

Принят в печать  
20.09.2023г.



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.

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**доктора технических наук**

Макеевка – 2023

Работа выполнена на кафедре водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, Министерства науки и высшего образования РФ.

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор,  
**НЕЗДОЙМИНОВ Виктор Иванович**,  
заведующий кафедрой «Водоснабжение,  
водоотведение и охрана водных ресурсов»  
ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры»

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор,  
**АНДРЕЕВ Сергей Юрьевич**,  
профессор кафедры «Водоснабжение,  
водоотведение и гидротехника» ФГБОУ ВО  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»

доктор технических наук, профессор,  
**БАЖЕНОВ Виктор Иванович**,  
исполнительный директор акционерного  
общества «Водоснабжение и водоотведение»

доктор технических наук, профессор,  
**ТАРАСЬЯНЦ Сергей Андреевич**,  
профессор кафедры «Водоснабжение и  
использование водных ресурсов» ФГБОУ ВО  
«Донской ГАУ», Новочеркасский инженерно-  
мелиоративный институт им. А.К. Кортунова.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Воронежский государственный  
технический университет"

Защита состоится 21 декабря 2023 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 02.2.001.01 при ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета.  
Тел. (+7865) 343-70-33, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «    » сентября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета 02.2.001.01

Удовиченко Злата Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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., Серпокрьлов 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. Nauduc, 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»), Stoat, 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, pH) 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 хлопок 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 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, сходимость результатов численных исследований и натуральных 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 страница основного текста, 27 страниц списка использованной литературы и 50 страниц приложений.

**На защиту выносятся:**

- 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены объект и предмет исследования, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования; приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов; положения, выносимые на защиту; обоснованность и достоверность научных положений и выводов; апробация результатов диссертации; количество публикаций, структура и объем диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу состояния вопроса определения необходимой степени удаления органических загрязнений и биогенных элементов из городских сточных вод и существующих способов достижения требуемого качества очистки. Значительный вклад в развитие данного вопроса внесли Яковлев С.В., Швецов В.Н., Мишуков Б.Г., Куликов Н.И., Серпокрылов Н.С., Нездойминов В.И., Баженов В.И., Степанов С.В., Залетова Н.А., M. Henze, C. P. Jr. Grady, W. Gujer.

Выполнен анализ современных требований к степени очистки по технологически нормируемым величинам, включающим в себя показатели химического потребления кислорода (ХПК), биологического потребления кислорода (БПК), взвешенных веществ, соединений азота и фосфора.

Установлено, что классические технологии полной биологической очистки (схема Лудзака-Эттингера), распространенные на действующих станциях очистки, не способны выполнить современные требования и нуждаются в реконструкции с переходом на наилучшие доступные технологии (НДТ). Особо остро этот вопрос стоит для станций очистки сточных вод малой и средней производительности (до 10 000 м<sup>3</sup>/сут).

Поскольку рентабельность перехода на НДТ является отрицательной, для выявления путей сокращения затрат, проанализированы экономические аспекты работы сооружений очистки городских сточных вод. Для оценки технико-экономической эффективности работы таких сооружений предложены следующие критерии:

– интегральный показатель качества очистки ИПКО – безразмерный показатель качества очистки, варьируется от 3,5 до 50 и более. Высокой

эффективности соответствуют нижние значения;

- $T_{оч}$  – время пребывания сточной жидкости в процессе очистки (ч), которое фактически является показателем объема сооружений. Здесь учитываются все стадии очистки – от приемных камер до выпусков;
- $I_{ок}$  – удельный расход воздуха на очистку и перемешивание одного метра кубического сточных вод, ( $m^3/m^3$ );
- $S_{РЕЦ}$  – кратность превышения рециркуляционных потоков над расходом исходного стока;
- $Z_{ПЕР}$  – количество условных зон механического перемешивания (шт.).

Снижение перечисленных показателей работы сооружений и является основной задачей при разработке перспективных технологий и схем станции очистки городских сточных вод.

Наиболее распространенные схемы одноиловой биологической очистки сточных вод основываются на создании различных зон пребывания иловой смеси с протеканием в них характерных биохимических процессов. К ним относятся процессы потребления микроорганизмами органических соединений, биологическая нитри-денитрификация, улучшенное удаление фосфора.

Установлено, что большинство существующих одноиловых схем биологической очистки включают вторичное илоразделение с помощью гравитационного отстаивания. С учетом продолжительности осаждения и сгущения активного ила, время его пребывания в анаэробных условиях вторичного отстойника может достигать 6-ти часов, что сопоставимо с временем пребывания в аэробном биореакторе. При этом возможно выделение вторичных загрязнений из биомассы возвратного ила с ухудшением конечного качества очистки.

Выполнен анализ биологических процессов при очистке сточных вод и методов имитационного моделирования активного ила. Установлено, что 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 фосфор-аккумулирующих микроорганизмов), что затрудняет их применение при имитационном моделировании.

Очевидна необходимость разработки энергоэффективных и природосберегающих технологических решений и схем биологической очистки городских сточных вод от органических веществ и биогенных элементов для станций малой и средней производительности.

Во **второй** главе приведена постановка задач и методология исследований. На основании изложенного материала сформулированы задачи исследований по повышению эффективности удаления органических соединений и биогенных элементов из сточных вод средних и малых населенных пунктов путем оптимизации комплекса биологических и гидродинамических процессов очистки.

Описаны примененные теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относится имитационное моделирование на основе подхода ASM3 Международной водной ассоциации (IWA) с разработкой собственной модели активного ила. Моделирование реализовано в программной среде Cell Designer, созданной The Systems Biology Institute, Токио, Япония. Обработка данных производилась с помощью программного комплекса DataFit 9.1.32, производства Oakdale Engineering, Окдэл, США.

Выполнялись инструментальные измерения (расход воздуха, сточной жидкости, растворенного кислорода, pH, Eh, температура, расход электроэнергии) и химические анализы сточной жидкости, иловой смеси и очищенной воды по известным действующим методикам. Применены современные экспериментальные методы контроля активного ила (тесты активности ила, седиментации и микроскопия), а также методы сверхзамедленной съемки.

Экспериментальные испытания выполнены на лабораторной, полупромышленной (Рисунок 1) и опытно-промышленной (Рисунок 2) установках биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами, натурные исследования проводились на действующем аэротенке с затопленной эрлифтной системой аэрации №4 очистных сооружений пгт. Новый Свет.



Рисунок 1 – 3D-модель и фото лабораторной установки по исследованию степени осветления в эрлифтном биореакторе



Рисунок 2 – Общий вид опытно-промышленной установки очистки сточных вод в эрлифтном биореакторе

Приведено описание метода реализации имитационного моделирования процессов биологической очистки. Особенностью CellDesigner является форма описания изложенных уравнений системы (Рисунок 3).

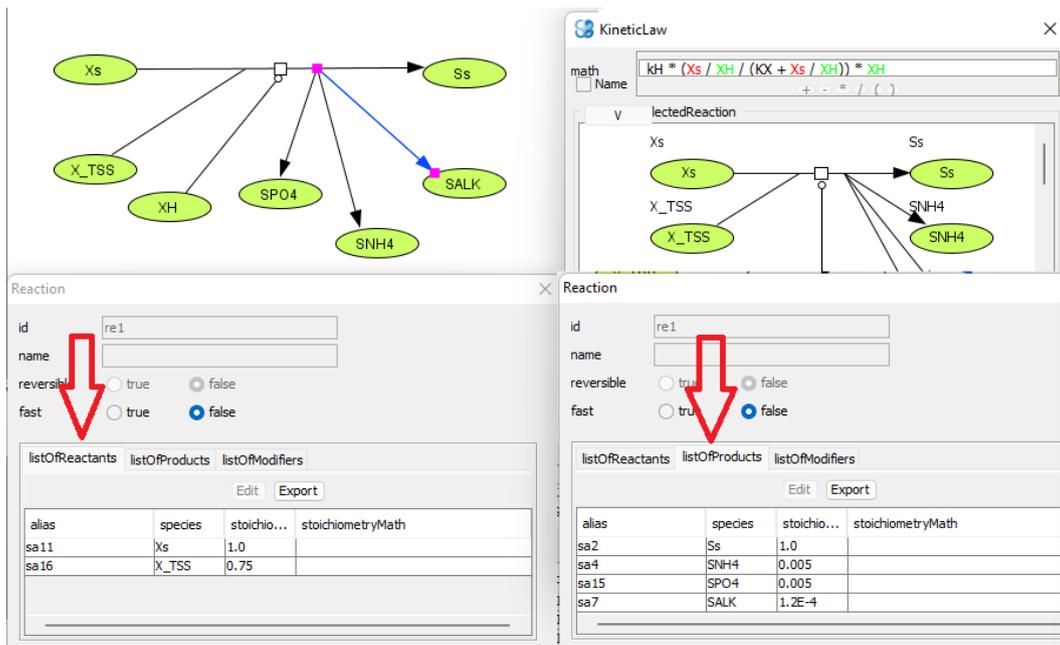


Рисунок 3 – Расчетная схема процесса гидролиза органического вещества по ASM3 в поле Cell Designer

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

В **третьей главе** приведено описание и научное обоснование предлагаемой концепции биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами (БОСЭБ). Основным отличительным элементом технологии БОСЭБ являются аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации и встроенным вторичным илоразделением во взвешенном слое.

Данные сооружения представляют собой аэротенки-смесители, в которых система аэрации устроена по принципу затопленного эрлифта (верх аэрационной эрлифтной перегородки находится ниже уровня воды). Такой принцип позволяет организовать циркуляционные восходяще-нисходящие потоки в сооружении, как показано на рисунке 4.

Основная эрлифтная циркуляция в сооружении обеспечивает перекачивание иловой массы из зоны насыщения кислородом (внутри и над эрлифтом) в зону потребления кислорода (за эрлифтом). На рисунке 5 приведено примерное распределение зон.

В зоне аэрации происходят одновременно процессы насыщения жидкости кислородом воздуха и потребление кислорода микроорганизмами активного ила. В зоне потребления кислорода насыщение прекращается и по мере продвижения иловой смеси по циркуляционному контуру в нижнюю часть сооружения, концентрация кислорода снижается.

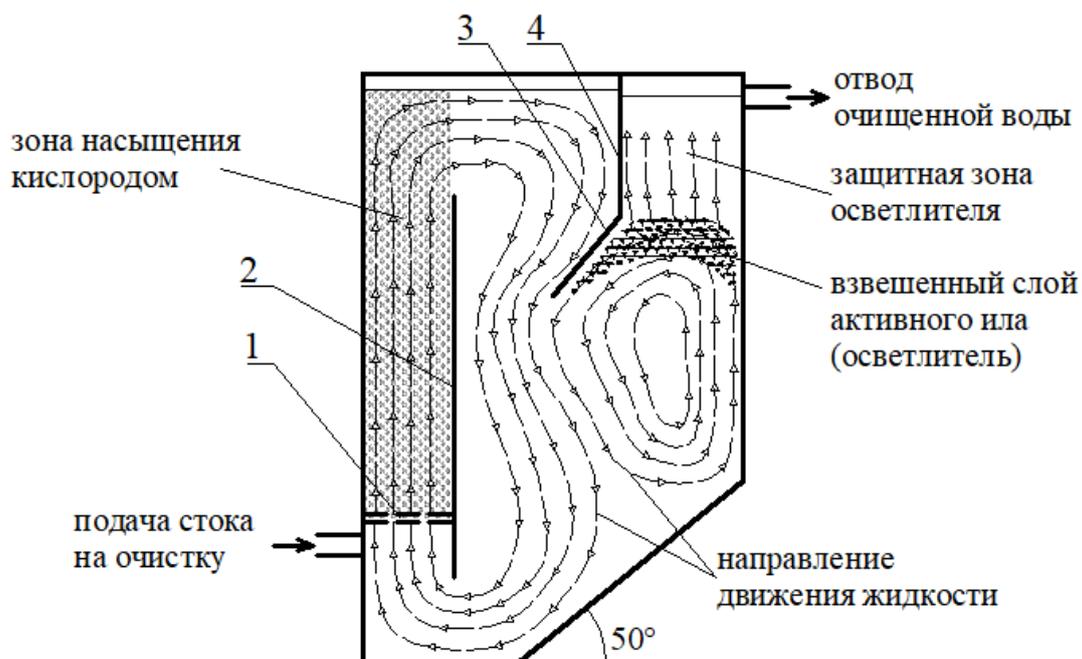


Рисунок 4 – Схема эрлифтного биореактора:  
 1 – аэратор; 2 – вертикальная стенка затопленного эрлифта;  
 3 – наклонный козырёк; 4 – вертикальная разделительная перегородка

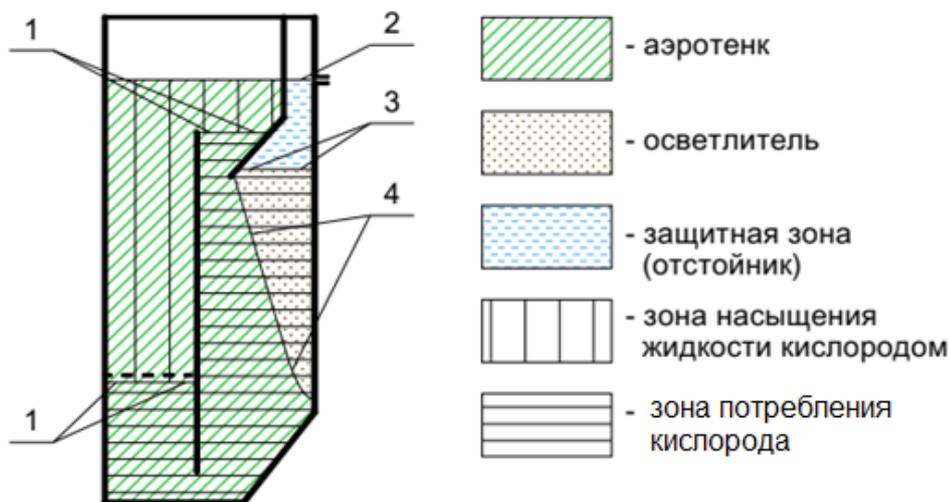


Рисунок 5 – Условное зонирование аэротенка-осветлителя (эрлифтного биореактора):  
 1 – границы зоны насыщения (уровень аэрационной системы и верха эрлифта); 2 – уровень жидкости в сооружении; 3 – верхняя граница взвешенного слоя; 4 – граница зоны илоразделения (водооборотной зоны)

В таких сооружениях, за счет смены условий аэробности, 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 в нижней части аэротенка, что

подтверждается оптимальными для этого процесса концентрациями кислорода (0,3-0,4 г/м<sup>3</sup>).

На основании изложенного, **концепция технологии БОСЭБ** (биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами) сформулирована 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 перетоков и рециклов.

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

Процессы циркуляции иловой смеси между различными зонами эрлифтного биореактора, а также самообновление 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:

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

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

где  $\bar{t}$  – время, с;

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – координаты, м;

$\bar{\rho}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\bar{\nu}$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$\bar{P}$  – давление, Па.

Итерационный процесс при решении задачи реализуется методом Гаусса-Зайделя с нахождением функции тока итерационным методом Ричардсона. Полученная система решается методом последовательных приближений, для чего создана компьютерная программа в среде Delphi на языке Object Pascal. Интерфейс программы приведен на рисунке 6.

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.

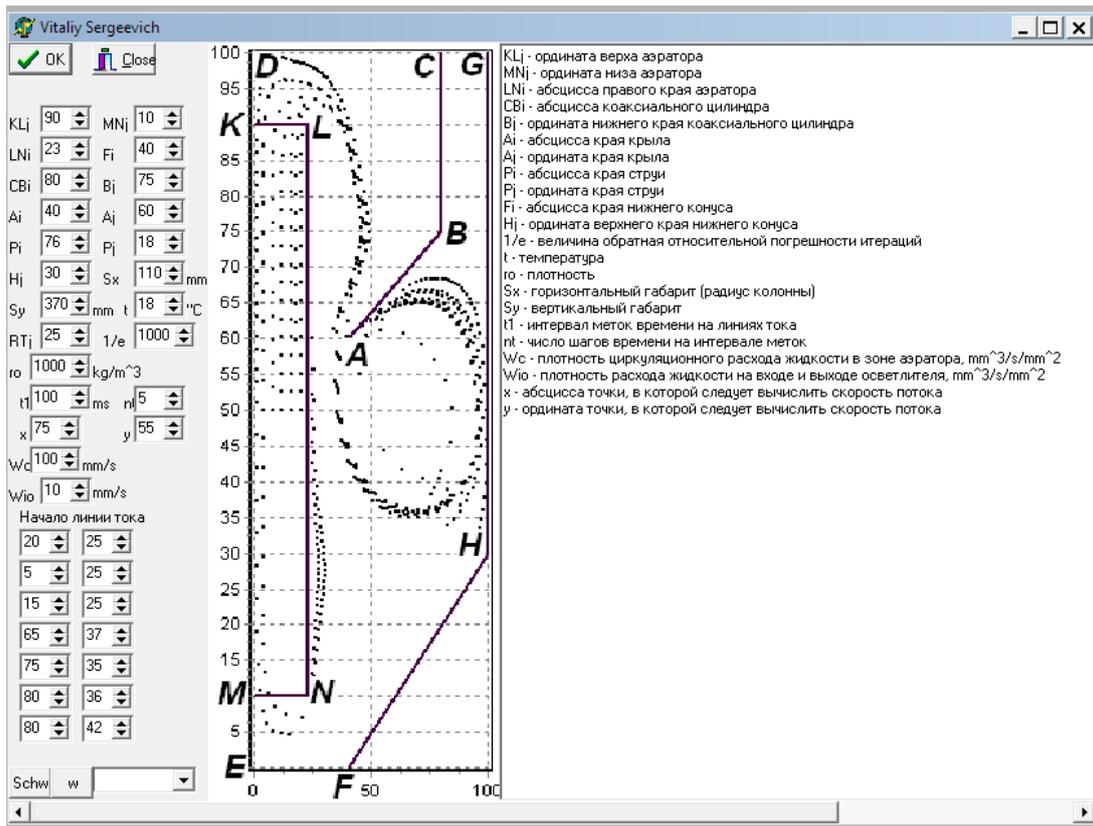


Рисунок 6 – Интерфейс программы для моделирования гидродинамических процессов в эрлифтном биореакторе

Для установления искомой функции  $q_{cir}$  – циркуляционного расхода в сооружении ( $m^3/c$ ) от расхода воздуха, подаваемого в систему аэрации  $Q_{air}$  ( $m^3/c$ ), предложено использовать интеграл Бернулли, связывая который с уравнением неразрывности, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_a = \frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{Q_{air}}{v_{ж} + V_{п}} \\ h_a - \frac{(h_a - z_1) \cdot \left( \frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{\gamma_r \cdot Q_{air}}{\gamma_{ж} \cdot (v_{ж} + V_{п})} \right) - \left[ W_{ц} \cdot \left( \frac{q_{cir}}{v_{ж}} + \frac{\gamma_r \cdot Q_{air}}{\gamma_{ж} \cdot (v_{ж} + V_{п})} \right) + \frac{W_k - W_{п}}{W_k} \right] z_1 +}{\omega_a} + \frac{\alpha}{2g} \cdot \left( \frac{q_{cir} + Q_{air}}{\omega_a} \right)^2 = \frac{\alpha_b}{2g} \cdot \left( \frac{q_{cir}}{\omega_a} \right)^2 + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{q_{cir}^2}{2g} \end{array} \right. \quad (3)$$

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

$h_a$  – глубина погружения аэратора, м;

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

$W_k$  – объём газожидкостной смеси над затопленным эрлифтом,  $m^3$ ;

$\omega_a$  – площадь поперечного сечения затопленного эрлифта,  $m^2$ ;

$Q_{air}$  – 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,  $N/m^3$ ;

$v_{ж}$  – средняя скорость течения жидкой фазы газожидкостной смеси в эрлифте,  $m/c$ ;

$V_{\text{п}}$  – средняя скорость всплытия пузырька воздуха (определяется по известным зависимостям как функция размера пузырька, плотностей жидкости и газа), м/с;

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

$\omega_i$  – занимаемая жидкой фазой часть поперечной площади потока,  $\text{м}^2$ , в сечении с местным сопротивлением, коэффициент которого составляет  $\zeta_i$ ;

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса для потока смеси в эрлифте;

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

Таким образом, совместное решение уравнений (1), (2) численным методом и системы (3) аналитическим методом дает полное описание гидравлических процессов в сооружении.

Полученные гидродинамические зависимости применимы для определения эффективности использования кислорода в системах с затопленной эрлифтной аэрацией в части установления эжектируемого расхода жидкости  $Q_{\text{эж}}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  (Рисунок 7). 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 ( $q_{\text{эж}}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ).

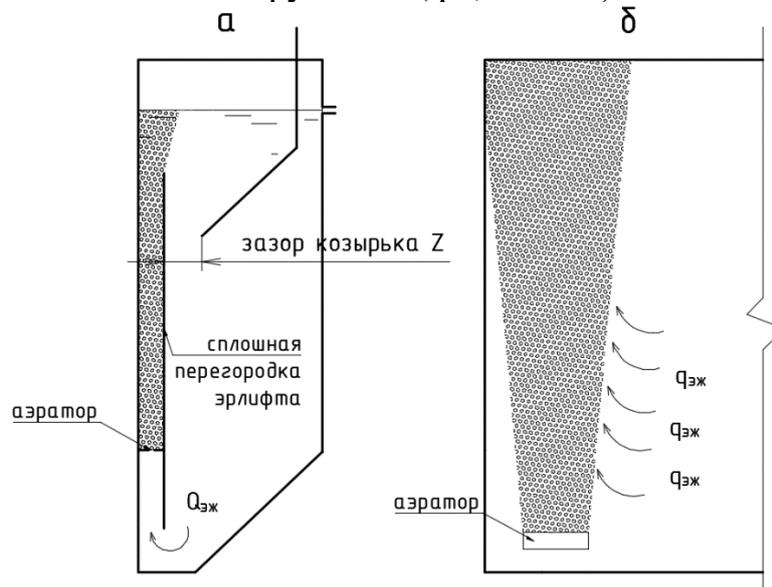


Рисунок 7 – Принципиальная схема механизмов эжекции при аэрации:

а) – в эрлифтном биореакторе; б) – в классическом аэротенке

Одним из наиболее распространенных показателей эффективности процесса аэрации в практике очистки сточных вод, является коэффициент использования кислорода  $K_{\text{и}}$  (при стандартных условиях – SOTE). Известно, что для определения величины  $K_{\text{и}}$ , с достаточной для инженерных расчетов точностью, можно использовать известную форму зависимости:

$$K_{И} = \frac{\Delta C_{П}}{C_{КВ}} = \frac{1}{\delta_{П}} \sqrt{D_{Т} \cdot \zeta \frac{\rho \cdot V_{П}^3}{2 \cdot \sigma \cdot K_{Ф}} \cdot \frac{C_{Н} - C}{C_{КВ}} \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

где  $\Delta C_{П}$  – концентрация кислорода, переданного жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C_{КВ}$  – концентрация кислорода, в воздухе, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\delta_{П}$  – дисперсионный размер пузырька, м;  
 $D_{Т}$  – коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  
 $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления всплытию пузырька;  
 $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  
 $V_{П}$  – скорость всплывания пузырька воздуха, м/с;  
 $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м<sup>2</sup>;  
 $K_{Ф}$  – коэффициент формы пузырька воздуха;  
 $C_{Н}$  – концентрация насыщения жидкости кислородом, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C$  – концентрация растворенного в жидкости кислорода, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\Delta T$  – время контакта воздуха с водой, с.

Дисперсионный размер пузырька  $\delta_{П}$ , м, определяется по формуле:

$$\delta_{П} = \frac{W_{П}}{S_{П}}, \quad (5)$$

где  $W_{П}$  – объем пузырька воздуха, м<sup>3</sup>;  
 $S_{П}$  – площадь поверхности пузырька, м<sup>2</sup>.

Коэффициент формы пузырька определяется по формуле:

$$K_{Ф} = \frac{S_{П}}{f_{П}}, \quad (6)$$

где  $f_{П}$  – площадь поперечного сечения пузырька воздуха, м<sup>2</sup>.

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  $V_{П}$ . 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. Варьируемыми параметрами в данной серии экспериментов являлись зазор козырька  $Z$ , м, а также интенсивность аэрации, которая представляет из себя отношение расхода воздуха, подаваемого в аэратор ( $Q_{air}$ , м<sup>3</sup>/ч) к площади затопленного эрлифта  $w_a$ , м<sup>2</sup>:

$$I_a = \frac{Q_{air}}{w_a}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (7)$$

Скорость всплытия пузырька определялась в зависимости от интенсивности эрлифтной аэрации способом сверхзамедленной съемки с частотой 960 кадров/с. После этого изображения просматривались в видеоредакторе с фиксацией временных отрезков и пройденного пузырьком пути. Для получения более точного результата, в каждом стационарном эксперименте фиксировалось 3 видеокadra, в каждом из которых выбиралось три пузырька. Конечным результатом эксперимента является абсолютная

(относительно неподвижного наблюдателя) скорость всплытия пузырька воздуха  $V_{\text{абс.п.}}$  (м/с).

Результаты обработки данных приведены на рисунке 8. Как видно, абсолютная скорость всплытия пузырька не зависит от величины зазора козырька, что косвенно подтверждает не включение этого сопротивления в систему уравнений (3).

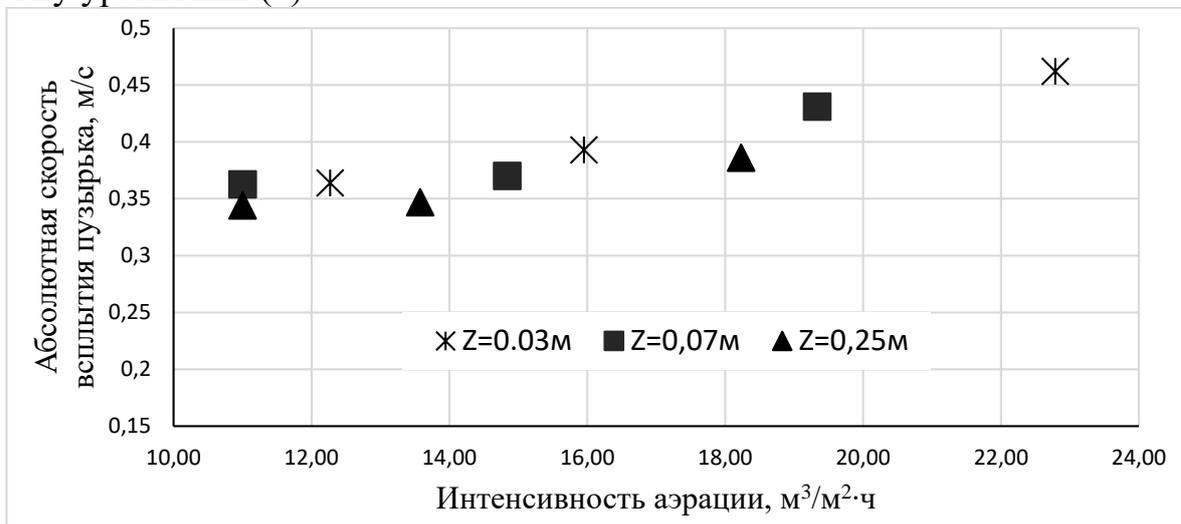


Рисунок 8 – Зависимость абсолютной скорости всплытия  $V_{\text{абс.п.}}$  от интенсивности аэрации и величины зазора  $Z$  эрлифтного биореактора

Поскольку скорость всплытия одиночного пузырька  $V_{\text{п}}$ , согласно общему подходу, зависит от его диаметра и плотностей жидкости и газа, имеет смысл ввести понятие эжекционной прибавки скорости  $V_{\text{эж}}$  (м/с), которая будет представлять собой разность абсолютной скорости всплытия и скорости всплытия одиночного пузырька:

$$V_{\text{эж}} = V_{\text{абс.п.}} - V_{\text{п}}. \quad (8)$$

Путем статистической обработки результатов экспериментов в программной среде DataFit, установлена эмпирическая зависимость эжекционной добавки от интенсивности аэрации:

$$V_{\text{эж}} = 0,0258 \cdot 1,087^{I_a}. \quad (9)$$

Полученная скорость, при суммировании со скоростью всплытия пузырька  $V_{\text{п}}$ , может быть применена для определения времени контакта воздуха с водой  $\Delta T$  в формуле для определения коэффициента использования кислорода (формула 4) в эрлифтных биореакторах.

Для проверки адекватности предложенной зависимости (9), проведены лабораторные исследования по определению фактического коэффициента использования кислорода с использованием кислородомера АЖА-101.М. Выполнялось варьирование начальной концентрации растворенного в жидкости кислорода  $C$  (формула 4) и глубина погружения аэратора  $h_a$ .

Сопоставлением полученных данных с расчетными по формуле (4) установлено, что при подстановке в качестве скорости всплытия  $V_{\text{п}}$  как расчетной скорости, так и абсолютной скорости с учетом эжекционной прибавки по зависимости (8) не дает удовлетворительной сходимости

теоретических и расчетных данных. Это объясняется тем, что множитель  $V_{\Pi}^3$  в формуле (4) 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 подбора установлено, приемлемую сходимость можно получить при подстановке в уравнение (4) вместо величины  $V_{\Pi}$  приведенной скорости  $V_{\Pi P}$ , определенной по формуле:

$$V_{\Pi P} = V_{\Pi} + \frac{V_{\text{эж}}}{2}. \quad (10)$$

Таким образом, формула (4) при описании коэффициента использования кислорода в эрлифтных биореакторах (с учетом формул 9,10) примет вид:

$$K_{\text{И}} = \frac{\Delta C_{\Pi}}{C_{\text{кв}}} = \frac{1}{\delta_{\Pi}} \sqrt{D_T \cdot \zeta \frac{\rho \cdot \left(V_{\Pi} + \frac{V_{\text{эж}}}{2}\right)^3}{2 \cdot \sigma \cdot K_{\phi}} \cdot \frac{C_{\text{Н}} - C}{C_{\text{кв}}} \cdot \frac{h_a}{V_{\Pi} + 0,0258 \cdot 1,087 I_a}}. \quad (11)$$

Сопоставление расчетных значений коэффициента использования кислорода по формуле (11) и экспериментальных данных приведено на рисунках 9, 10.

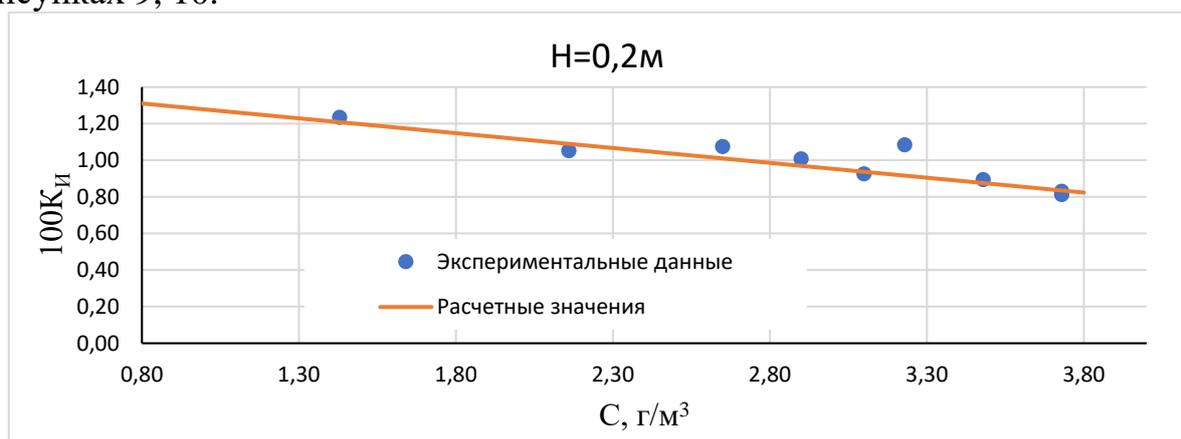


Рисунок 9 – Коэффициент использования кислорода при глубине погружения аэратора 0,2 м

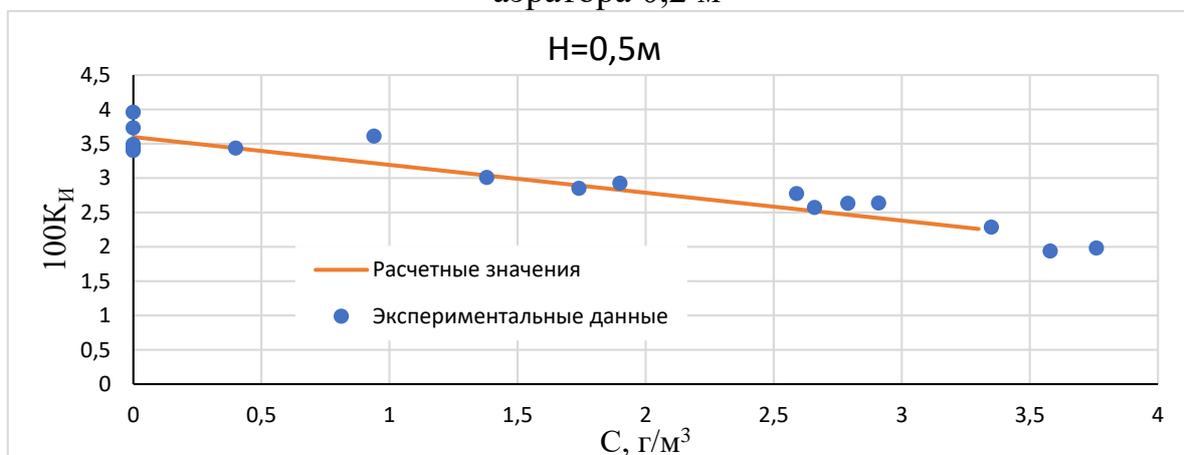


Рисунок 10 – Коэффициент использования кислорода при глубине погружения аэратора 0,5 м

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

Для изучения процесса осветления в самообновляющемся взвешенном слое активного ила проведена серия полупромышленных испытаний работы эрлифтного биореактора на модельной установке (Рисунок 1). 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 защитной зоны осветлителя  $q_s$  ( $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ) и концентрации активного ила  $a_i$  (г/л) в сооружении. Функцией отклика в данном эксперименте являлась концентрация взвешенных веществ на выходе из эрлифтного биореактора  $C_{\text{в.в.}}$ ,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

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:

$$I_{\text{ц}} = \frac{q_{\text{cir}}}{\omega_j}, \quad (12)$$

где  $\omega_j$  – площадь зазора между эрлифтной колонной и наклонным козырьком, м.

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

$$q_s = 0,377 \cdot \frac{C_{\text{в.в.}}^{1,19} \cdot a_i^{0,451}}{1,0078^{1,19} I_{\text{ц}}}. \quad (13)$$

Полученная зависимость позволяет определить усредненные параметры скоростей осветления во взвешенном слое. В то же время, визуально можно наблюдать, что не вся зона осветления работает в режиме восходящего потока. Численное решение задач гидродинамики сооружения (уравнения 1-3) указывают на следующую эпюру вертикальных скоростей в сооружении – рисунок 11.

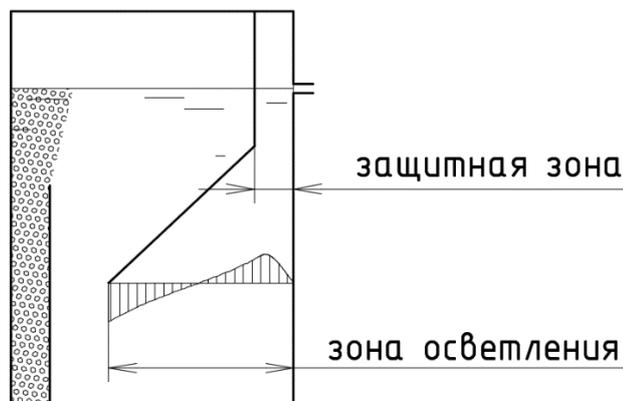


Рисунок 11 – Схема эпюры скоростей в зоне осветления

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 (уравнения 1-3) работы эрлифтного биореактора при различных интенсивностях аэрации и нагрузках по очищаемому стоку. Полученные результаты позволяют определить зависимость максимальной вертикальной скорости в осветлителе как функцию интенсивности циркуляции  $I_{ц}$  и нагрузки на зеркало защитной зоны осветлителя. В программном комплексе Data Fit получена зависимость вида:

$$V_s = 1,125 \cdot 1,013^{I_{ц}} \cdot q_s^{0.17}, \quad (14)$$

где  $V_s$  – максимальная вертикальная скорость в осветлителе эрлифтного биореактора, мм/с.

Решая совместно зависимости (13) и (14), получим уравнение для определения максимальной вертикальной скорости:

$$V_s = 0,95 \cdot C_{\text{ВВ}}^{0,2023} \cdot a_i^{0,0767} \cdot e^{0,0112I_{ц}}. \quad (15)$$

Данная зависимость расширяет возможности использования формулы (13) и, по сути, представляет из себя **мнимую максимальную гидравлическую крупность** частиц активного ила, выносимых из самообновляющегося взвешенного слоя при иловом индексе 80-100 см<sup>3</sup>/г.

Способ определения мнимой гидравлической крупности 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.

Приведенные зависимости (1-15) достаточно полно описывают все гидравлические процессы и в зоне аэрации и в самообновляющемся взвешенном слое активного ила в эрлифтном биореакторе.

Для описания биологических процессов в сооружении с одновременной нитри-денитрификацией (в том числе эрлифтных биореакторов) предложена новая модель активного ила – **ASM3P-2SND**, которая:

- использует теорию эндогенного дыхания микроорганизмов без разделения растворенного субстрата на ЛЖК (летучие жирные кислоты) и иную органику;

- учитывает преобразования соединений фосфора при жизнедеятельности ординарных гетеротрофов и нитри-денитрификации;

- описывает двухступенчатую нитри-денитрификацию (2 окислительных и 2 восстановительных процесса), а именно: автотрофные процессы нитритации и нитратации, гетеротрофные процессы восстановления нитрата и нитрита;

- учитывает диффузионные ограничения одновременности (симультианности) процессов нитри-денитрификации.

В модель ASM3P-2SND включено 19 процессов. Скорости этих реакций на основании кинетики Моно приведены в таблице 1, отличия от существующих моделей выделены жирным шрифтом.

Таблица 1 - Процессы ASM3P-2SND и выражения скорости реакций

№	Процесс	Скорость
1	Гидролиз	$k_H \cdot (X_S/X_H)/(K_X+X_S/X_H) \cdot X_H$
2	Аэробное накопление $X_{STO}$	$k_{STO} \cdot [S_O/(K_{O,H}+S_{O2})] \cdot [S_S/(K_{SS,H}+S_S)] \cdot X_H$
3	Аноксидное накопление $X_{STO}$ при $NO_3-NO_2$	$k_{STO} \cdot \eta_{NO_3} \cdot [K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O} \cdot S_{O2})] \cdot [S_{NO_3}/(K_{NO_3,H}+S_{NO_3})] \cdot [K_{D,SS} \cdot S_S/(K_{SS,H}+K_{D,SS} \cdot S_S)] \cdot X_H$
4	Аноксидное накопление $X_{STO}$ при $NO_2-N_2$	$k_{STO} \cdot \eta_{NO_2} \cdot [K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O} \cdot S_{O2})] \cdot [S_{NO_2}/(K_{NO_2,H}+S_{NO_2})] \cdot [K_{D,SS} \cdot S_S/(K_{SS,H}+K_{D,SS} \cdot S_S)] \cdot X_H$
5	Аэробный рост $X_H$	$\mu_H \cdot [S_{O2}/(K_{O,H}+S_{O2})] \cdot [S_{NH_4}/(K_{NH_4,H}+S_{NH_4})] \cdot [S_{ALK}/(K_{HCO,H}+S_{ALK})] \cdot [S_{PO_4}/(K_{PO_4,H}+S_{PO_4})] \cdot [(X_{STO}/X_H)/(K_{STO}+X_{STO}/X_H)] \cdot X_H$
6	Аноксидный рост $X_H$ (денитрификация) $NO_3-NO_2$	$\mu_H \cdot \eta_{NO_3} \cdot [K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O} \cdot S_{O2})] \cdot [S_{NO_3}/(K_{NO_3,H}+S_{NO_3})] \cdot [S_{NH_4}/(K_{NH_4,H}+S_{NH_4})] \cdot [S_{ALK}/(K_{HCO,H}+S_{ALK})] \cdot [S_{PO_4}/(K_{PO_4,H}+S_{PO_4})] \cdot [(X_{STO}/X_H)/(K_{STO}+X_{STO}/X_H)] \cdot X_H$
7	Аноксидный рост $X_H$ (денитрификация) $NO_2-N_2$	$\mu_H \cdot \eta_{NO_2} \cdot [K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O} \cdot S_{O2})] \cdot [S_{NO_2}/(K_{NO_2,H}+S_{NO_2})] \cdot [S_{NH_4}/(K_{NH_4,H}+S_{NH_4})] \cdot [S_{ALK}/(K_{HCO,H}+S_{ALK})] \cdot [S_{PO_4}/(K_{PO_4,H}+S_{PO_4})] \cdot [(X_{STO}/X_H)/(K_{STO}+X_{STO}/X_H)] \cdot X_H$
8	Аэробное эндогенное дыхание $X_H$	$b_{H,O_2} \cdot [S_{O2}/(K_{O,H}+S_{O2})] \cdot X_H$
9	Аноксидное эндогенное дыхание $X_H$ $NO_3-NO_2$	$b_{H,O_2} \cdot \eta_{H,endNO_3} \cdot [K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O} \cdot S_{O2})] \cdot [S_{NO_3}/(K_{NO_3,H}+S_{NO_3})] \cdot X_H$
10	Аноксидное эндогенное дыхание $X_H$ $NO_2-N_2$	$b_{H,O_2} \cdot \eta_{H,endNO_2} \cdot [K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O} \cdot S_{O2})] \cdot [S_{NO_2}/(K_{NO_2,H}+S_{NO_2})] \cdot X_H$
11	Аэробное разложение $X_{STO}$	$b_{STO,O_2} \cdot [S_{O2}/(K_{O,H}+S_{O2})] \cdot X_{STO}$
12	Аноксидное разложение $X_{STO}$ $NO_3-NO_2$	$b_{STO,O_2} \cdot \eta_{H,endNO_3} \cdot [K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O} \cdot S_{O2})] \cdot [S_{NO_3}/(K_{NO_3,H}+S_{NO_3})] \cdot X_{STO}$
13	Аноксидное разложение $X_{STO}$ $NO_2-N_2$	$b_{STO,O_2} \cdot \eta_{H,endNO_2} \cdot [K_{O,H}/(K_{O,H}+K_{D,O} \cdot S_{O2})] \cdot [S_{NO_2}/(K_{NO_2,H}+S_{NO_2})] \cdot X_{STO}$
14	Рост $X_{AOB}$ (Нитритация)	$\mu_{AOB} \cdot [S_{O2}/(K_{O,AOB}+S_{O2})] \cdot [S_{NH_4}/(K_{NH_4,AOB}+S_{NH_4})] \cdot [S_{PO_4}/(K_{PO_4,A}+S_{PO_4})] \cdot [S_{ALK}/(K_{HCO,A}+S_{ALK})] \cdot X_{AOB}$
15	Аэробное эндогенное дыхание $X_{AOB}$	$b_{AOB} \cdot [S_{O2}/(K_{O,AOB}+S_{O2})] \cdot X_{AOB}$
16	Аноксидное эндогенное дыхание $X_{AOB}$	$b_{AOB} \cdot \eta_{AOB} \cdot [K_{O,AOB}/(K_{O,AOB}+S_{O2})] \cdot [S_{NO_3}/(K_{NO_3,H}+S_{NO_3})] \cdot X_{AOB}$
17	Рост $X_{NOB}$ (Нитратация)	$\mu_{NOB} \cdot [S_{O2}/(K_{O,NOB}+S_{O2})] \cdot [S_{NH_4}/(K_{NH_4,H}+S_{NH_4})] \cdot [S_{NO_2}/(K_{NO_2,NOB}+S_{NO_2})] \cdot [S_{PO_4}/(K_{PO_4,A}+S_{PO_4})] \cdot [S_{ALK}/(K_{HCO,A}+S_{ALK})] \cdot X_{NOB}$
18	Аэробное эндогенное дыхание $X_{NOB}$	$b_{NOB} \cdot [S_{O2}/(K_{O,NOB}+S_{O2})] \cdot X_{NOB}$
19	Аноксидное эндогенное дыхание $X_{NOB}$	$b_{NOB} \cdot \eta_{NOB} \cdot [K_{O,NOB}/(K_{O,NOB}+S_{O2})] \cdot [S_{NO_3}/(K_{NO_3,H}+S_{NO_3})] \cdot X_{NOB}$

Компоненты предложенной модели активного ила, а также параметры, предполагаемые к калибровке в рамках данной работы приведены в таблице 2. Остальные стехиометрические и кинетические параметры процессов из таблицы 1 принимаются по справочным данным, и, при необходимости, также могут калиброваться.

В предложенной имитационной модели коэффициенты, учитывающие диффузионные ограничения при одновременной нитри-денитрификации

введены только для кислорода  $S_O$  и органического субстрата  $S_S$  (соответственно, коэффициенты  $K_{D,O}$  и  $K_{D,SS}$ ).

Таблица 2 - Компоненты и калибруемые параметры ASM3P-2SND

Группа	Наименование	Обозн.	Ед. изм.
<b>Компоненты системы</b>	Растворенный кислород	$S_O$	- г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Растворенная биоразлагаемая органика	$S_S$	г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Аммонийные соединения ( $NH_4^+ + NH_3$ )	$S_{NH}$	г N.м <sup>-3</sup>
	Нитрит ( $NO_2$ )	$S_{NO_2}$	г N.м <sup>-3</sup>
	Нитрат ( $NO_3$ )	$S_{NO_3}$	г N.м <sup>-3</sup>
	Растворенный газообразный азот	$S_{N_2}$	г N.м <sup>-3</sup>
	Фосфат	$S_{PO_4}$	г P.м <sup>-3</sup>
	Щелочность ( $HCO_3^-$ )	$S_{ALK}$	моль $HCO_3^-$ .м <sup>-3</sup>
	Растворенная не биоразлагаемая органика	$S_I$	г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Нерастворенная не биоразлагаемая органика	$X_I$	г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Нерастворенная биоразлагаемая органика	$X_S$	г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Ординарные гетеротрофы	$X_H$	г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Накопленный продукт в ординарных гетеротрофах	$X_{STO}$	г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Автотрофные нитрификаторы ( $NH^+$ в $NO_2$ ) АОВ	$X_{AOB}$	г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Автотрофные нитрификаторы ( $NO_2$ в $NO_3$ ) NOB	$X_{NOB}$	г ХПК.м <sup>-3</sup>
	Взвешенные вещества	$X_{TSS}$	г м <sup>-3</sup>
<b>Калибруемые параметры</b>			
<b>Параметры 2SN</b>	Понижающий коэффициент денитрификации $NO_3-NO_2$	$\eta_{NO_3}$	
	Понижающий коэффициент денитрификации $NO_2-N_2$	$\eta_{NO_2}$	
	Максимальная скорость роста автотрофов $X_{AOB}$	$\mu_{AOB}$	сут <sup>-1</sup>
	Максимальная скорость роста автотрофов $X_{NOB}$	$\mu_{NOB}$	сут <sup>-1</sup>
<b>P-параметры</b>	Содержание фосфора P в нерастворенном органическом веществе $X_S$	$i_{P,XS}$	г P.г $X_S^{-1}$
<b>D-параметры (диффузионные ограничения)</b>	Коэффициент понижения $S_O$ за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,O}$	
	Коэффициент понижения $S_S$ за счет диффузии при денитрификации	$K_{D,SS}$	

Оставлены без внимания диффузионные ограничения для соединений азота  $S_{NH}$ ,  $S_{NO_2}$ ,  $S_{NO_3}$ . 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. 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 12.

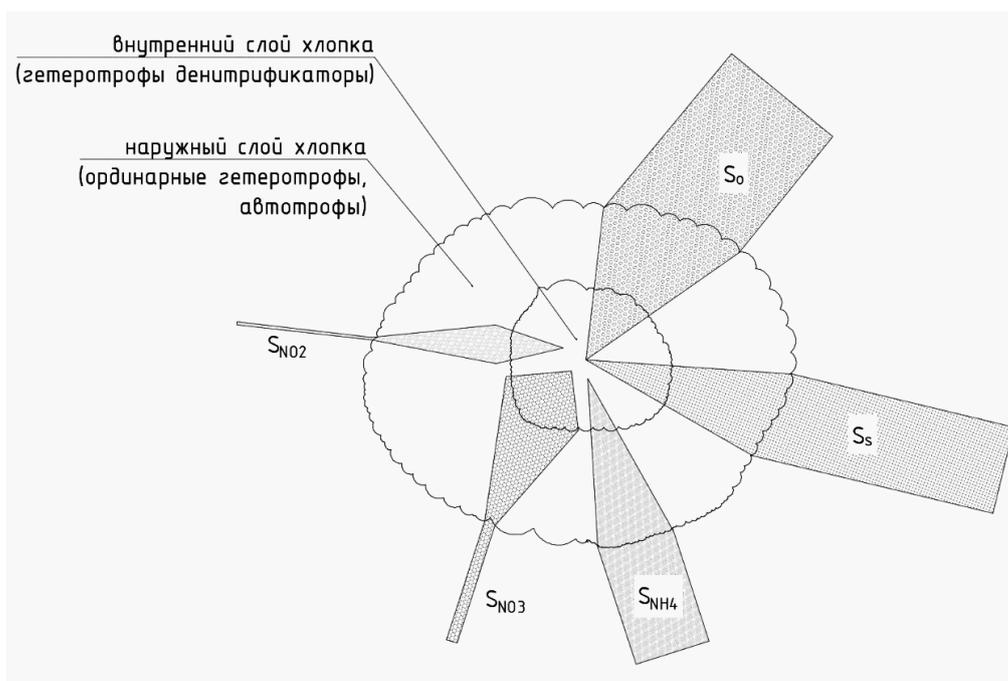


Рисунок 12 – Схематичное отображение допущений по диффузионным ограничениям в ASM3P-2SND

Проверка сходимости, настройка и калибровка данной модели выполнялась в натуральных и опытно-промышленных условиях. Предложенная 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 хлопья активного ила при одновременной нитри-денитрификации.

В четвертой главе описаны опытно-промышленные и натурные исследования технологии биологической очистки с эрлифтными биореакторами.

В натуральных условиях действующих сооружений устанавливались значения коэффициентов диффузионных ограничений  $K_{D,O}$  и  $K_{D,SS}$  совместно с проверкой сходимости, настройкой и калибровкой предложенной имитационной модели ASM3P-2SND. Исследования проводились на очистных сооружениях пгт. Новый Свет Старобешевского района ДНР на аэротенке-отстойнике №4. В схеме очистки до рассматриваемого биореактора имеются сооружения механической очистки и усреднения, а после него – сооружения доочистки с прикрепленной биомассой. Эти сооружения в данной работе не рассматривались.

Аэротенк-отстойник №4 представляет собой цилиндрический резервуар диаметром 8 м с коническим дном, внутри которого установлен затопленный эрлифт. Размеры затопленного эрлифта в плане – 2,6x2,6 м. Внутри аэрационной колонны установлена гребенка тканевых аэраторов диаметром 100 мм (Рисунок 13).

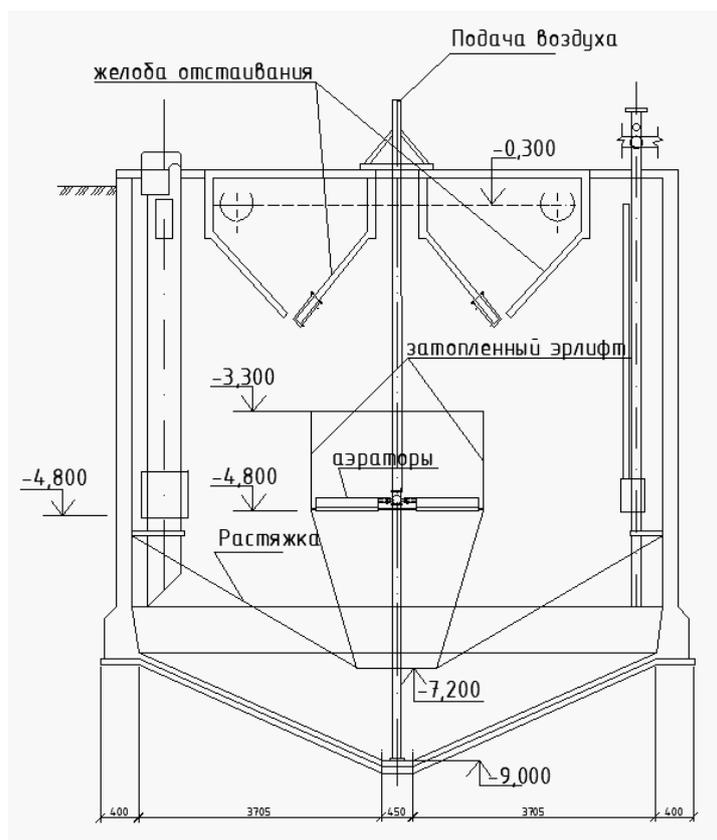


Рисунок 13 – Чертеж аэротенка-отстойника с затопленной эрлифтной системой аэрации

Исследования биологической очистки с одновременной нитриденитрификацией на аэротенке-отстойнике №4 проводились в период с 05.07.2023 г. по 25.07.2023 г. В этот период фиксировались расходные характеристики подаваемых на сооружение сточных вод ( $q_1$ , м<sup>3</sup>/сут, м<sup>3</sup>/ч), отводимого избыточного активного ила ( $q_{\text{exc}}$ , м<sup>3</sup>/сут), расход воздуха, подаваемого на сооружение ( $Q_{\text{air}}$ , м<sup>3</sup>/сут).

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 07.07.2023 г. в сутки подавалось 7000 м<sup>3</sup> воздуха, а после – 7950 м<sup>3</sup>. Результаты измерений приведены в таблице 3.

По зависимостям (1-3), (11) для сооружения определены циркуляционный расход  $q_{\text{air}}$ , м<sup>3</sup>/сут (30 000 – 33 000) и коэффициент использования кислорода (составил 9,74%).

Указанные значения гидравлических параметров подставляются в модель ASM3P-2SND в качестве исходных данных. В программной среде CellDesigner заданы все биологические процессы, а также поступление, отвод сточных вод и избыточного ила, рециркуляция внутри сооружения, стехиометрические и кинетические параметры биологической очистки и перегородок. При этом задавались и предположительные значения («guess value») калибруемых величин.

Таблица 3. Результаты измерения.

Дата	Q <sub>1</sub> , м <sup>3</sup> /сут	Аммоний-ион, мг/дм <sup>3</sup>	N-NH <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Нитриты, мг/дм <sup>3</sup>	N-NO <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Нитраты, мг/дм <sup>3</sup>	N-NO <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Фосфаты, мг/дм <sup>3</sup>	P-PO <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	ХПК, O <sub>2</sub> мг/дм <sup>3</sup>	ХПКф, O <sub>2</sub> мг/дм <sup>3</sup>	БПК, O <sub>2</sub> мг/дм <sup>3</sup>	Свв, мг/дм <sup>3</sup>	a <sub>1</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	
															На входе
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 <sub>вых</sub> , м <sup>3</sup> /сут	На выходе													
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	

**Проверка на сходимость, настройка и калибровка** имитационной модели выполнялась по следующей методике:

1. Для начала, с использованием предполагаемых значений, выполнялась проверка системы на сходимость. То есть, система решалась тремя разными математическими аппаратами, встроенными в CellDesigner: SOSlib, COPASI, SimalationCore.

Поскольку все три 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. Если концентрации компонентов каким-либо образом изменяются, система не настроена и нуждается в корректировке начальных значений 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  $\mu_{AOB}$ ,  $\mu_{NOB}$  до достижения очистки по азоту аммонийному  $S_{NH_4}$  до фактических значений. Именно  $S_{NH_4}$  определен как наиболее чувствительный параметр к указанным коэффициентам.

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

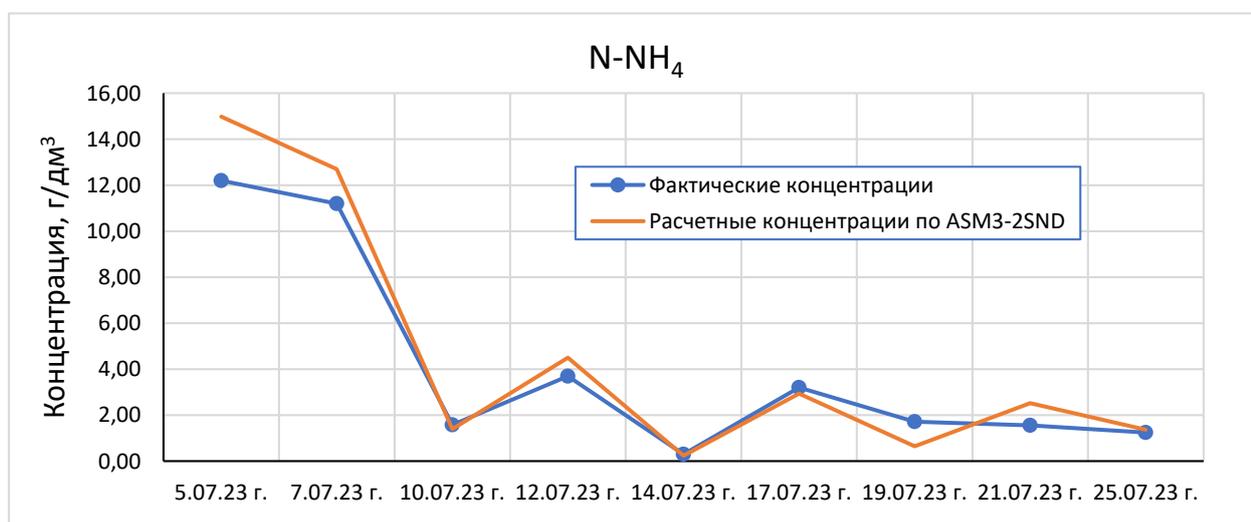
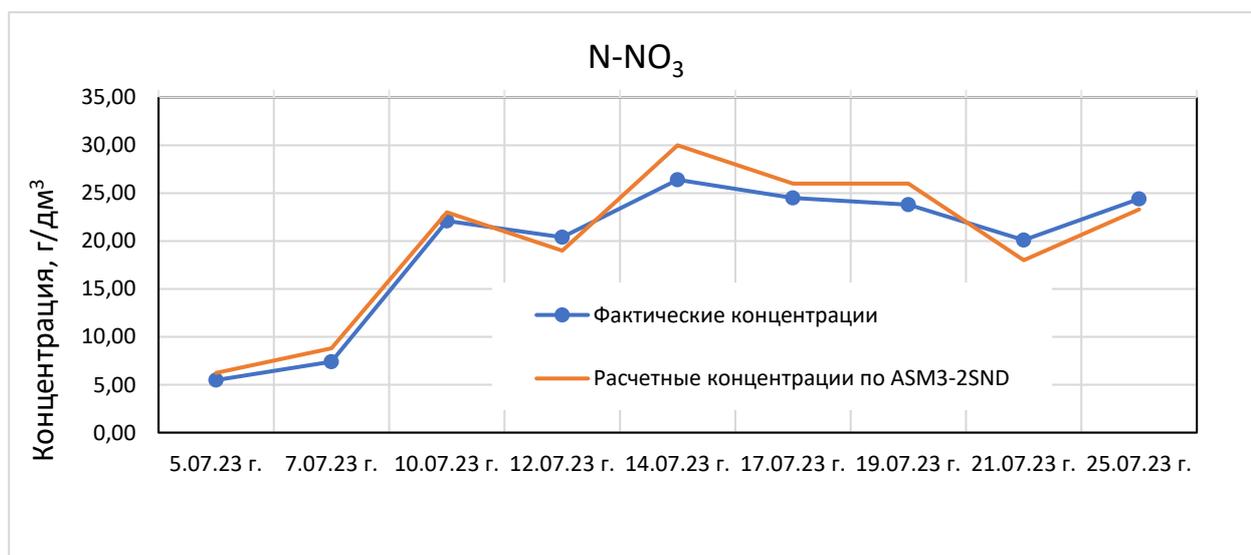
6. Проверяется необходимость повторной настройки модели (пункт 2 данной методики). В случае действий по настройке, калибровку (пункты 3-6) следует провести снова.

На основании изложенной методики (отработанной в данном исследовании), выполнена калибровка модели ASM3P-2SND для аэротенка-отстойника №4 очистных сооружений пгт. Новый Свет. Результаты калибровки представлены в таблице 4.

Расчетные значения по ASM3P-2SND в сравнении с фактическими показателями качества очистки по азоту аммонийному и фосфатам (для примера) представлены на рисунках 14, 15. Таким образом, можно утверждать о калибруемости предложенной имитационной модели и ее близком соответствии протекающим в натуральных условиях биологическим процессам очистки. Средняя точность модели – 87%.

Таблица 4 - Полученные значения калибруемых величин по ASM3P-2SND

Калибруемый параметр	Обозн.	Ед.изм.	Значение
Понижающий коэффициент денитрификации $\text{NO}_3\text{--NO}_2$	$\eta_{\text{NO}_3}$		0,1
Понижающий коэффициент денитрификации $\text{NO}_2\text{--N}_2$	$\eta_{\text{NO}_2}$		0,1
Максимальная скорость роста $X_{\text{AOB}}$	$\mu_{\text{AOB}}$	$\text{сут}^{-1}$	0,4
Максимальная скорость роста $X_{\text{NOB}}$	$\mu_{\text{NOB}}$	$\text{сут}^{-1}$	0,9
Содержание P в $X_S$	$i_{\text{P},X_S}$	$\frac{\text{г P}}{\text{г } X_S}$	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

Рисунок 14 – Результаты калибровки по N -NH<sub>4</sub> на выходе из сооруженияРисунок 15 – Результаты калибровки по N -NO<sub>3</sub> на выходе из сооружения

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. Результаты наблюдений представлены схематично на рисунке 16.

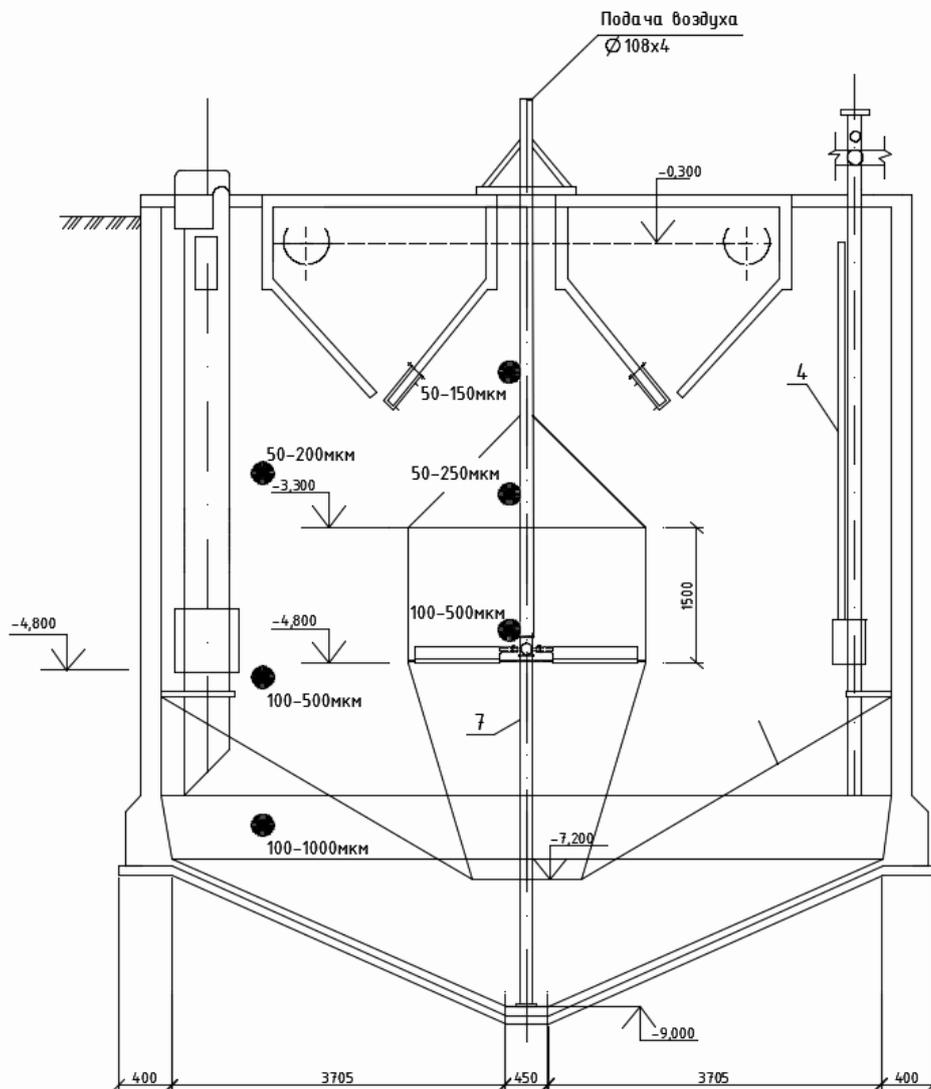


Рисунок 16 – Наблюдаемый фракционный состав ила в различных точках (●) аэротенка-отстойника

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.

Анализируя эффективность очистки в аэротенке-осветлителе, отмечено, что соотношение БПК<sub>5</sub>:N в поступающем стоке колеблется в пределах 3,6...4,9. Такие соотношения считаются приемлемыми для проведения ступенчатой нитри-денитрификации, 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 БПК<sub>5</sub>: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.

Для исследования эффективности биологической очистки сточных вод в схемах с эрлифтными биореакторами в условиях соотношения БПК:N < 5,5, а также для проверки предложенных в главе 3 диссертации зависимостей проведены опытно-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.

Опытно-промышленная установка разработана исходя из основных теоретических и эмпирических положений концепции БОСЭБ и расположена в здании решеток КНС № 52 г. Донецка. Забор сточных вод на обработку осуществляется после предварительной механической очистки (процеживания). В рассмотренной серии экспериментов установка работала по схеме, представленной на рисунке 17.

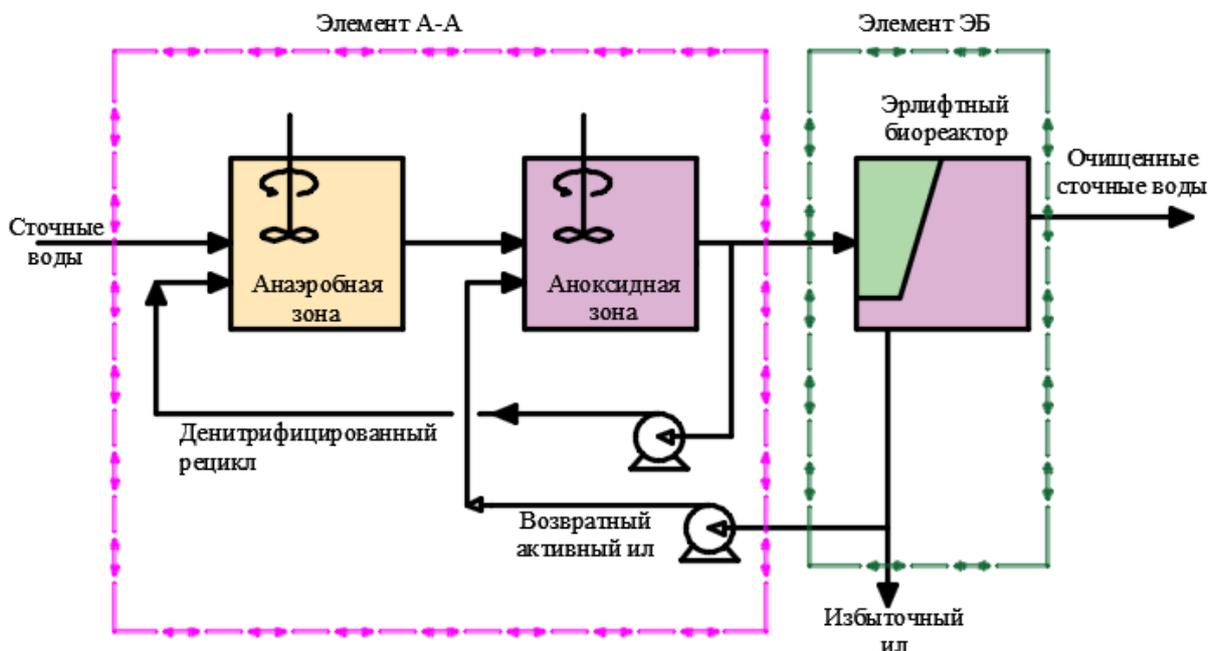


Рисунок 17 – Принципиальная схема опытно-промышленной установки в рассмотренной серии экспериментов

Основные параметры опытно-промышленной установки приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Параметры опытно-промышленной установки

Параметр	Обознач.	Ед. изм.	Значение
Расход поступающих сточных вод	q1	м <sup>3</sup> /сут	0,95
Внутренний циркуляционный расход аэротенка	qcir	м <sup>3</sup> /сут	144
Возвратный рецикл	qr	м <sup>3</sup> /сут	0,55
Денитрифицированный рецикл	qr1	м <sup>3</sup> /сут	3
Расход избыточного ила	qexс	м <sup>3</sup> /сут	0,012
Расход подаваемого воздуха	qair	м <sup>3</sup> /ч	0,75
Коэффициент использования кислорода	kisp		0,0455
Объем анаэробного реактора	W3	м <sup>3</sup>	0,047
Объем аноксидного реактора	W	м <sup>3</sup>	0,047
Объем зоны насыщения кислородом	W1	м <sup>3</sup>	0,0225
Объем зоны потребления кислорода	W2	м <sup>3</sup>	0,425

К исходным факторам опытно-промышленной установки относится также качественный состав поступающих сточных вод. Исходный состав поступающих сточных вод на очистку приведен в таблице 6.

Таблица 6 - Изменение состава сточных вод

Дата	ХПК, гО/м <sup>3</sup>	БПК <sub>5</sub> , гО/м <sup>3</sup>	Р-РО <sub>4</sub> гР/м <sup>3</sup>	N-NH <sub>4</sub> гN/м <sup>3</sup>
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

Результаты измерений при работе системы биологической очистки приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Результаты работы полупромышленной установки БОСЭБ

Дата	$S_{NH_4}^{A/A}$	$S_{NH_4}^{оч}$	$S_{NO_3}^{A/A}$	$S_{NO_3}^{оч}$	$S_{PO_4}^{A/A}$	$S_{PO_4}^{оч}$	$XPK_{\phi}^{A/A}$	$XPK_{\phi}^{оч}$	$a_i$	$C_{BВ}^{оч}$
	гN/м <sup>3</sup>	гN/м <sup>3</sup>	гN/м <sup>3</sup>	гN/м <sup>3</sup>	гP/м <sup>3</sup>	гP/м <sup>3</sup>	гO <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>	гO <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>	г/м <sup>3</sup>	г/м <sup>3</sup>
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 «А/А» в таблице 7 указывает на значение параметра на выходе из блока «анаэробный-аноксидный реактор». Индекс «оч» соответствует значению параметра на выходе из эрлифтного биореактора.

Для калибровки модели, в программной среде CellDesigner заданы все биологические процессы, а также поступление, отвод сточных вод и избыточного ила, рециркуляция внутри сооружения и перегородки между зонами. Далее, согласно разработанной **методики**, выполнена проверка на сходимость, настройка и калибровка имитационной модели. Результаты калибровки представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Полученные значения калибруемых величин

Калибруемый параметр	Обозн.	Ед.изм.	Значение
Понижающий коэффициент денитрификации $NO_3-NO_2$	$\eta_{NO_3}$		0,2
Понижающий коэффициент денитрификации $NO_2-N_2$	$\eta_{NO_2}$		0,2
Максимальная скорость роста $X_{AOB}$	$\mu_{AOB}$	сут <sup>-1</sup>	0,4
Максимальная скорость роста $X_{NOB}$	$\mu_{NOB}$	сут <sup>-1</sup>	1,1
Содержание P в $X_S$	$i_{P,XS}$	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 18-20.

Концентрация нитрит-иона как в эксперименте, так и в расчетной модели составила менее 0,1 мг/дм<sup>3</sup> по N, поэтому на калибровочных графиках не представлена. Средняя точность модели составила 89%.

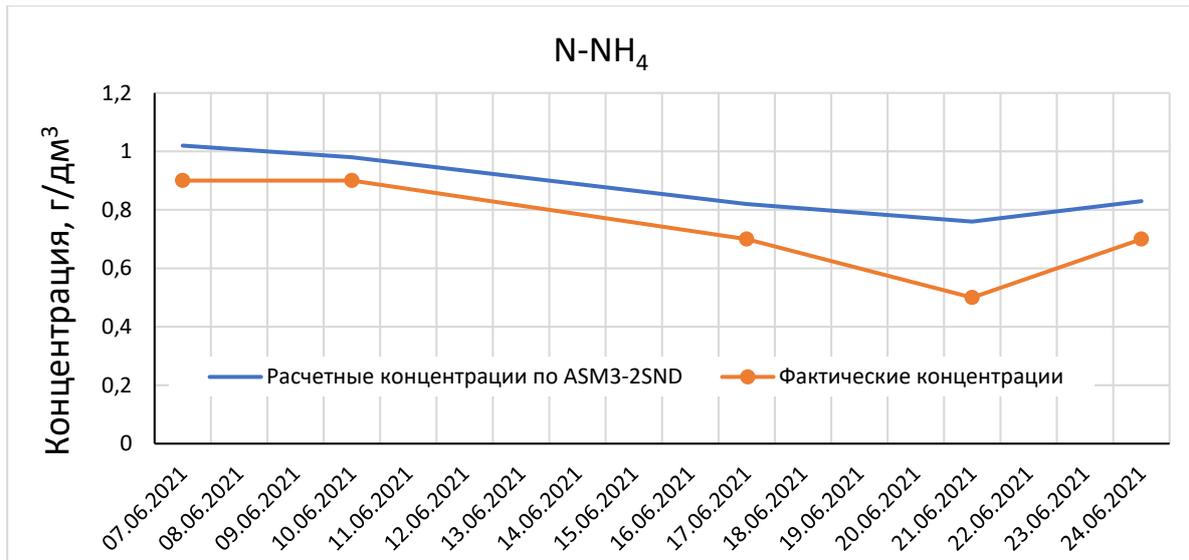


Рисунок 18 – Результаты калибровки по N -NH<sub>4</sub> на выходе из сооружения

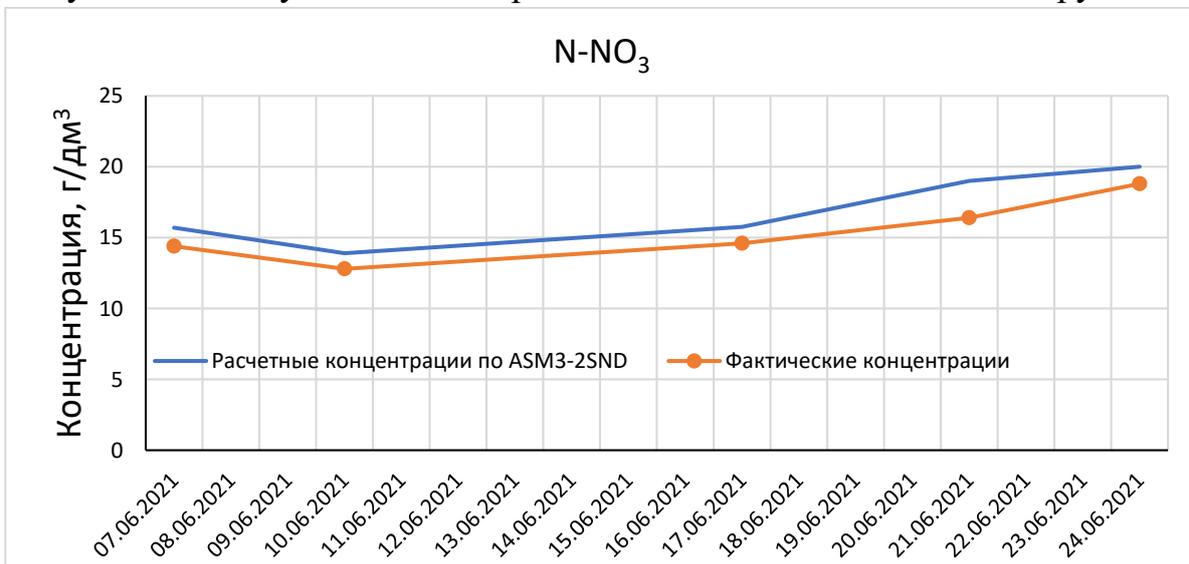


Рисунок 19 – Результаты калибровки по N -NO<sub>3</sub> на выходе из сооружения

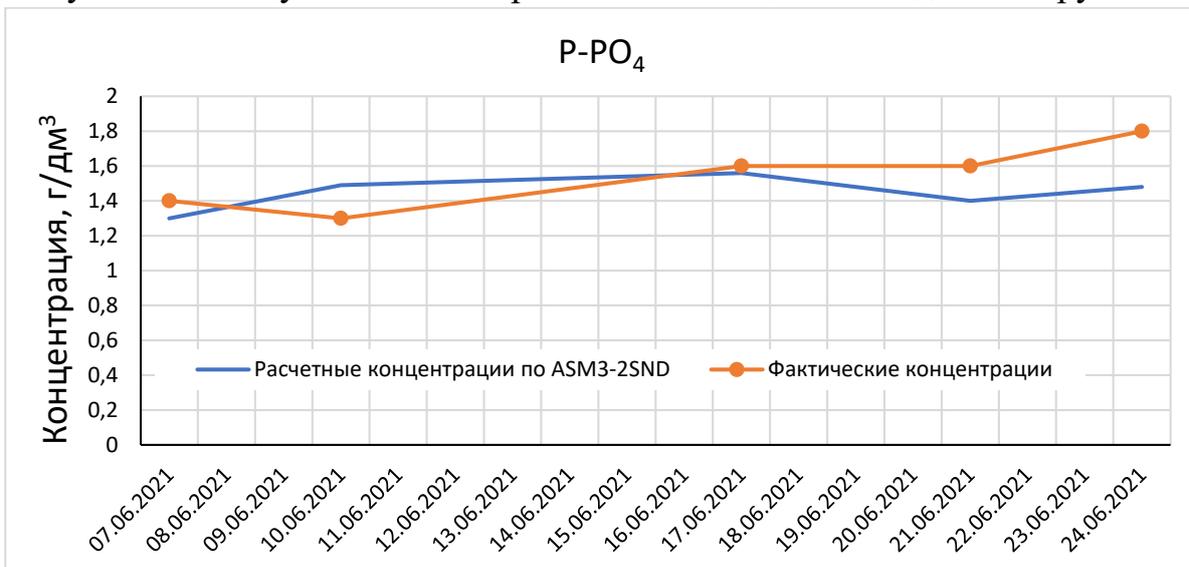


Рисунок 20 – Результаты калибровки по P -PO<sub>4</sub> на выходе из сооружения

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  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  при постоянной нагрузке на осветлитель. Результаты исследований приведены на рисунке 21.

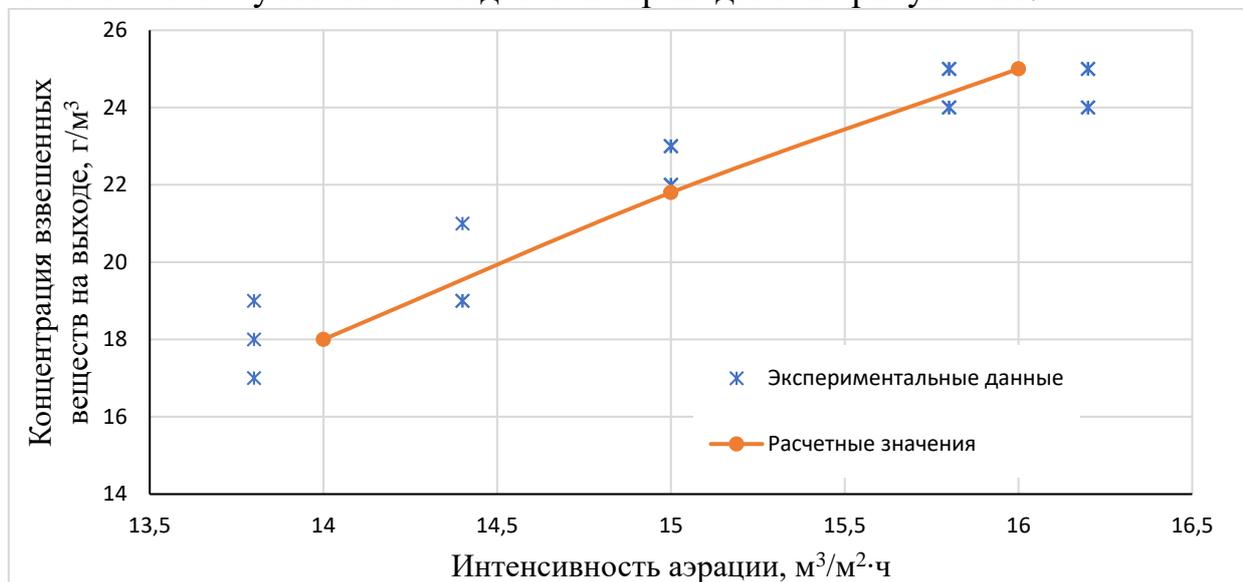


Рисунок 21 – Результаты эксперимента по определению качества осветления в эрлифтном биореакторе

Расчетные значения эффективности осветления определены совместным решением системы (3) и уравнения (13). Таким образом, можно судить о достоверности предложенного способа расчета самообновляющегося взвешенного слоя.

Как видно из таблицы 8, значения коэффициентов понижения концентрации кислорода  $K_{D,O}$  и субстрата за счет диффузии и  $K_{D,SS}$  составляют соответственно 0,8 и 0,9. Крупность ила по глубине менялась незначительно в пределах 50...350 мкм. Глубина опытно-промышленной установки – 0,9 м. В то же время, на глубине натурной установки (ОС пгт. Новый Свет) более 8 м эти коэффициенты составляли 0,45 и 0,3 соответственно для  $K_{D,O}$  и  $K_{D,SS}$ . Таким образом, можно сделать вывод о зависимости этих коэффициентов от глубины сооружения, и, как следствие, крупности ила.

В результате опытно-промышленных исследований установлено, что разработанные для описания физических и биологических процессов в системах БОСЭБ математическая модель 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.

В пятой главе изложены данные об области применения и рекомендации на проектирование и расчет систем БОСЭБ.

Основные положения концепции БОСЭБ предусматривают четыре основные технологические схемы для очистки сточных вод с применением эрлифтных биореакторов (Рисунок 22). Область применения различных схем технологии БОСЭБ для сточных вод населенных пунктов представлена в таблице 9.

Таблица 9 - Область применения технологических схем БОСЭБ

Схема	Производительность очистки, м <sup>3</sup> /сут	Условия биологического удаления органических веществ и соединений азота	Условия биологического удаления органических веществ, соединений азота и фосфора
«ЭБ»	до 10 000	БПК <sub>5</sub> :N > 100:18	не применима
«А-ЭБ»	до 10 000	БПК <sub>5</sub> :N > 100:22	не применима
«А-А-ЭБ» и «А/А-ЭБ»	5 000 – 10 000	не требуется применять	БПК <sub>5</sub> :N > 100:19 БПК <sub>5</sub> :P > 100:1,8

Данные таблицы 9 получены путем имитационного моделирования по ASM3P-2SND для каждой из представленных на рисунке 22-х схем. Для процессов «А-А-ЭБ» и «А/А-ЭБ» дополнительно использовался модуль Bio-P (IWA). При этом все разнообразие возможных комбинаций состава исходного стока не рассматривалось, в данном исследовании были приняты соотношения форм ХПК, характерные для г. Донецк, при имитации варьировались концентрации азота аммонийного и фосфатов в исходных сточных водах.

Представлены рекомендации на проектирование и расчет систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами, утвержденные НТС Минстроя ДНР для применения проектными организациями при проектировании систем биологической очистки городских сточных вод.

В **шестой главе** приведена оценка технико-экономической эффективности технологии БОСЭБ. Основные положения и изложенные доводы позволяют предварительно оценить эффективность предложенного процесса (Таблица 10).

Таблица 10 - Укрупненная характеристика схем биологической очистки сточных вод

Технологическая схема	ИПКО	T <sub>оч</sub> , ч	I <sub>ок</sub> , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	S <sub>РЕЦ</sub>	Z <sub>ПЕР</sub>
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

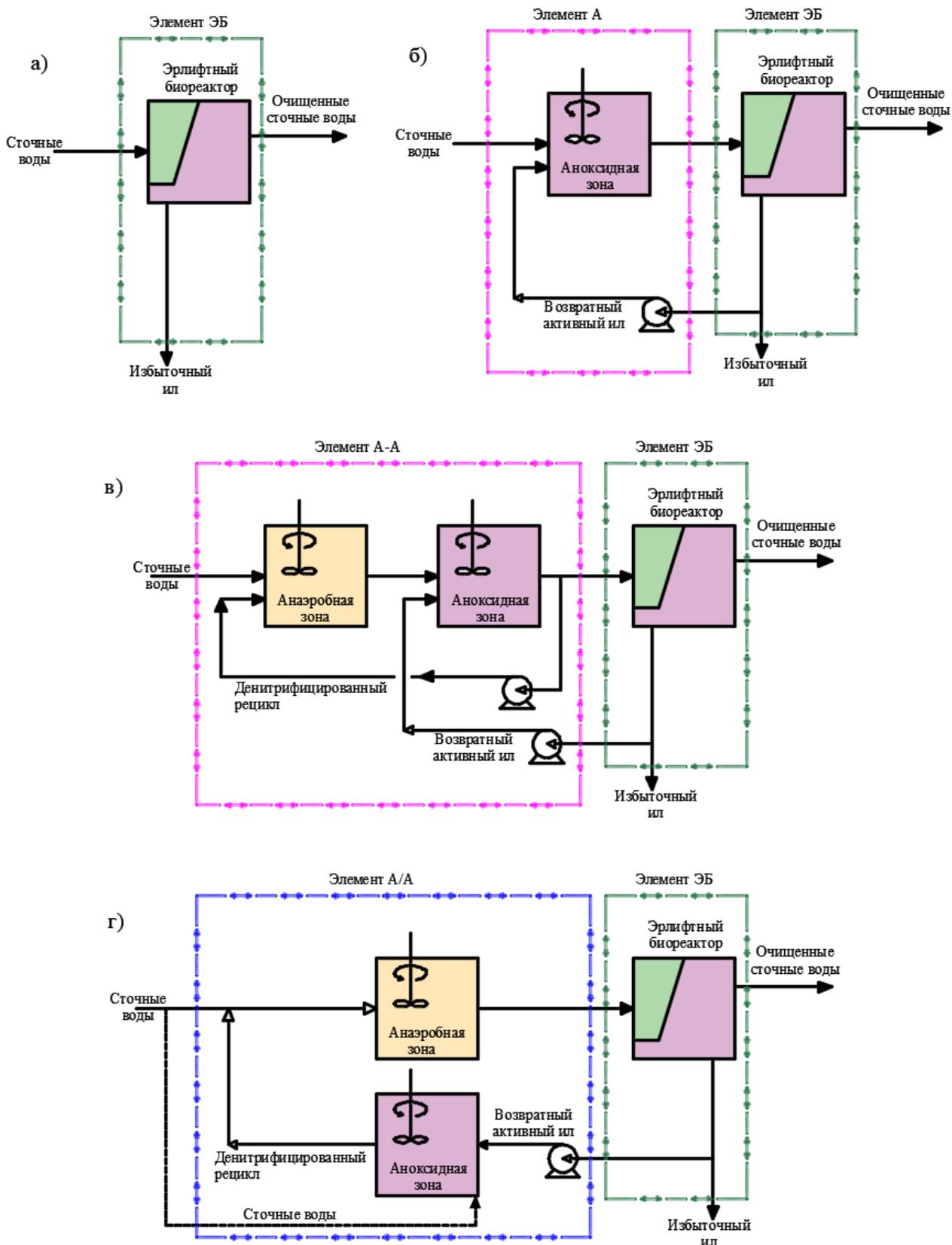


Рисунок 22 – Схемы биологической очистки от соединений азота и фосфора в рамках концепции БОСЭБ:

а) – схема «ЭБ»; б) – схема «А-ЭБ»; в) – схема «А-А-ЭБ»; г) – схема «А/А-ЭБ»

По относительным показателям процесс БОСЭБ превосходит все используемые в настоящее время технологические схемы **с учетом ограничений по использованию технологии.**

Сравнение экономической эффективности предложенной технологии выполнено относительно некоторого гипотетического МУСТ процесса для производительности 10 000 м<sup>3</sup>/сут и для объекта внедрения технологии – пгт. Карло-Марксово, г. Енакиево, ДНР.

Согласно расчетов по укрупненным показателям, стоимость жизненного цикла станции очистки сточных вод по технологии БОСЭБ для производительности 10 000 м<sup>3</sup>/сут на 21,5% ниже, чем для классической технологии удаления азота и фосфора.

Фактическая оценка эффективности технологии БОСЭБ проведена при выполнении хозяйственно-договорной тематики ГОУ ВПО «ДОННАСА» 0820-РП «Строительство объектов канализационных систем пгт. Карло-Марксово» по заказу Республиканской дирекции капитального строительства ДНР в 2021 г., на что получено положительное заключение Комитета Экологической политики при Главе ДНР и Госстройэкспертизы ДНР. Проектная производительность сооружений, согласно техническому заданию, составляла 1000 м<sup>3</sup>/сут. Сравнение выполнено с технологией BIOTAL на базе SBR-процесса той же производительности.

Согласно расчетам, стоимость жизненного цикла станции очистки сточных вод по технологии БОСЭБ для производительности 1 000 м<sup>3</sup>/сут на 18% ниже, чем для базовой технологии.

## ОСНОВНЫЕ 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 м<sup>3</sup>/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 БПК<sub>5</sub>: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 (Решение №2 от 12.12.2022 г.).

12. Результаты исследований внедрены при разработке проекта реконструкции очистных сооружений пгт. Карло-Марксово, ДНР,

производительностью 1000 м<sup>3</sup>/сут. Экономический эффект от внедрения системы БОСЭБ относительно базового варианта (технология «Biotal») составил 18% по стоимости жизненного цикла.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **- публикации в рецензируемых научных изданиях:**

1. Нездойминов, В. И. Гидродинамическая модель работы аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков // Коммунальное хозяйство городов, – 2010. – К.: Техника. – С.353-358. *(приведены основные гидродинамические зависимости работы затопленной эрлифтной аэрации в сооружениях биологической очистки сточных вод)*
2. Рожков, В. С. Энергоэффективные решения в системах подачи и распределения воды / В. С. Рожков, Д. В. Заворотный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, – 2014. – № 5(109). – С.36-39. *(проанализированы технико-экономические аспекты и требования к работе систем водоснабжения и водоотведения).*
3. 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. *(приведены зависимости для описания работы взвешенного слоя активного ила – элемента эрлифтного биореактора).*
4. 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. *(приведены результаты исследований по изучению работы самообновляющегося взвешенного слоя активного ила в части обеспечения качества очистки по взвешенным веществам).*
5. Нездойминов, В. И. Рекомендации по методике расчета вакуумной канализации для малых населенных пунктов / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Н. И. Григоренко // Строительство и техногенная безопасность, – 2017. – № 7(59). – С.105-111. *(рассмотрена общая проблематика систем канализации малых населенных пунктов).*
6. 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. *(приведены результаты лабораторных исследований по совместной работе затопленной эрлифтной аэрации и осветлителя со взвешенным слоем активного ила).*

7. Нездойминов, В. И. Методы повышения эффективности работы систем подачи-распределения воды / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Л. Г. Зайченко // Строитель Донбасса, – 2018. – № 4(5). – С.22-24. *(проанализированы требования к современным системам водоснабжения и водоотведения).*
8. Рожков, В. С. Определение параметров фильтрования природных вод на дробленном антраците / В. С. Рожков, Ю. Г. Акулова, Н. А. Гребенюк // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, – 2018. – № 5(133). – С.73-78. *(проанализированы возможности методов фильтрования для доочистки вод с пониженным содержанием взвешенных веществ)*
9. Рожков, В. С. Доочистка сточных вод на дробленном антраците в системах с эрлифтным биореактором / В. С. Рожков, П. Е. Деминов, Ю. В. Васильева // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, – 2020. – № 4(144). – С.87-90. *(приведены результаты исследований по определению эффективности доочистки сточных вод после обработки на эрлифтных биореакторах).*
10. Нездойминов, В. И. Теоретическое обоснование схем очистки сточных вод с применением эрлифтных биореакторов / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Ю. В. Васильева // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, – 2022. – № 5(157). – С.89-97. *(приведены основные теоретические положения расчета схем очистки сточных вод, включающих эрлифтные биореакторы).*
11. Рожков, В. С. Опытнo-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.
12. Нездойминов, В. И. Системы очистки городских сточных вод на базе эрлифтных биореакторов / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Д. В. Заворотный [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2023. – № 5. – С.48-55. *(приведены схемы биологической очистки сточных вод от органических веществ, соединений азота и фосфора с применением эрлифтных биореакторов).*
13. Рожков, В.С. Основные принципы и закономерности третичного отстаивания в системах биологической очистки / В. С. Рожков, М. Н. Дорцева, П. Е. Деминов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, – 2023. – № 4(162). – С.45-49. *(проанализированы перспективы использования вторичных отстойников, при реконструкции по технологии БОСЭБ, в качестве сооружений для третичной обработки сточной жидкости).*

**- публикации в зарубежных журналах, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS:**

14. Nezdoiminov, V. 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. – DOI 10.1016/j.proeng.2015.08.213. – EDN UZYGWH. *(приведены результаты исследований по определению закономерностей работы взвешенного слоя активно ила в сооружениях очистки сточных вод).*
  15. Nezdoiminov, V. Permissible parameters for the circulation rate of the sludge mixture in airlift reactor-clarifier with suspended layer / V. Nezdoiminov, D. Zavorotnyi, V. Rozhkov, P. Deminov // MATEC Web of Conferences, 29 AF Polytechnicheskaya Str. 195251, Saint-Petersburg, 19–20 ноября 2018 года. – 29 AF Polytechnicheskaya Str. 195251, Saint-Petersburg, 2018. – P.11009. – DOI 10.1051/matecconf/201824511009. – EDN GXSSO. *(приведены результаты исследований по определению граничных параметров работы эрлифтной циркуляции для обеспечения илоразделения во взвешенном слое активного ила).*
- публикации по материалам конференций:**
16. Нездойминов, В. И. Гидродинамические параметры работы аэротенков с эрлифтной системой циркуляции / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков // Сборник тезисов докладов 1 Международной научно-практ. конференции «Актуальные вопросы реформирования жилищно-коммунального хозяйства в Украине», ДонНАСА, – 2008. – Ч2. – С.34-35.
  17. Рожков, В. С. Сравнение подходов к моделированию биологической очистки сточных вод в Украине и других странах / В. С. Рожков, Ю. В. Васильева // Сборник статей 5-ой Восточно-Европейской конференции «Опыт и молодость в решении водных проблем», – Киев, – 26-28 июня 2013. – С.344-351.
  18. Нездойминов, В. И. Процессы осветления иловой смеси во взвешенном слое в сооружениях с эрлифтной системой аэрации / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный, В. С. Рожков // Технологии очистки воды "ТЕХНОВОД-2017" : Материалы X - Юбилейной Международной научно-практической конференции, Астрахань, 05–06 октября 2017 года. – Астрахань: ООО "Лик", 2017. – С.268-272.
  19. 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.

**– патенты, авторские свидетельства:**

20. 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.

**– публикации в других изданиях:**

21. Нездойминов, В. И. Совершенствование технологий биологической очистки городских сточных вод / В. И. Нездойминов, О. В. Майстренко, В. С. Рожков // Водоснабжение и водоотведение, – 2008. – №3. – С.11-13.
22. Рожков, В. С. Рекомендации по проектированию и расчету систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами / В. С. Рожков, В. И. Нездойминов – Макеевка: ГОУ ВПО «ДОННАСА», – 2022. – 30 с.