяет производить полную биологическую очистку городских сточных вод при значительно меньших затратах на строительство и эксплуатацию сооружений, чем у существующих аналогов. Это достигается за счет снижения объемов биореакторов, уменьшения энергозатрат на циркуляцию и перемешивание иловой смеси;

предложенные решения соответствуют требованиям Наилучших Доступных Технологий Российской Федерации и могут быть использованы при строительстве, реконструкции и модернизации очистных сооружений канализации населенных пунктов;

рассмотренные рекомендации приняты для использования специалистами ООО Фирма «Промстройремонт» при расчетах и проектировании сооружений биологической очистки городских сточных вод.

 Генеральный директор, В.И. Москаленко
 Главный инженер, А.Ф. Сова
 Ведущий инженер, А.И. Марченко



«Утверждаю»

Генеральный директор
ООО «Тессеракт»
Н.А. Тетерин

«27» декабря 2022 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Рожкова Виталия Сергеевича
на тему «Очистка сточных вод населенных пунктов в системах с эрлифтными
биореакторами»

Комиссия ООО «Тессеракт» в составе Тетерина Н.А., Васянкина М.В., Беднева Д.С., рассмотрела вопрос использования результатов диссертационной работы Рожкова В.С. на тему «Очистка сточных вод населенных пунктов в системах с эрлифтными биореакторами», представленных в виде «Рекомендаций по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами» (В.С. Рожков, В.И. Нездойминов, Макеевка – 2022) и установила:

рассмотренные «Рекомендации...» описывают способ расчета сооружений биологической очистки сточных вод населенных пунктов (хозяйственно-бытового стока) на основе эрлифтных-биореакторов – аэротенков специальной конструкции, использующих затопленный эрлифт для аэрации и циркуляции иловой смеси и осветлитель со взвешенным слоем для илоотделения;

к «Рекомендациям...» приложен исполняемый файл для моделирования систем очистки с эрлифтными биореакторами на основании системы ASM3+Bio-P для программной среды Cell Designer;

сопоставление модельных расчетов и указанных в «Рекомендациях...» показателей качества очистки городских сточных вод соответствуют требованиям Наилучших доступных технологий по схеме БНДБФ (биологическая нитри-денитрификация с биологическим удалением фосфора). В соответствии с действующим Законодательством РФ, внедрение такого решения может позволить отказаться от платы за сброс загрязняющих веществ в водные объекты;

рассмотренные рекомендации приняты для использования специалистами ООО «Тессеракт» при расчетах и проектировании сооружений биологической очистки городских сточных вод, моделировании схем очистки.



Генеральный директор, Н.А. Тетерин



Главный инженер, М.В. Васянкин



Ведущий инженер, Д.С. Беднев