

Прислать на
предварительное
рассмотрение в
диссертационный совет
26.04.2023

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 водоснабжения,
водоотведения и охраны водных ресурсов
ФГБОУ ВО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,

доктор технических наук, профессор,

доктор технических наук, профессор,

Ведущая организация:

Защита состоится _____ 2023 г. в 10⁰⁰ 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 «_____» _____ 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 затратами на перекачивание различных объемов обрабатываемой воды между различными технологическими зонами сооружений, аэрацию, механическое перемешивание в зонах культивирования денитрифицирующих и фосфор-аккумулирующих бактерий.

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

Современные требования 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 в единой схеме биологической очистки 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 требований на станциях очистки сточных вод является применение в качестве биореакторов аэротенков с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтных биореакторов). Эти сооружения отличаются высокой степенью использования кислорода воздуха за счет особого гидродинамического

режима в сооружении. В настоящее время эти сооружения эффективно используются для очистки сточных вод от органических веществ и соединений азота, в системах обработки осадка, в качестве биохимических реакторов. Технологических решений полной биологической очистки с удалением биогенных элементов на основании эрлифтных биореакторов, на сегодняшний день не предложено.

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.

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., 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»), 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 2020г «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).

Цель и задачи исследования. Целью исследования является решение важной научно-технической проблемы – разработка эффективных технологических решений и схем биологической очистки сточных вод населенных пунктов от органических соединений и биогенных элементов с использованием эрлифтных биореакторов для симультанной нитри-денитрификации.

Для реализации указанной цели автором решены **следующие задачи:**

- на основании критического обзора и собственных исследований сформулировать требования к современным системам биологической очистки сточных вод населенных пунктов, соответствующие условиям максимальной эффективности и минимизации затрат;
- усовершенствовать схемы биологической очистки городских сточных вод от органических загрязнений и биогенных элементов путем включения в их состав высокоэффективных сооружений с симультанной нитри-денитрификацией и встроенным илоотделением;
- разработать математическую расчетную модель аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтных биореакторов) для симультанной нитри-денитрификации в схемах биологического удаления азота и фосфора;
- выполнить опытно-промышленные исследования работы систем биологической очистки с эрлифтными биореакторами (БОСЭБ) с определением параметров работы сооружений;
- разработать рекомендации на проектирование систем биологической очистки с эрлифтными биореакторами для различного характера исходного стока и производительности сооружений;
- выполнить оценку экономической эффективности 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 – влияние биохимических и гидродинамических процессов в аэротенках-осветлителях с внутренней циркуляцией на эффективность биологической очистки сточных вод.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относится биохимическое моделирование на основе ASM3+Bio-P, разработанной Международной водной ассоциацией (IWA).

Моделирование реализовано в программной среде CellDesigner, созданной The Systems Biology Institute, Токио, Япония.

Экспериментальные исследования выполнены на лабораторных и промышленной установках. Выполнены инструментальные измерения (расход воздуха, воды, растворенный кислород, рН) и химические анализы по известным действующим методикам.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- впервые сформулированы и обоснованы критерии оценки эффективности станций биологической очистки городских сточных вод, которые учитывают качество очистки, объем сооружений, расход воздуха, степень внутренних и наружных рециклов;
- обоснован принципиально новый подход к протеканию процессов симультанной нитри-денитрификации и улучшенного биологического удаления фосфора с использованием эрлифтных биореакторов;
- получены расчетные зависимости, описывающие гидродинамические процессы в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтных биореакторах) со встроенным вторичным илоразделением;
- впервые определены условия и границы работы биореакторов с затопленной эрлифтной циркуляцией для обеспечения требуемого качества очистки по взвешенным веществам и биогенным элементам;
- разработана и обоснована методика расчета систем очистки городских сточных вод от соединений азота и фосфора на базе эрлифтных биореакторов с применением подходов биохимического моделирования;
- впервые обосновано понятие «биохимического профиля» станции биологической очистки сточных вод, позволяющее в наиболее полной мере оценить эффективность процессов удаления загрязнений;
- впервые для описания процессов биологической очистки сточных вод предложено использовать биохимический инструментарий в виде программной среды CellDesigner, который позволяет прогнозировать скорости протекающих процессов.

Практическая значимость результатов исследований в следующем:

- выполнен критический анализ существующих методов и схем биологического удаления органических веществ, соединений азота и фосфора из городских сточных вод;
- разработана методика построения биохимического профиля сооружений, позволяющая всесторонне оценить эффективность работы станции очистки городских сточных вод;
- предложен усовершенствованный метод расчета систем улучшенного биологического удаления фосфора и симультанной нитри-денитрификации с применением моделирования биохимических процессов в системах с активным илом;
- разработаны рекомендации на проектирование и расчет систем биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными

биореакторами.

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»;
- пятнадцати 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. (Решение НТС Минстрой ДНР №2 от 12.12.2022 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, приемлемой 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, 2012г.;
- 5я Восточно-Европейская конференция «Опыт и молодость в решении водных проблем», г. Киев, 2013г.;
- Международная украино-японская конференция по вопросам научно-промышленного сотрудничества, г. Одесса, 2013г.;
- Первый Международный строительный форум «Строительство и архитектура», г. Макеевка, 2017г.;
- 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, ECECE 2018, Saint Petersburg, 2018.
- 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 20 работ, из которых 11 публикаций в рецензируемых научных изданиях, 2 - в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования Web of Science, 5 - в сборниках трудов международных и региональных научных конференций, 1 - патент на изобретение, другие публикации по теме диссертации - 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, общих выводов и рекомендаций, библиографического списка из 237 наименований, приложений и содержит 297 страниц, в том числе 221 страницы основного текста, 29 страниц списка использованной литературы и 47 страниц приложений.

На защиту выносятся:

- критерии для оценки эффективности станций биологической очистки городских сточных вод, которые учитывают качество очистки, объем сооружений, расход воздуха на аэрацию, степени внутренних и наружных рециклов;
- концепция БОСЭБ, которая подразумевает протекание процессов симультанной нитри-денитрификации и улучшенного биологического удаления фосфора 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, условия и границы работы этих сооружений;
- методика расчета систем очистки городских сточных вод от соединений азота и фосфора и органических веществ на базе эрлифтных биореакторов с применением подходов биохимического моделирования;
- понятие «биохимического профиля» станции биологической очистки сточных вод, позволяющая всесторонне оценить эффективность работы станции очистки городских сточных вод;
- использование для описания процессов биологической очистки сточных вод биохимического инструментария в виде программной среды CellDesigner, который позволяет прогнозировать скорости процессов, протекающих при очистке хозяйственно бытовых сточных вод.

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.

Первый раздел посвящен анализу состояния вопроса определения необходимой степени удаления органических загрязнений и биогенных элементов из городских сточных вод и существующих способов достижения требуемого качества очистки.

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, распространенные на действующих станциях очистки, не способны выполнить современные требования и нуждаются в реконструкции с переходом на наилучшие доступные технологии (НДТ).

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 с схем станции очистки городских сточных вод.

Установлено, что наиболее распространенные схемы одноилловой биологической очистки сточных вод основываются на создании различных

зон пребывания иловой смеси с протеканием в них различных биохимических процессов. К ним относятся процессы потребления микроорганизмами органических соединений, биологическая нитри-денитрификация, улучшенное удаление фосфора.

Наиболее распространенные схемы очистки проанализированы с использованием предложенных критериев технико-экономической эффективности работы сооружений. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика схем биологической очистки сточных вод

Технологическая схема \ Критерий	ИПКО	T _{оч} , ч	I _{ок} м ³ /м ³	S _{РЕЦ}	Z _{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	2,0...6,0	2..3
Процессы UCT и МУСТ	8-10	16...25	22...42	1,5...7,0	2
Йоханнесбургский процесс	9-12	17...26	22...42	1,5...7,0	3
Процесс DEPHANOX	7-10	30...35	18...34	1,0...5,0	3

Приведенные в таблице 1 данные указывают, что при любой из приведенных схем очистки есть необходимость устройства рециклов иловой смеси и механического перемешивания. Эти решения требуют как капитальных вложений на приобретение оборудования, так и эксплуатационных затрат на перекачивание и перемешивание.

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 накопленного фосфора из биомассы возвратного ила с ухудшением конечного качества очистки.

На основании проведенного обзора установлена необходимость разработки энергоэффективных технологических решений и схем биологической очистки городских сточных вод от органических веществ и биогенных элементов.

Одним из наиболее перспективных путей выполнения указанных требований на станциях очистки сточных вод является применение в качестве биореакторов аэротенков с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтных биореакторов). Эти сооружения отличаются высокой степенью использования кислорода воздуха за счет особого гидродинамического режима в сооружении. В настоящее время эти сооружения эффективно используются для очистки сточных вод от органических веществ и соединений азота, в системах обработки осадка, в качестве биохимических реакторов. Технологических решений полной биологической очистки с

удалением биогенных элементов на основании эрлифтных биореакторов, на сегодняшний день не предложено.

На основании изложенного материала сформулированы задачи исследований по разработке эффективных технологических решений и схем биологической очистки сточных вод населенных пунктов от органических соединений и биогенных элементов с использованием эрлифтных биореакторов для протекания процесса симультанной нитри-денитрификации.

Во **втором разделе** приведена методология исследований. Описаны примененные теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относится биохимическое моделирование на основе ASM3+Bio-P, разработанной Международной водной ассоциацией (IWA). Моделирование реализовано в программной среде Cell Designer, созданной The Systems Biology Institute, Токио, Япония.

Экспериментальные исследования выполнены на промышленной установке биологической очистки сточных вод с эрлифтными биореакторами. 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).

В **третьем разделе** приведено описание и теоретическое 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 1.

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 2. 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.

В таких сооружениях, за счет смены аэробности условий, протекают симультанные 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.

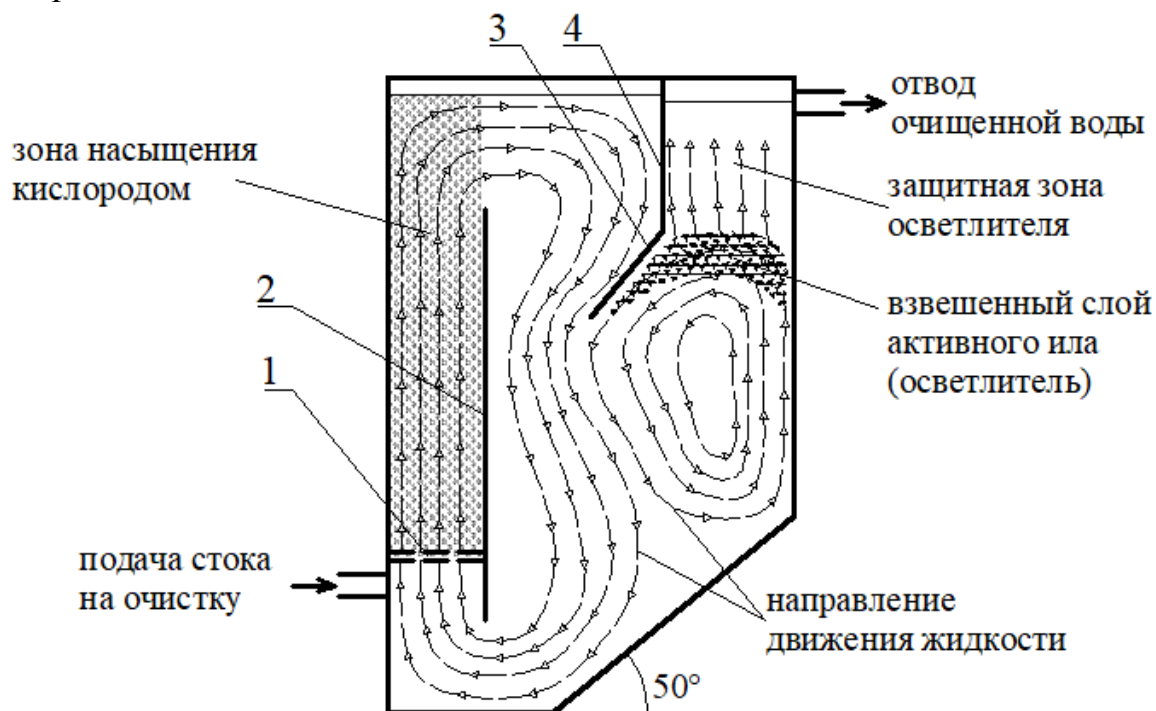


Рисунок 1 - Схема эрлифтного биореактора:

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

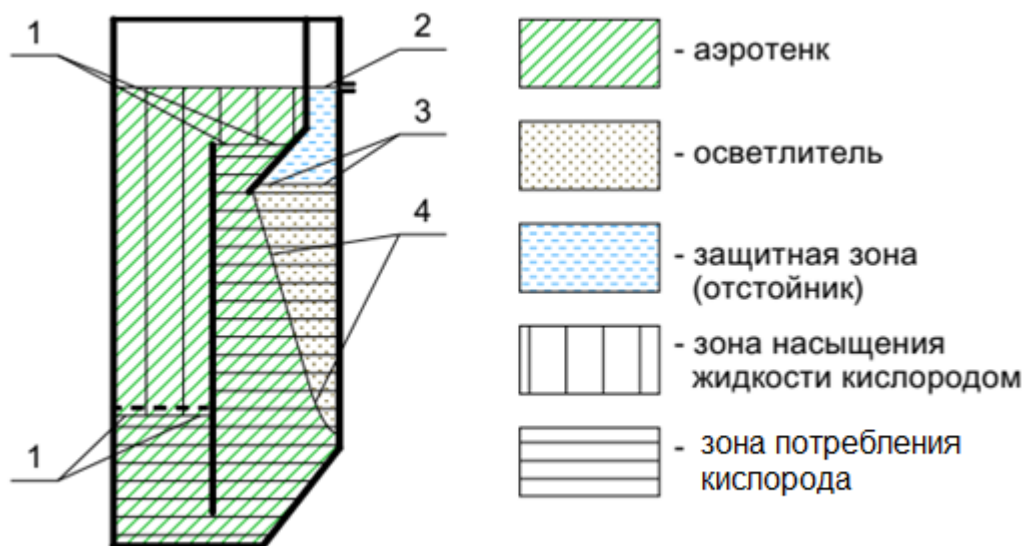


Рисунок 2 – Условное зонирование аэротенка-осветлителя (эрлифтного биореактора):

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

Для биологического удаления органических веществ и биогенных элементов из городских сточных вод в рамках концепции БОСЭБ, предложены новые технологические схемы на базе эрлифтных биореакторов. В зависимости от состава сточных вод, поступающих на очистку и необходимой степени очистки, состав сооружений в технологических схемах БОСЭБ может быть различным. Основные технологические схемы представлены на рисунке 3. 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».

Процесс «ЭБ», при котором в очистке участвует только элемент «эрлифтные биореакторы», может быть применен при соотношении БПК:N:P в сточных водах близком к 100:5:1. При повышенном содержании соединений азота необходима предварительная денитрификация (элемент «А») и, соответственно, применение схемы «А-ЭБ». Процессы «А-А-ЭБ», «А/А-ЭБ» подразумевают улучшенное биологическое удаление фосфора, что востребовано при повышенных концентрациях соединений фосфора в исходном стоке (рис. 3).

В процессе А-А-ЭБ (Рис. 3) исходные сточные воды поступают в анаэробную зону, куда также направляется денитрифицированный рецикл. В анаэробной зоне происходит высвобождение фосфатов и накопление полигидрооксиалонатов в клеточной биомассе фосфор-аккумулирующих микроорганизмов. Далее сточные воды поступают в аноксидную зону, туда же направляется возвратный рецикл для биологического удаления окисленных форм азота. После аноксидной зоны часть иловой смеси отбирается для денитрифицированного рецикла, остальная часть поступает в эрлифтный биореактор, где проходят процессы симультанной нитри-денитрификации и вторичного илоразделения. Из эрлифтного биореактора осуществляется отвод очищенной сточной жидкости (рис. 3), а также возвратного и избыточного активного ила.

В процессе А/А-ЭБ (Рис. 3) исходные сточные воды поступают с разделением потока в две зоны: анаэробную и аноксидную. В аноксидную зону, кроме того, поступает возвратный активный ил для протекания процессов биологической денитрификации и снижения концентрации нитратов. Денитрифицированный рецикл поступает в анаэробную зону, где в смеси с поступающими сточными водами, происходит высвобождение фосфатов фосфор-аккумулирующими микроорганизмами. Из анаэробной зоны иловая смесь подается в эрлифтный биореактор для проведения симультанной нитри-денитрификации и илоразделения.

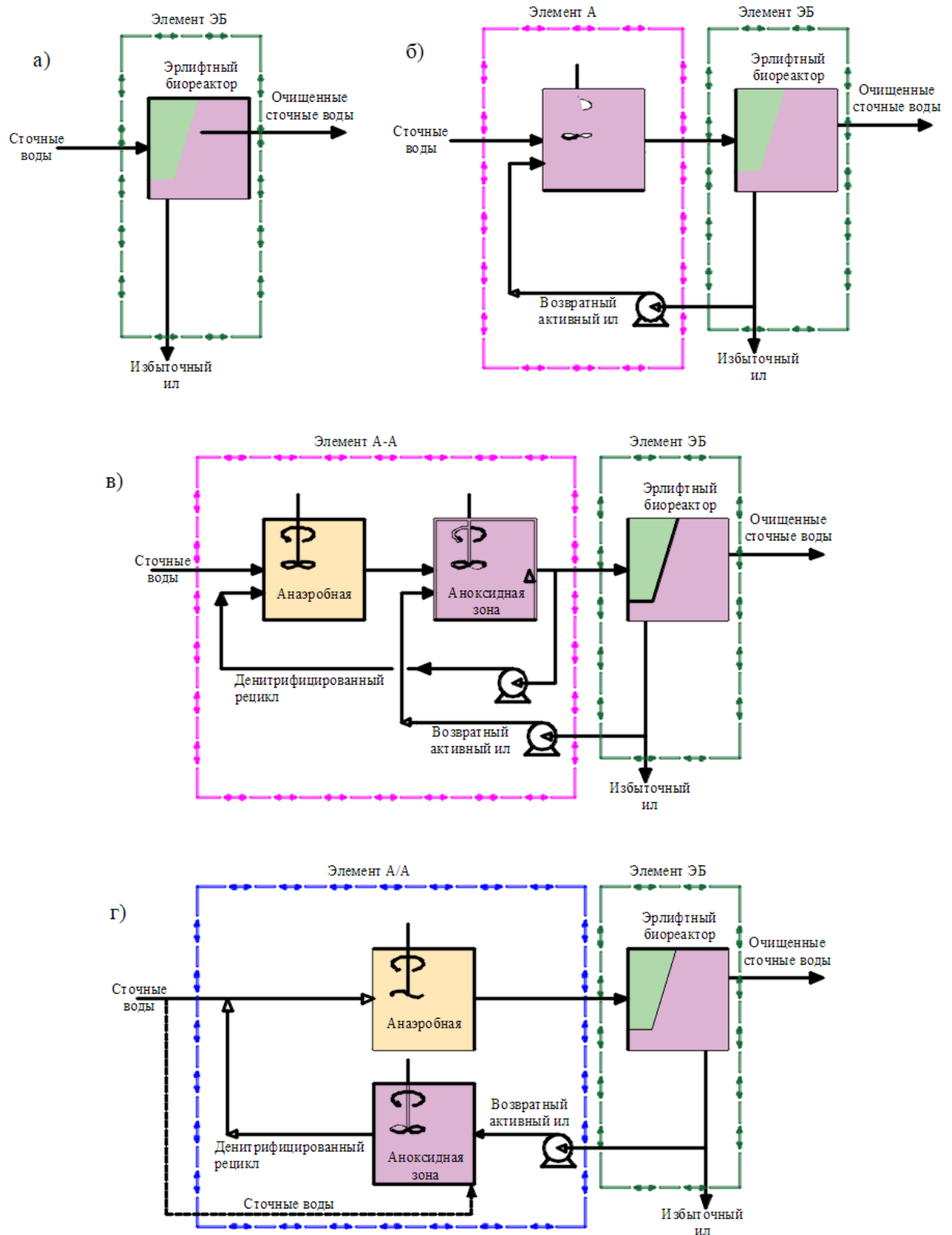


Рисунок 3 – Процессы семейства БОСЭБ. а) – схема «ЭБ»; б) – схема «А-ЭБ»; в) – схема «А-А-ЭБ»; г) – схема «А/А-ЭБ».

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

- исключается нитратный рецикл, который, составляет до 300 % от расхода сточных вод;
- перемешивание в сооружении нитри-денитрификации выполняется за счет потока жидкости, создаваемого эрлифтной циркуляцией, что исключает необходимость использования оборудования для механического перемешивания в этой зоне;
- из схемы исключается вторичный отстойник, функции по илоразделению которого выполняет взвешенный слой активного ила внутри эрлифтного биореактора. Ввиду вихревой рециркуляции взвешенного слоя, ил не пребывает долгое время в аноксидных условиях, что исключает характерные для гравитационного отстаивания выбросы загрязняющих веществ в очищенную воду;
- возвратный ил в осветлителе эрлифтного биореактора не подвергается длительному уплотнению, что исключает ухудшение его окислительных свойств и необходимость дальнейшей регенерации активного ила;
- высокая эффективность илоразделения позволяет повышать концентрацию ила в системе (повышается возраст активного ила), что положительно сказывается на эффективности очистки.

Математическое описание предложенной технологии, заключается в системах уравнений, которые можно разделить на два типа зависимостей: зависимости, описывающие биохимические процессы и уравнения физических процессов.

Биохимические процессы описываются с помощью системы дифференциальных уравнений на базе кинетики Моно (ур-е 1). Для этого использован известный подход ASM3+Bio-P, который наиболее распространен при описании очистки городских сточных вод активным илом.

Расшифровка переменных величин в системе уравнений (1) приведена в таблице 2.

Зависимость (1) описывает все биохимические процессы в системах с активным илом в рамках каждой технологической зоны. При наличии нескольких зон с различными условиями по исходным данным, требуется отдельная система уравнений для каждой из них. Так, для технологии БОСЭБ, таких зон при улучшенном биологическом удалении фосфора будет 4 (см. рис. 3): анаэробная, аноксидная, зона насыщения жидкости кислородом и потребления кислорода.

Физические уравнения, описывающим работу системы БОСЭБ, предложено сформировать по трем группам.

1. Уравнения массового баланса притока сточных вод и содержащихся в них примесей, как растворенных, так и нерастворенных.
2. Уравнения перетоков между различными технологическими зонами, рециркуляционные, возвратные и сбросные потоки.
3. Уравнения, описывающие массовый баланс в системе илоразделения.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{dS_O}{dt} = f_1(S_S, S_{NH}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H, X_{STO}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A) \\
 \frac{dS_S}{dt} = f_2(S_O, S_{NO}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PAO}, X_A) \\
 \frac{dS_{NH}}{dt} = f_3(S_O, S_S, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_{NO}}{dt} = f_4(S_O, S_S, S_{NH_4}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_{N_2}}{dt} = f_5(S_O, S_S, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_{PO_4}}{dt} = f_6(S_O, S_S, S_{NO}, S_{NH}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_{HCO}}{dt} = f_7(S_O, S_S, S_{NO}, S_{NH}, S_{PO_4}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\
 \frac{dS_I}{dt} = f_8(X_S, X_H) \\
 \frac{dX_I}{dt} = f_9(S_O, S_{NO}, X_H, X_A) \\
 \frac{dX_S}{dt} = f_{10}(X_H) \\
 \frac{dX_H}{dt} = f_{11}(S_O, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H, X_{STO}) \\
 \frac{dX_{STO}}{dt} = f_{12}(S_O, S_S, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_H) \\
 \frac{dX_{PAO}}{dt} = f_{13}(S_O, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_{PHA}) \\
 \frac{dX_{PP}}{dt} = f_{14}(S_O, S_S, S_{PO_4}, S_{NO}, S_{HCO}, X_{PHA}, X_{PAO}) \\
 \frac{dX_{PHA}}{dt} = f_{15}(S_O, S_S, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_{PP}, X_{PAO}) \\
 \frac{dX_A}{dt} = f_{16}(S_O, S_{NH_4}, S_{PO_4}, S_{HCO}) \\
 \frac{dX_{TSS}}{dt} = f_{17}\left(S_O, S_S, S_{NH_4}, S_{NO}, S_{PO_4}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}\right)
 \end{array} \right. \quad (1)$$

Таблица 2 – Компоненты системы ASM3+Bio-P

Обознач.	Наименование	Обознач.	Наименование
Растворенные компоненты		Нерастворенные компоненты	
S_O	растворенный кислород	X_H	гетеротрофная биомасса
S_S	легкоокисляемая растворенная органика	X_S	биоразлагаемая нерастворенная органика
S_{NH}	азот аммонийный	X_{STO}	накопленный внутриклеточный продукт
S_{NO}	азот нитратов и нитритов	X_{PAO}	биомасса ФАО
S_{PO_4}	ортофосфаты	X_{PP}	полифосфаты
S_{HCO}	щелочность	X_{PHA}	ПГА(полигидроксиалканоаты)
		X_A	автотрофная биомасса

Массовый баланс притока сточных вод.

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

$$\Delta C^i = \frac{t \cdot C_{in}^i \cdot q_1}{W_1}, \quad \text{г/м}^3, \quad (2)$$

где t – расчетное время приращения концентрации, сут;

C_{in}^i – концентрация i -того компонента в исходном стоке, г/м³;

q_1 – расход сточных вод, поступающих на очистку в первый реактор, м³/сут;

W_1 – объем первого реактора биологической очистки, м³.

Количество уравнений в системе по формуле (2) соответствует количеству учитываемых компонентов в исходных сточных водах. В классическом прочтении схемы очистки воды – это девять зависимостей для ASM3+Bio-P. С исходным стоком в систему поступают: легкоокисляемая растворенная органика, азот аммонийный, азот нитратов и нитритов, ортофосфаты, щелочность, биоразлагаемая нерастворенная органика, инертное растворенное и нерастворенное органическое вещество, взвешенные вещества.

Уравнения перетоков между технологическими зонами сооружений состоит из 5-ти (для процесса JNB-ЭБ) либо 6-ти (для процесса А-А-ЭБ) потоков массы. К перетокам по схеме JNB-ЭБ относятся: поступление иловой смеси из анаэробной зоны в эрлифтный биореактор, возврат активного ила, денитрифицированный рецикл, отвод очищенных сточных вод и избыточного активного ила. Перетоки схемы А-А-ЭБ, кроме перечисленных, включают поступление иловой смеси из анаэробной зоны в аноксидную (Рис. 3).

По аналогии с уравнением (2), описывается снижение концентрации в одной зоне, и соответствующее увеличение в другой. Для зоны, из которого выходит рассматриваемый j -тый поток, изменение концентрации составит

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

где $C_{\text{ВЫХ}}^i$ – концентрация i -того компонента в зоне, откуда выходит рассматриваемый j -тый поток, г/м³;

q_j – расход иловой смеси в j -том потоке, м³/сут;

$W_{\text{ВЫХ}}$ – объем зоны, откуда выходит поток, м³.

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

$$\Delta C_{j\text{ВХ}}^i = \frac{t \cdot C_{\text{ВЫХ}}^i \cdot q_j}{W_{\text{ВХ}}}, \quad \text{г/м}^3, \quad (4)$$

где $W_{\text{ВХ}}$ – объем сооружения, куда входит поток, м³.

Концентрации компонентов в зонах входа и выхода потока будут являться искомыми величинами при решении общей системы биохимических и физических уравнений. Изменение концентраций должно быть сведено для каждой зоны согласно аналогу закона Кирхгофа, что исключает эту переменную из системы.

Внутри аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации происходит интенсивная внутренняя циркуляция между зонами насыщения кислорода и потребления кислорода.

В этом случае также можно использовать уравнения (3 и 4) для описания обмена масс между зонами, однако возникает вопрос определения циркуляционного расхода и объема этих зон в эрлифтном биореакторе.

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 ($W_{\text{нас}}$) и зона потребления кислорода $W_{\text{потр}}$ (рисунок 4).

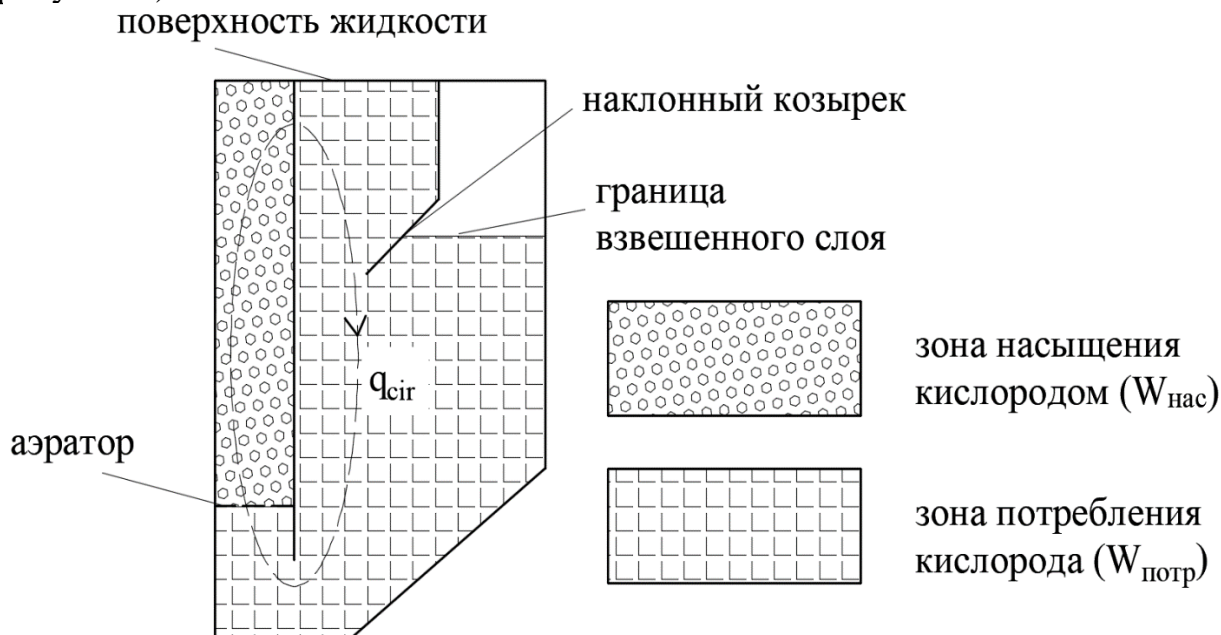


Рисунок 4 - Расчетные зоны в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Для определения величины циркуляционного расхода, получена теоретическая зависимость:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_a = \frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{Q_{\text{air}}}{v_{\text{ж}} + 0,34} \\ h_a - \frac{(h_a - z_1)}{\omega_a} \cdot \left(\frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{\gamma_{\text{г}} \cdot Q_{\text{air}}}{\gamma_{\text{ж}} \cdot (v_{\text{ж}} + 0,34)} \right) - \left[W_{\text{ц}} \cdot \left(\frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{\gamma_{\text{г}} \cdot Q_{\text{air}}}{\gamma_{\text{ж}} \cdot (v_{\text{ж}} + 0,34)} \right) + \frac{W_{\text{к}} - W_{\text{ц}}}{W_{\text{к}}} \right] h_a + \\ + \frac{\alpha}{2g} \cdot \left(\frac{q_{\text{cir}} + Q_{\text{air}}}{\omega_a} \right)^2 = \frac{\alpha}{2g} \cdot \left(\frac{q_{\text{cir}}}{\omega_a} \right)^2 + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{q_{\text{cir}}^2}{2g} \end{array} \right. \quad (5)$$

где q_{cir} – расход иловой смеси, циркулирующей через затопленный эрлифт биореактора, $\text{м}^3/\text{с}$;

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 ;

ω_a – 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 затопленного эрлифта под уровень свободной поверхности жидкости в биологическом реакторе, м;

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

$v_{\text{ж}}$ – средняя скорость течения жидкой фазы газожидкостной смеси в затопленном эрлифте, 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 над аэратором, м².

Неизвестными величинами в системе уравнений (5) являются расход иловой смеси q_{cir} и скорость течения жидкой фазы в эрлифте $v_{ж}$.

Ограничением циркулирующего расхода является выполнение 2-х основных требований:

1. Обеспечение незаилающих скоростей в нижней части сооружения, что очерчивает нижний порог циркуляционного расхода.
2. Обеспечение уровня взвешенного слоя в зоне осветления биореактора при заданной нагрузке на площадь границы взвешенного слоя. Это требование ограничивает максимальную величину циркуляционного расхода.

В теории и практике расчета сооружений с затопленной эрлифтной системой аэрации, для описания скорости и расхода иловой смеси в контуре сооружения используется понятие *интенсивности циркуляции* $I_{ц}$ (м³/м²·ч), и определяется по формуле

$$I_{ц} = \frac{q_{cir}}{\omega_j}, \quad (6)$$

где ω_j – площадь зазора между стенкой эрлифта и наклонным козырьком, м² (рис. 5).

Минимальную интенсивность циркуляции предложено определять эмпирически по формуле:

$$I_{ц,мин} = 159000 \cdot v_{oc} \cdot H^{0,22} \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot h_w}{B_j} + 0,41}, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (7)$$

где v_{oc} – скорость осаждения частиц активного ила, принимаемая около 0,0002-0,0005 м/с, в зависимости от концентрации ила в биореакторе;

H – глубина эрлифтного биореактора, м;

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

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

Максимальная интенсивность циркуляции определяется по эмпирической формуле

$$I_{ц,маx} = \frac{31,5 \cdot \left(\frac{h_w}{B_j}\right)^{0,844}}{(q_c + 0,29)^{0,801}}, \quad (8)$$

где q_c – гидравлическая нагрузка на осветлитель, м³/м²·ч.

Величина гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны осветлителя вычисляется по эмпирической формуле:

$$q_c = 0,377 \cdot \frac{C_{в.в}^{1,19} \cdot a_i^{0,451}}{1,0078^{1,19 - I_{ц}}}, \quad (9)$$

где: $C_{в.в}$ – концентрация взвешенных веществ на выходе из осветлителя, мг/л, принимаемая в зависимости от технологических требований;

a_i – концентрация активного ила в биореакторе, для эрлифтных биореакторов принимается 3-5 г/л.

Приведенные зависимости (4 – 9) позволяют дополнить общую математическую модель БОСЭБ уравнениями перетоков между зонами насыщения $W_{нас}$ и потребления $W_{потр}$ кислорода по форме уравнений (3 и 4) с подстановкой значения циркуляционного расхода q_{cir} .

Для **описания массового баланса илоразделения** предложен безразмерный коэффициент вторичного илоразделения в эрлифтном биореакторе $\alpha_{ир}$

$$\alpha_{ир} = \frac{C_{B,B}}{1000a_i} = \frac{X_i^{out}}{X_i^{ins}}, \quad (10)$$

где X_i^{out} - концентрация i -того нерастворенного компонента ASM (Табл. 2) в осветленном очищенном стоке, г/м³;

X_i^{ins} - концентрация i -того нерастворенного компонента ASM (Табл. 2) в биореакторе, г/м³.

В теоретических расчетах коэффициент вторичного илоразделения определяется методом последовательного приближения из расчета фактического содержания взвешенных веществ в очищенном стоке 20 г/м³, которое определено в ходе предварительных лабораторных исследований работы осветлителя со взвешенным слоем в эрлифтном биореакторе.

Для теоретического обоснования эффективности предложенной технологии, на основании приведенных выше теоретических и эмпирических зависимостей, создана теоретическая модель расчета сооружений БОСЭБ с использованием системы ASM3+Bio-P.

Для реализации теоретической модели сооружений БОСЭБ предложено использовать программную среду Cell Designer (The Systems Biology Institute, Токио, Япония).

Особенностью Cell Designer является форма описания уравнений, входящих в систему. 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 оценки скорости каждого.

В поле программной среды, выполняется запись всех 23-х биохимических процессов согласно ASM3+Bio-P (ур-е 1) и всех уравнений физических процессов (ур-е 2-10). Компоненты при этом (Табл. 2) многократно повторяются в различных процессах, программная среда «опознает» их по характерному идентификатору («ID»). Для примера, на рисунке 5 показан процесс гидролиза нерастворенного органического вещества (ферментативный переход X_s в S_s).

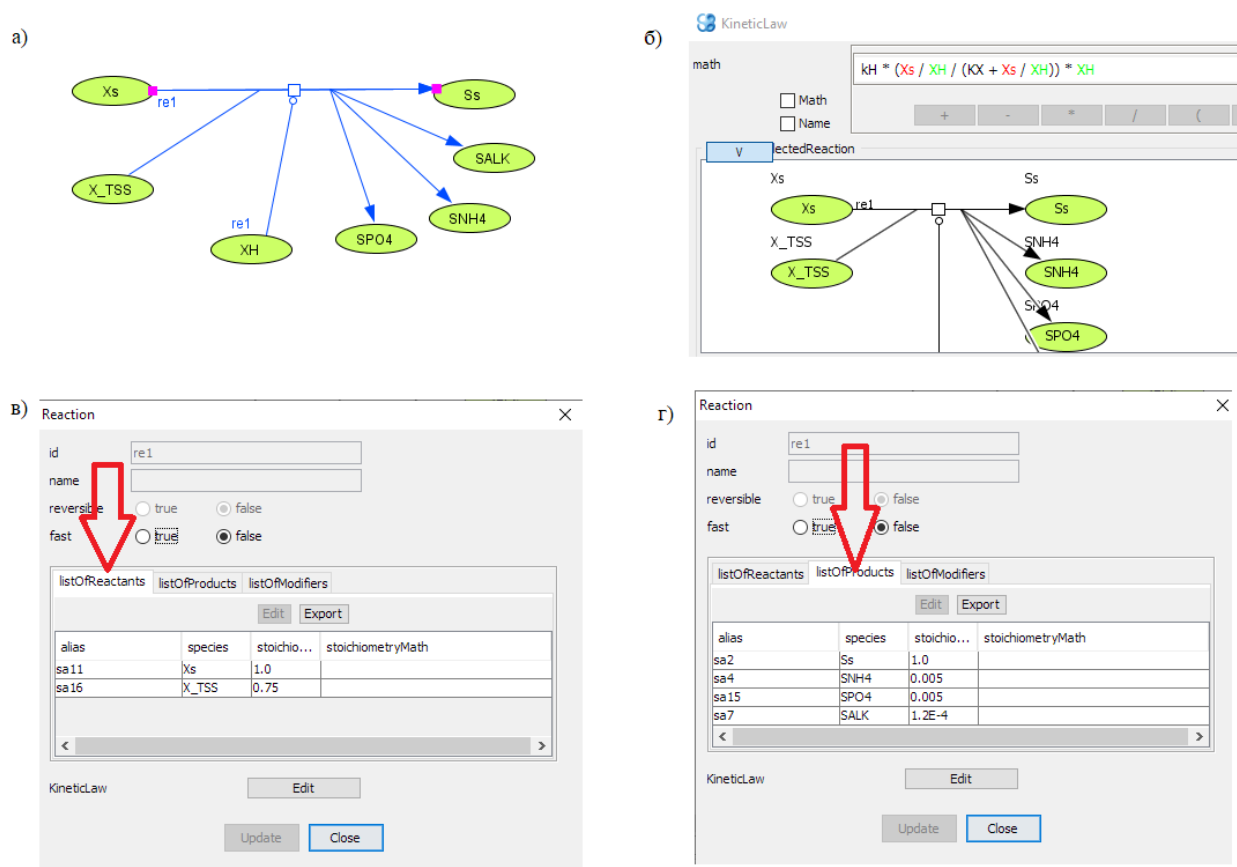


Рисунок 5 - Гидролиз нерастворенного органического вещества в программной среде Cell Designer: а – процесс гидролиза в пространстве модели Cell Designer, б – окно кинетического закона реакции гидролиза, в – окно реактантов процесса гидролиза, г – окно продуктов процесса гидролиза.

Стрелками на рисунке 5. указаны вкладки «реактанты» (в) и «продукты» (г), где задаются стехиометрические коэффициенты реакции. Поскольку в кинетической закономерности процесса гидролиза (б) присутствует концентрация гетеротрофной биомассы, но ни реактантом, ни продуктом данной реакции гетеротрофы не являются, в процесс они добавлены в качестве катализатора.

Гетеротрофы не являются химическим катализатором процесса, однако, исходя из сущности процесса гидролиза (гетеротрофы выделяют экзоферменты, инициирующие разложение нерастворенного органического вещества) их каталитическая функция уже заложена в кинетике процесса (а,б).

Для отладки предложенной математической модели, в соответствии с задачами исследований, были выполнены расчеты на основании реальных сточных вод г. Макеевка.

Согласно схеме исследований (раздел 2), в программной среде Cell Designer созданы 2 модели: А-А-ЭБ и А/А-ЭБ с использованием ASM3+Bio-P. Блок-схемы построения моделей приведены на рисунке 6.

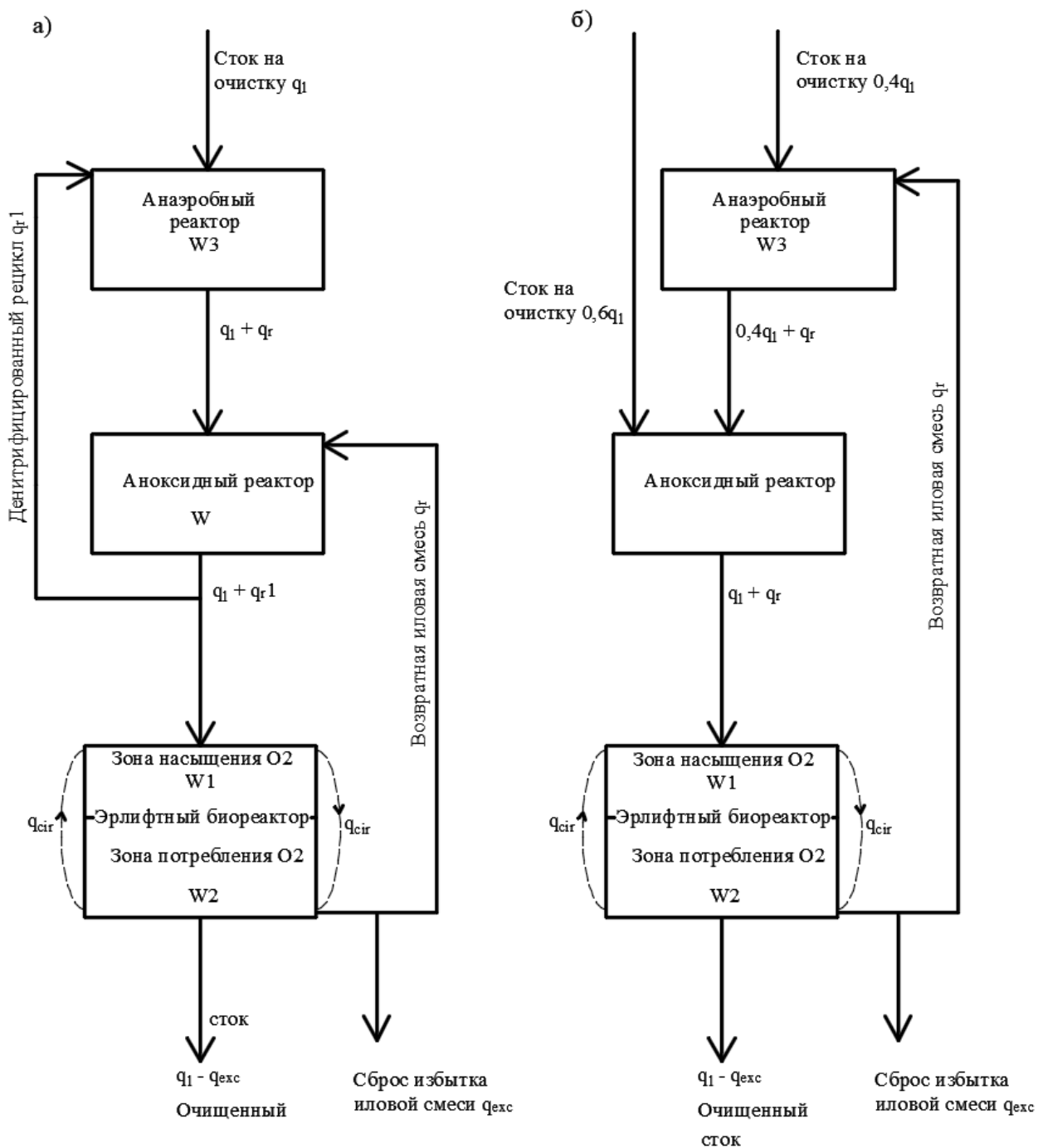


Рисунок 6 - Блок-схема построения моделей. а) А-А-ЭБ; б) А/А-ЭБ

Кинетические и стехиометрические константы приняты согласно рекомендациям ASM3+Bio-P. Исходные параметры для расчета модели БОСЭБ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для моделирования А-А-ЭБ и А/А-ЭБ

Показатели	Обознач.	Ед. изм.	Значение	
			А-А-ЭБ	А/А-ЭБ
Концентрация растворенного субстрата в исходном стоке	S_{s_in}	гO ₂ /м ³	31	31
Концентрация нерастворенного субстрата в исходном стоке	X_{s_in}	гO ₂ /м ³	130	130
Концентрация азота аммонийного по N в исходном стоке	S_{NH_in}	гN/м ³	25	25
Концентрация нерастворенного инертного субстрата в исходном стоке	X_{I_in}	гO ₂ /м ³	50	50
Концентрация растворенного инертного субстрата в исходном стоке	S_{I_in}	гO ₂ /м ³	30	30
Концентрация фосфатов по P в исходном стоке	S_{PO4_in}	гP/м ³	2,87	2,87
Концентрация взвешенных веществ в исходном стоке	X_{TSS_in}	г/м ³	132	132
Концентрация гидрокарбонатов в исходном стоке	S_{ALK_in}	моль/м ³	7	7
Расход поступающих сточных вод	q_1	м ³ /сут	0,95	0,95
Внутренний циркуляционный расход эрлифтного биореактора*	q_{cir}	м ³ /сут	144	144
Возвратный рецикл*	q_r	м ³ /сут	0,55	0,55
Денитрифицированный рецикл*	q_{r1}	м ³ /сут	<u>3</u> 2	отс.
Расход избыточного ила*	q_{exc}	м ³ /сут	0,02	0,02
Расход подаваемого воздуха*	Q_{air}	м ³ /час	0,51	0,51
Коэффициент использования кислорода	k_{isp}		0,07	0,07
Объем анаэробного реактора*	W_3	м ³	<u>0,047</u> 0,15	<u>0,047</u> 0,15
Объем аноксидного реактора*	W	м ³	<u>0,047</u> 0,15	<u>0,047</u> 0,15
Объем зоны насыщения кислородом*	W_1	м ³	0,0225	0,0225
Объем зоны потребления кислорода*	W_2	м ³	0,425	0,425
Коэффициент α^*	α_{ip}		0,003	0,003

* - значения могут уточняться при моделировании.

В таблице 3 для параметров денитрифицированного рецикла q_{r1} , объемов анаэробного W_3 и аноксидного W реакторов, в числителе указаны значения, принятые по немецкому стандарту «ATV», а в знаменателе – откорректированные значения, позволившие достигнуть качества очистки, близкого к целевым технологическим показателям по действующему Федеральному закону РФ № 7-ФЗ "Об охране окружающей среды".

Задачей теоретических расчетов являлась проверка корректности предложенной модели, включающая условия: решение должно существовать, быть единственным и устойчивым к изменениям исходных данных.

Для подтверждения корректности модели, система уравнений решалась тремя различными математическими SBML-алгоритмами: SOSlib, COPASI, SimulationCore. Все три алгоритма показали одинаковый результат по неизвестным переменным системы, в том числе при изменении исходных данных согласно таблице 3. Обобщенные результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты моделирования биологической очистки сточных вод в системах БОСЭБ

Параметр	Расчетная модель			
	по стандарту ATV		с корректировками	
	А-А-ЭБ	А/А-ЭБ	А-А-ЭБ	А/А-ЭБ
Концентрация N-NH ₄ в очищенной воде, гN/м ³	0,5	0,52	1,59	1,14
Концентрация N-NO ₃ в очищенной воде, гN/м ³	18,51	18,5	2,42	4,9
Концентрация P-PO ₄ в очищенной воде, гP/м ³	2,94	3,05	0,56	0,76
Концентрация растворенного субстрата в очищенной воде, гO ₂ /м ³	0,64	0,64	0,31	0,2
Концентрация нерастворенного субстрата в очищенной воде, гO ₂ /м ³	0,4	0,5	0,06	0,33
Концентрация активного ила по беззольному веществу в эрлифтном биореакторе, г/м ³	2,078	2,05	2,186	2,215

Корректировки расчетной модели состояла в следующем. Приведенные исходные данные по составу сточных вод достаточно жесткие с точки зрения неоптимального соотношения БПК:N:P, что потребовало введения дополнительного органического субстрата дозой 30 г/м³ для обеих схем биологической очистки. Текущее значение соотношения БПК:N:P составило

100:22:2.6, что сильно отличается от классического 100:5:1 и объясняет необходимость добавления органического субстрата. При более благоприятных соотношениях, возможно применение предложенных схем без дополнительной органической подпитки.

Предел роста ХПК исходного стока в данных объемах сооружений лимитируется максимальным расходом воздуха, подаваемым в эрлифтный биореактор. С помощью составленной модели определено максимальное приращение ХПК исходного стока, которое составило 260 гХПК/м³. При этом интенсивность аэрации не превышает значения 20м³/м²/ч.

На основании полученных из модели данных о протекании биохимических процессов в системах с активным илом, можно построить «биохимический профиль» различных схем биологической очистки.

Биохимический профиль отображает изменение концентраций того или иного загрязнения по стадиям очистки и может достаточно наглядно отобразить суть процессов, протекающих в системе в целом.

Для построения биохимического профиля необходимо определить минимальный набор компонентов, который наиболее полно описывает суть биохимических преобразований в системах с активным илом.

На основании анализа биохимических процессов, предлагается использовать для построения профиля следующие компоненты системы:

- изменение ХПК (растворенной части), гО₂/м³, – величина, зависящая от интенсивности протекания биологических процессов, обусловленных жизнедеятельностью гетеротрофных микроорганизмов;
- изменение концентрации азота аммонийного по N, гN/м³, – величина, зависящая от интенсивности протекания процессов жизнедеятельности автотрофных микроорганизмов;
- изменение концентрации азота нитратов по N, гN/м³, – величина, зависящая от интенсивности процессов денитрификации;
- изменение концентрации фосфатов по P, гP/м³, – величина, зависящая от интенсивности биологического накопления фосфора и наличием химической преципитации фосфатов.

Кроме перечисленных, в набор биохимического профиля могут быть добавлены такие параметры, как щелочность, окислительно-восстановительный потенциал, и др.

По оси абсцисс в таком профиле предлагается откладывать время пребывания сточных вод в процессе очистки, что позволит наглядно воспринимать сущность и скорости физических, химических и биохимических процессов. На рисунке 7 показан биохимический профиль очистки городских сточных вод г. Макеевка по схеме А-А-ЭБ с добавлением субстрата.

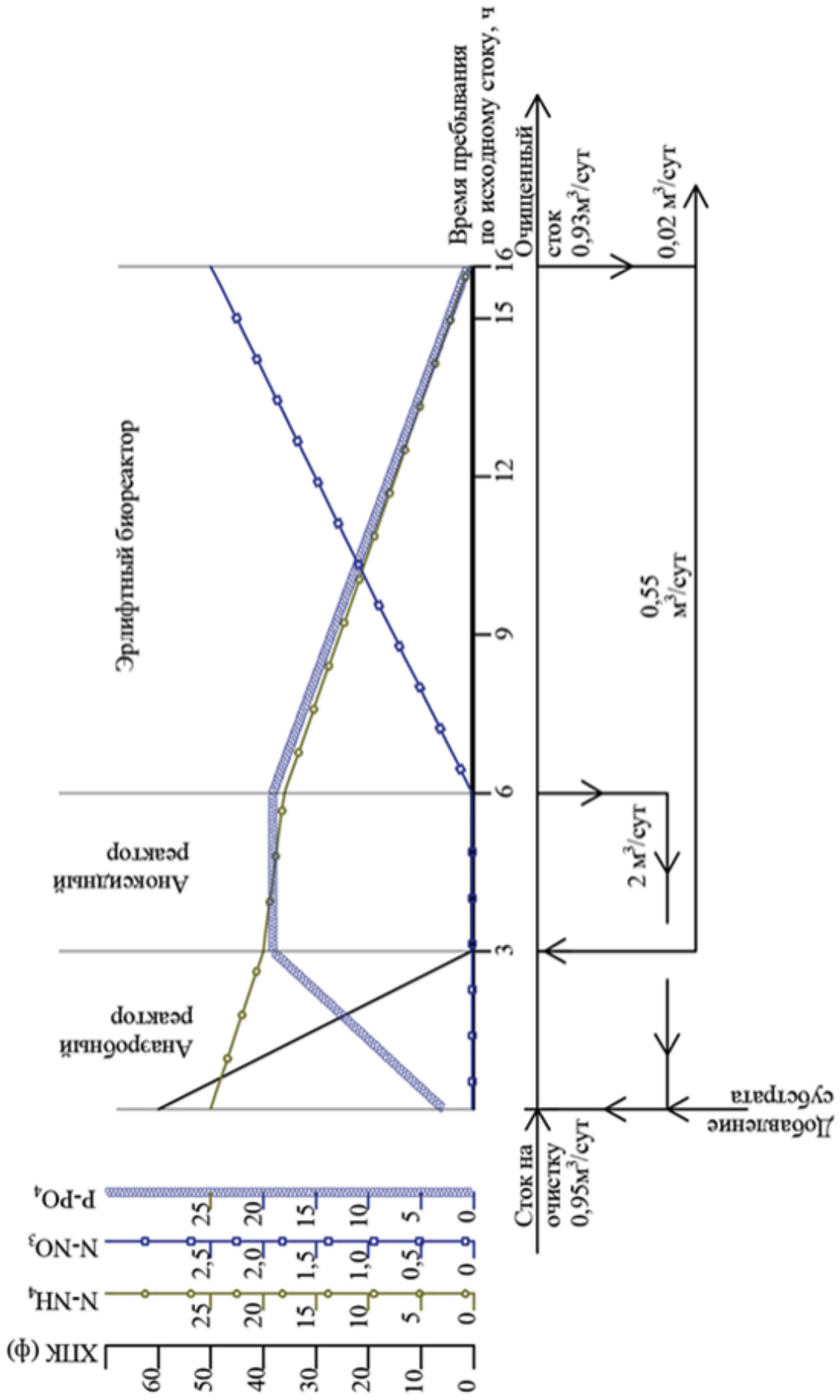


Рисунок 7 - Биохимический профиль очистки по схеме А-А-ЭБ

Проведенные расчеты показали, что предложенная теоретическая модель является математически корректной и требуется проверка ее адекватности в опытно-промышленных условиях. Кроме того, дополнительно необходимо в натуральных условиях исследовать эффективность задержания взвешенных веществ в эрлифтном биореакторе в зависимости от интенсивности аэрации в сооружении. Указанные задачи решались в опытно-промышленных условиях.

В четвертом разделе описаны опытно-промышленные испытания технологии биологической очистки городских сточных вод с эрлифтными биореакторами. Приведено описание опытно-промышленной установки, расположенной в здании решеток КНС № 52 г. Донецка. Забор сточных вод на обработку осуществлялся после предварительной механической очистки (процеживания).

Опытно-промышленные исследования проводились на протяжении 3х месяцев, не включая подготовительного периода и пуска-наладки (1,5 мес). В первый месяц система работала по схеме модели А-А-ЭБ, второй месяц - по схеме А/А-ЭБ в режиме адаптации, и третий месяц – по схеме А/А-ЭБ в рабочем режиме.

Принципиальная схема опытно-промышленной установки приведена на рисунке 8. Подача воды осуществляется с помощью погружного канализационного насоса (1) на высоту около 8 м, в наземную часть помещения решеток, где располагался основной блок сооружений биологической очистки. Усреднитель объемом 300 л (3) находился постоянно в наполненном состоянии за счет протока по линиям (2) и (18). Насос (1) в автоматическом режиме работал с периодическим включением/выключением ввиду колебаний уровня воды в приемном резервуаре.

Сточные воды из бака постоянного уровня (6) по трубопроводам (8) поступали в емкости для анаэробно/аноксидной очистки (9,10). Емкости оснащены устройствами перемешивания (19) – лопастными мешалками. Трубопровод (8) оснащен запорно-регулирующей арматурой для перераспределения потока между реакторами (9) и (10).

Далее иловая смесь поступала на эрлифтный биореактор (11), состоящий из 2-х секций. Осветленная жидкость по 2-м трубопроводам (15) поступала в резервуар очищенной воды 16. Воздух в систему подавался с помощью объемного компрессора (14) через турбинный расходомер (13).

Для сброса избыточного активного ила и рециркуляции возвратного использовались 2 насоса (12) – по одному на каждую секцию сооружения, и один насос дополнительно для обеспечения денитрифицированного рецикла. Трубопроводы выполнены из полипропиленовых труб с устройством шаровых вентилях. Система канализации выполнена из раструбных полипропиленовых труб диаметром 32-50мм.

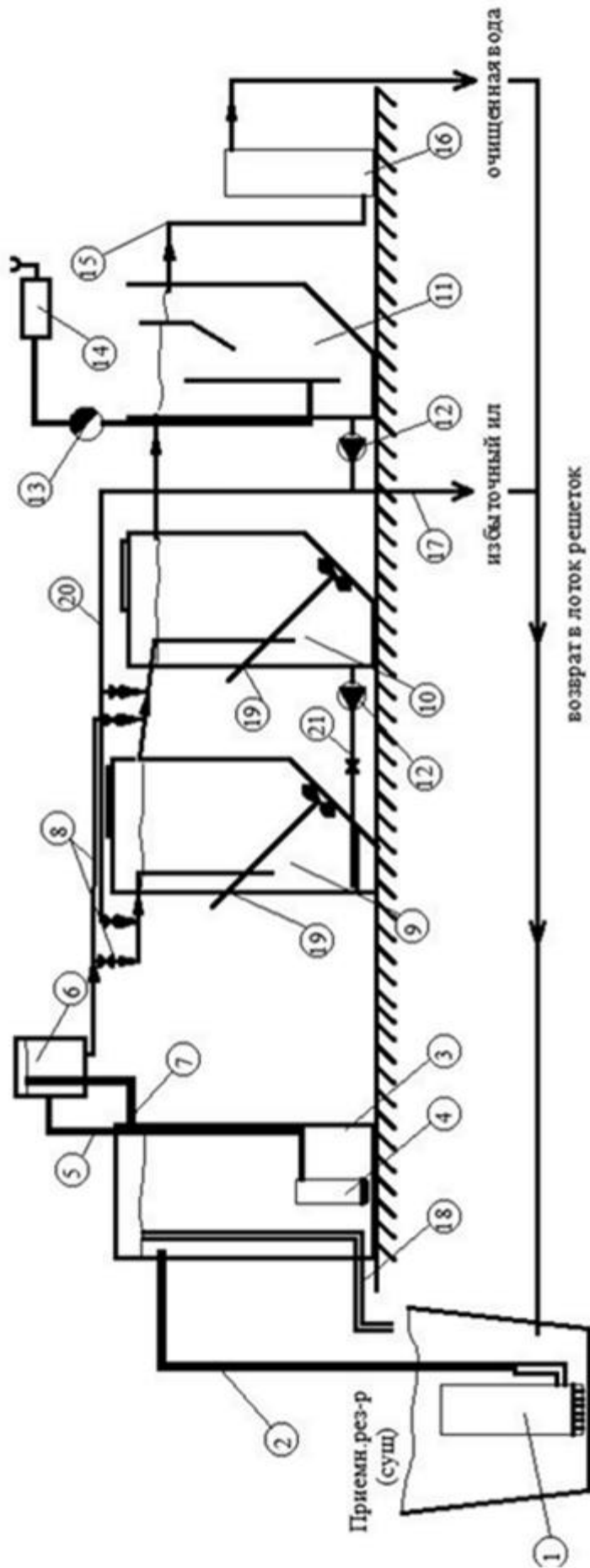


Рисунок 8 - Технологическая схема опытно-промышленной установки

1 - погружной канализационный насос;	8 - линия подачи исходного стока в анаэробный реактор, $\phi 2,5$ мм;	16 - емкость очищенной воды, 50л;
2 - линия подачи исходного стока в усреднитель, $\phi 2,5$ мм;	9 - анаэробный/аноксидный реактор, 147л;	17 - линия отвода избыточного ила, $\phi 8$ мм
3 - усреднитель, 300л;	10 - анаэробный/аноксидный реактор, 147л;	18 - переливная линия усреднителя, $\phi 50$ мм;
4 - погружной канализационный насос;	11 - эрлифтный био реактор, 900л;	19 - механическая мешалка;
5 - линия подачи исходного стока в бак постоянного уровня, $\phi 15$ мм;	12 - насос возвратного ила;	20 - линия рецикла возвратного ила, $\phi 8$ мм
6 - бак постоянного уровня, 20л;	13 - расходомер воздуха;	21 - линия денитрифицированного рецикла, $\phi 8$ мм
7 - переливная линия бака постоянного уровня, $\phi 50$ мм;	14 - воздушодувка;	
	15 - линия отвода очищенного стока, $\phi 32$ мм;	

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

Основными элементами системы являлись биореакторы: блок двух анаэробных/аноксидных реакторов (А+А – рис. 9), и эрлифтный биореактор (ЭБ – рис. 10).



Рисунок 9 - Общий вид блока анаэробного (9) и аноксидного (10) реакторов (А+А).

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

Эрлифтный биореактор представляет из себя емкость из полиэтилена. Внутри сооружение разделено перегородкой на две симметричные части, все внутренние перегородки выполнены из водостойкого пластика толщиной 5мм. По боковым продольным стенкам на всю длину реактора устроена зона затопленного эрлифта. Внутри эрлифта на расчетную глубину погружены трубчатые перфорированные аэраторы, которые имеют возможность регулирования по высоте.



Рисунок 10 - Общий вид эрлифтного биореактора (ЭБ)

Основные параметры опытно-промышленной установки приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Параметры опытно-промышленной установки

Параметр	Обознач.	Ед. изм.	Значение	
			А-А-ЭБ	А/А-ЭБ
Расход поступающих сточных вод	q_1	м ³ /сут	0,95	0,95
Внутренний циркуляционный расход эрлифтного биореактора	q_{cir}	м ³ /сут	144	144
Возвратный рецикл	q_r	м ³ /сут	0,55	0,55
Денитрифицированный рецикл	q_{r1}	м ³ /сут	3	---
Расход избыточного ила	q_{exc}	м ³ /сут	0,012	0,012
Расход подаваемого воздуха	Q_{air}	м ³ /час	0,69...0,75	0,69...0,75
Коэффициент использования кислорода	k_{isp}		0,046	0,046
Объем анаэробного реактора	W_3	м ³	0,047	0,047
Объем аноксидного реактора	W	м ³	0,047	0,047
Объем зоны насыщения кислородом	W_1	м ³	0,0225	0,0225
Объем зоны потребления кислорода	W_2	м ³	0,425	0,425

Выполнялось ступенчатое варьирование одного параметра – расхода воздуха, подаваемого в систему аэрации с интенсивностью 13,8 – 15 м³/м²·ч. Возвратный и денитрифицированный рециклы не варьировались. Коэффициент потребления кислорода для трубчатых аэраторов на рабочей глубине составлял 0,046.

Соотношение расходов исходного стока между аноксидным и анаэробным реактором, характерное только для схемы А/А-ЭБ принято 1:1 для упрощения технологического регулирования системы.

Исходный состав поступающих сточных вод на очистку приведен в таблице 6.

Таблица 6 - Изменение состава сточных вод

Параметр Дата	ХПК _ф г/м ³	P-PO ₄ г/м ³	N-NH ₄ г/м ³	Дата	ХПК г/м ³	P-PO ₄ г/м ³	N-NH ₄ г/м ³
А-А-ЭБ				А/А-ЭБ			
24.05.2021г.	210,00	0,67	18,50	15.07.2021г.	212,00	1,11	22,50
27.05.2021г.	227,00	1,21	19,20	19.07.2021г.	228,00	1,22	24,70
31.05.2021г.	218,00	1,31	20,10	22.07.2021г.	218,00	1,08	22,00
03.06.2021г.	214,00	1,18	19,40	26.07.2021г.	216,00	1,12	22,60
07.06.2021г.	232,00	0,96	20,10	29.07.2021г.	224,00	0,98	20,70
10.06.2021г.	244,00	1,18	18,50	02.08.2021г.	218,00	1,26	22,10
17.06.2021г.	237,00	1,22	20,30	05.08.2021г.	214,00	1,26	24,80
21.06.2021г.	220,00	0,88	22,70	09.08.2021г.	216,00	1,16	23,50
24.06.2021г.	228,00	0,97	23,00	12.08.2021г.	224,00	1,08	23,00
				16.08.2021г.	232,00	1,22	22,80

Концентрации кислорода в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации, и усредненной концентрации активного ила по сухому веществу, приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Концентрация кислорода в эрлифтном биореакторе

Параметр Дата	Интенсивность аэрации, м ³ /м ² ·ч	Концентра- ция ила a _i , г/м ³	Концентра- ция кислорода в зоне насыщения кислородом, г/м ³	Концентра- ция кислорода в зоне потребления кислорода, г/м ³	Концентра- ция кислорода в нижней части зоны потребления кислорода, г/м ³
А-А-ЭБ	13,8	3270	1,8...2,4	1,4...1,8	0,0...0,2
	15,0	3270	3,2...3,8	2,2...2,8	1,4...2,0
А/А-ЭБ	13,8	3070	1,6...2,2	0,8...1,4	0,0...0,2
	15,0	3200	2,4...2,8	1,8...2,2	0,8...1,2

Данные таблицы 7 указывают, что увеличение интенсивности аэрации с 13,8 до 15 м³/м²·час приводит к значительному изменению кислородного режима в эрлифтном биореакторе – увеличиваются концентрации растворенного кислорода в нижней части сооружения. При этом в эрлифтном биореакторе отсутствует аноксидная зона, что замедляет процессы денитрификации. Таким образом, нет необходимости увеличивать интенсивность аэрации выше 15 м³/м²·ч. Результаты измерений контролируемых параметров при работе биореактора по двум схемам с изменением расхода воздуха в каждой, приведены в таблице 8.

Схема А-А-ЭБ, в указанном диапазоне интенсивности аэрации, характеризуется большими концентрациями кислорода в эрлифтном биореакторе, что может быть объяснено меньшим потреблением кислорода специфичным биоценозом активного ила.

Таблица 8 - Результаты работы опытно-промышленной установки

Дата	Q_{air}	$S_{NH_4^{A/A}}$	$S_{NH_4^{O_2}}$	$S_{NO^{A/A}}$	$S_{NO^{O_2}}$	$S_{PO_4^{A/A}}$	$S_{PO_4^{O_2}}$	$X_{ПК_2^{A/A}}$	$X_{ПК_2^{O_2}}$	a_i	$C_{св.о_2}$	X_A	$X_{РАО}$
	м ³ /час	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	+ -	+ -
А-А-ЭБ													
24.05.2021	0,69	13,50	1,00	отс	10,10	4,00	1,00	43,00	32,00	3250	17		
27.05.2021	0,69	13,70	1,10	1,20	11,00	4,10	1,20	45,00	32,00	3200	15		+
31.05.2021	0,69	13,80	0,80	2,10	11,20	3,60	1,10	45,00	34,00	3300	18	+	
03.06.2021	0,69	13,80	1,00	1,60	10,60	3,80	1,10	48,00	34,00	3330	17	+	
07.06.2021	0,75	13,40	0,90	1,60	14,40	2,80	1,40	47,00	32,00	3250	21		
10.06.2021	0,75	13,10	0,90	1,20	12,80	3,20	1,30	45,00	36,00	3300	22	+	
17.06.2021	0,75	13,90	0,70	2,40	14,60	2,20	1,60	43,00	38,00	3200	23	+	
21.06.2021	0,75	14,00	0,50	4,60	16,40	1,80	1,60	46,00	35,00	3270	20		-
24.06.2021	0,75	12,80	0,70	4,40	18,80	1,90	1,80	48,00	34,00	3310	21		
А/А-ЭБ													
15.07.2021	0,69	15,60	0,60	отс	8,40	6,00	1,10	44,00	33,00	3050	18		
19.07.2021	0,69	16,00	0,50	отс	8,60	5,50	1,10	43,00	36,00	3100	18		+
22.07.2021	0,69	16,00	0,60	1,80	6,90	4,86	0,80	44,00	34,00	3000	15	+	
26.07.2021	0,69	15,40	0,50	1,80	7,40	5,60	0,70	45,00	33,00	3150	22	+	
29.07.2021	0,75	15,20	0,80	2,40	14,60	4,20	1,40	48,00	35,00	3150	22		
02.08.2021	0,75	15,80	0,80	2,80	15,40	3,40	1,20	47,00	38,00	3200	24		
05.08.2021	0,75	15,60	0,50	3,60	16,80	3,20	1,60	43,00	37,00	3150	23	+	
09.08.2021	0,75	15,40	0,60	3,20	17,20	3,20	1,40	43,00	36,00	3300	19	+	
12.08.2021	0,75	15,50	1,00	3,60	15,80	2,80	1,70	46,00	32,00	3350	22		-
16.08.2021	0,75	15,80	1,10	3,80	17,40	2,80	1,60	44,00	34,00	3200	22		

Примечание. 1) Индекс "А/А" указывает на значение параметра на выходе сточной жидкости из блока анаэробный-аноксидный реактор.

2) Индекс "ОЧ" указывает на значение параметра в очищенной воде.

Вклад биогенных элементов в интегральный показатель качества очистки (ИПКО) каждой из схем для расхода воздуха $0,69\text{м}^3/\text{ч}$ составил для А-А-ЭБ 4,63 и для А/А-ЭБ 4,24.

Для визуализации и оценки результатов работы опытно промышленной установки воспользуемся методом построения биохимического профиля систем. Для каждого из биогенных элементов (N-NH_4 , N-NO_3 , P-PO_4), при конкретной подаче кислорода и используемой схемы очистки построены биохимические профили на рис. 11, 12. По оси абсцисс в указанных профилях отложено удельное время пребывания, представляющее из себя отношение указанного времени t к времени пребывания сточной жидкости в системе биологической очистки $T_{\text{оч}}$.

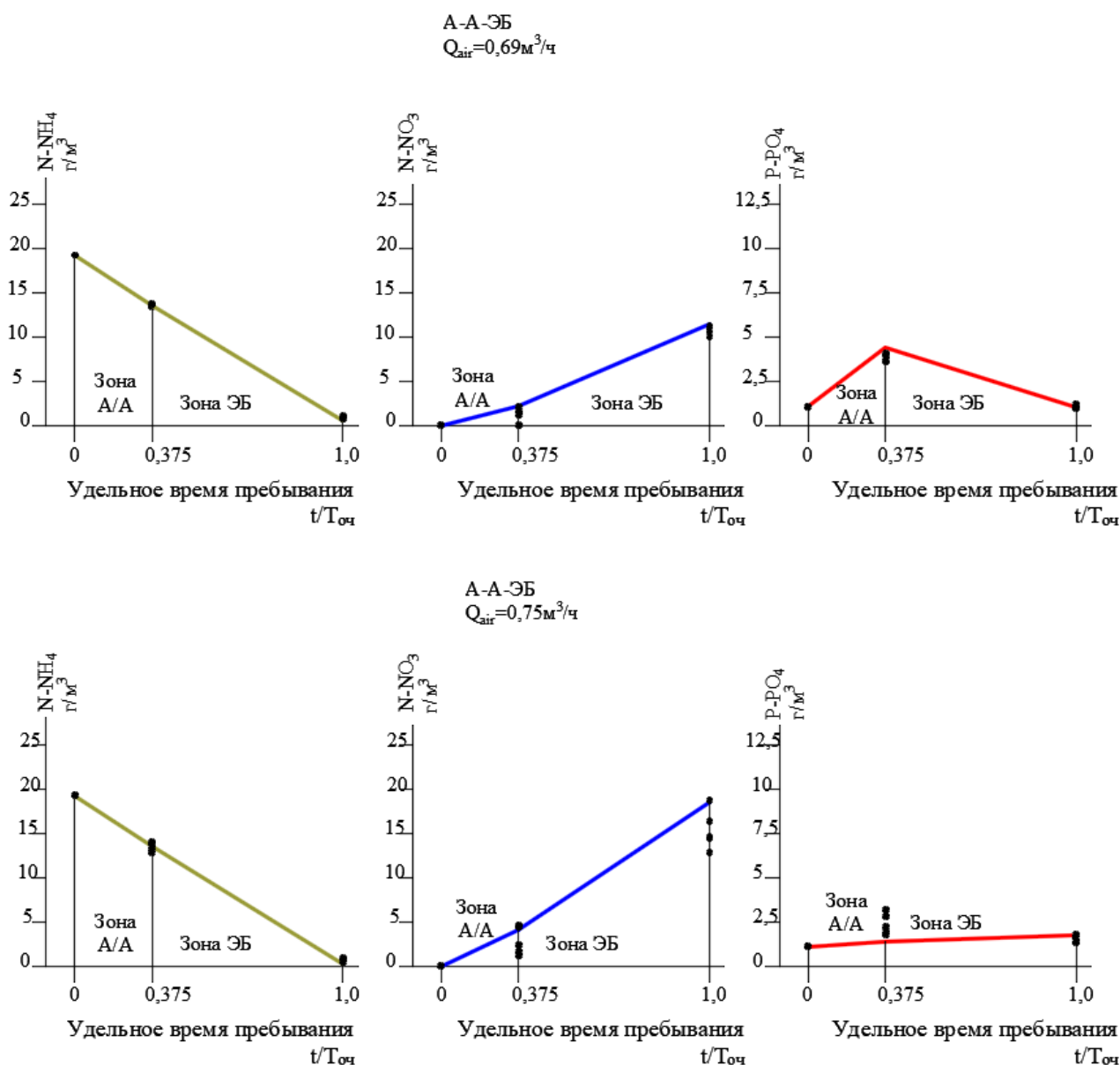


Рисунок 11 - Биохимические профили изменения концентраций N-NH_4 , N-NO_3 , P-PO_4 для А-А-ЭБ; * – экспериментальные данные; — — — — — расчетные значения.

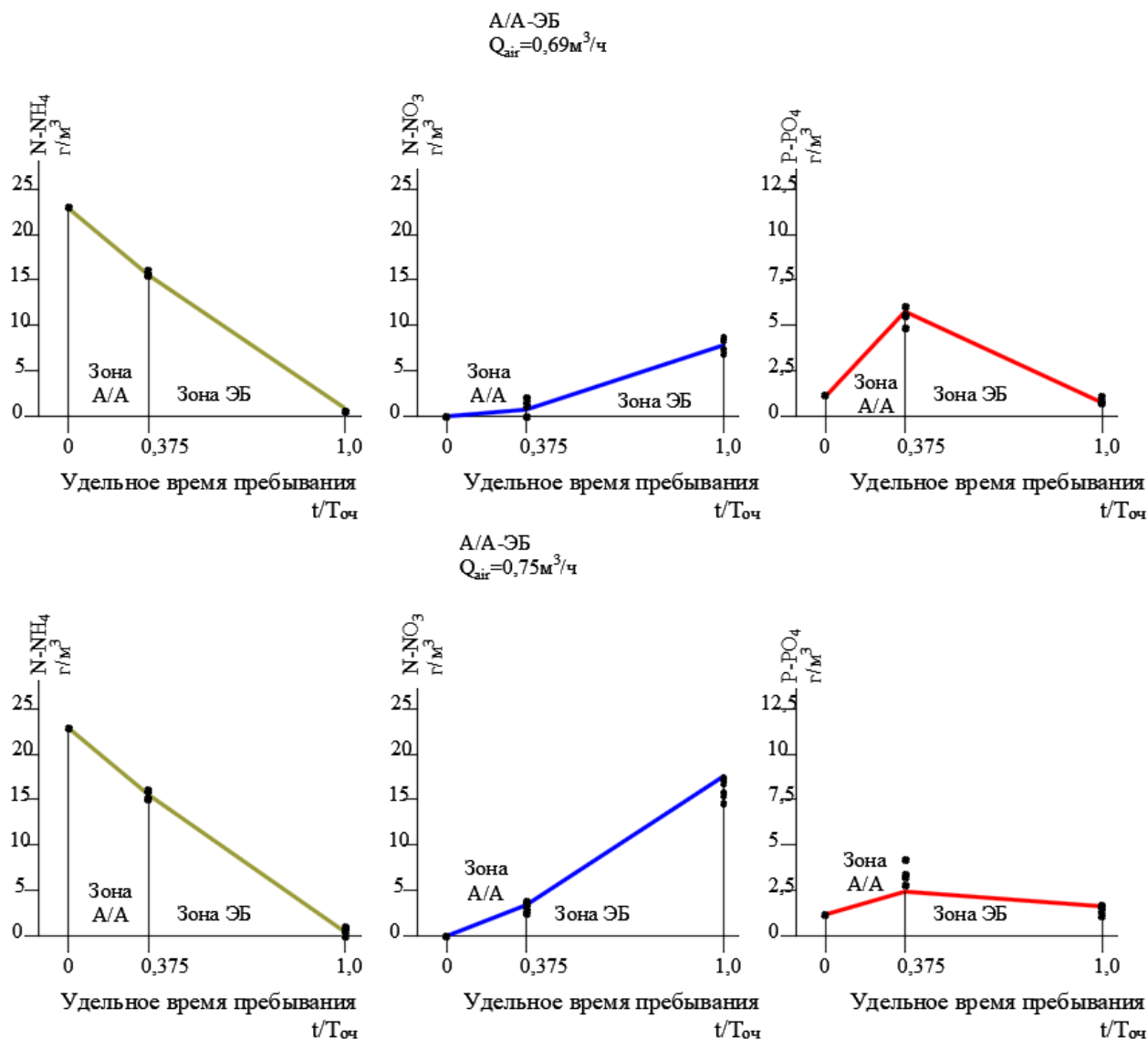


Рисунок 12 - Биохимические профили изменения концентраций N-NH_4 , N-NO_3 , P-PO_4 для А/А-ЭБ: * – экспериментальные данные; ——— - расчетные значения.

Рассматривая обе схемы в рабочем диапазоне интенсивности аэрации, видно, что профиль по азоту аммонийному N-NH_4 представляет из себя нисходящие прямые, эффективность очистки по N-NH_4 составляет 98%. В блоке анаэробный-аноксидный реактор (А+А) падение профиля объясняется подмесом рецикла возвратного ила, содержащего минимальные концентрации азота аммонийного. В блоке ЭБ (эрлифтный биореактор) происходит падение концентраций за счет протекания процессов нитрификации.

Рост нитратов N-NO_3 наблюдается при всех вариантах схем и интенсивности аэрации. Повышение концентрации этого компонента в блоке

A+A объясняется как рециклом нитрат-содержащих возвратных вод, так и процессами денитрификации, протекающими в аноксидных реакторах этого блока. Рост нитратов в блоке эрлифтного биореактора ЭБ объясняется процессами симультанной нитри-денитрификации в сторону процесса нитрификации. Вероятнее всего, это связано с недостатком в исходных сточных водах органического питания для жизнедеятельности денитрифицирующих микроорганизмов.

В предложенном диапазоне интенсивности аэрации, только профиль фосфатов P-PO₄ может иметь точку перегиба в месте перехода от блока A+A в ЭБ. Как видно из рисунков 10,11, высокая степень конечного удаления соединений фосфора сопровождается значительными уклонами профиля фосфатов до и после точки перегиба, что объясняется интенсивным ростом фосфор-аккумулирующих микроорганизмов (ФАО).

Для оценки сходимости результатов теоретического и опытно-промышленного исследования выполнено определение доверительных интервалов концентраций загрязнений с доверительной вероятностью 0,95. С учетом колебания состава исходных сточных вод, эти интервалы составили: для N-NH₄ ±0,8 г/м³, для N-NO₃ ±4,48 г/м³, для P-PO₄ ±0,45 г/м³, для взвешенных веществ ± 5,5 г/м³.

С увеличением интенсивности аэрации до 15 м³/м²·час наблюдалось увеличение концентрации взвешенных веществ в очищенной воде. Это может быть объяснено изменением гидродинамики взвешенного слоя и/или изменением седиментационных свойств активного ила.

Для установления зависимости концентрации взвешенных веществ в очищенных сточных водах от интенсивности аэрации, проведена дополнительная серия опытно-промышленных экспериментов. Эксперименты выполнены на схеме A/A-ЭБ на биоценозах с фосфор-аккумуляторами (в датах с 22.07.2021 по 25.07.2021) и без них (в датах с 12.08.2021 по 16.08.2021).

Результаты экспериментов приведены на рисунке 13. Как видно из результатов эксперимента, наличие фосфор-аккумулирующих организмов активного ила не оказывают существенного влияния на эффективность осветления в рассматриваемом диапазоне интенсивности аэрации.

В результате опытно-промышленных исследований установлено, что разработанная для описания физических и биохимических процессов в системах БОСЭБ математическая модель достаточно адекватно описывает работу таких сооружений биологической очистки сточных вод. Подтверждена эффективность схем с эрлифтными биореакторами при удалении органических загрязнений и биогенных элементов из хозяйственно-бытовых сточных вод до требований нормативов сброса в водоемы категории Б. Наиболее эффективной для достижения указанных целей является схема A/A-ЭБ из-за подтвержденной

большей степени удаления соединений азота и меньшей степенью необходимой рециркуляции иловой смеси.

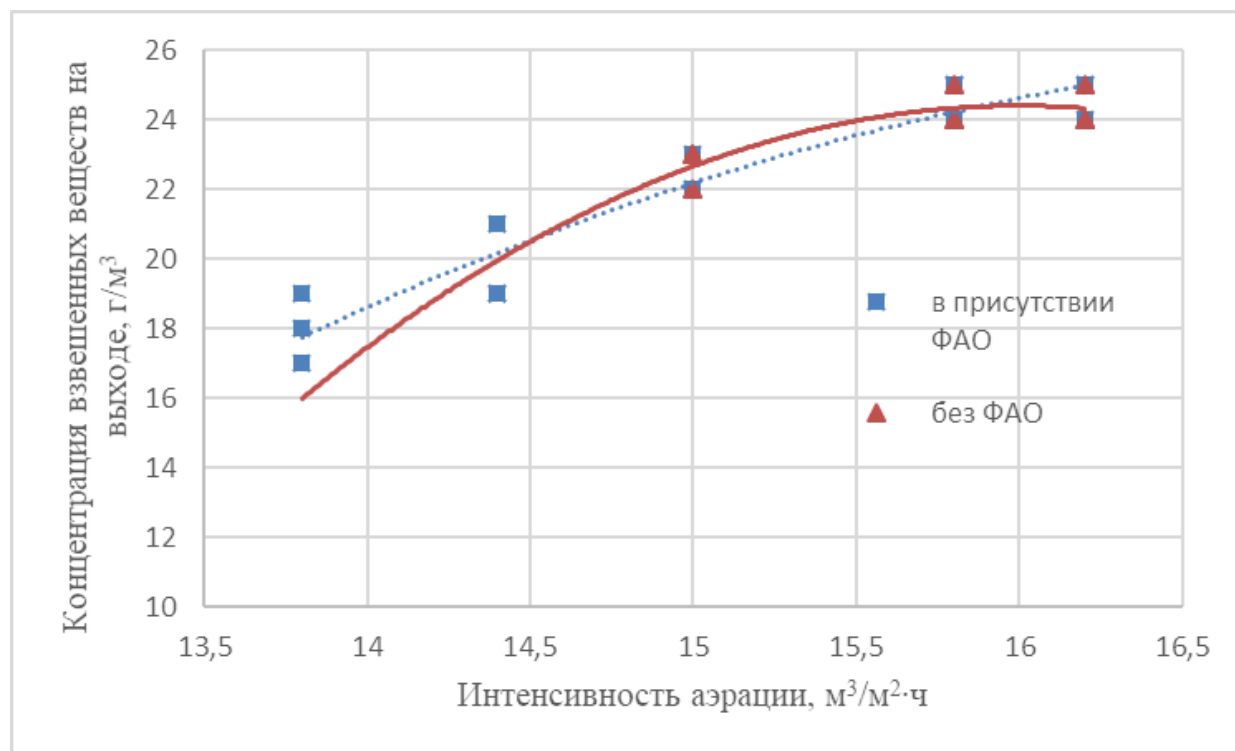


Рисунок 13 - Результаты эксперимента по определению качества осветления в эрлифтном биореакторе.

Основным технологическим параметром, оказывающим наибольшее влияние на эффективность процессов биологической очистки в схемах БОСЭБ является концентрация кислорода в зоне насыщения (верхняя часть эрлифтного биореактора). В ходе опытно-промышленных исследований установлено, что эта концентрация должна находиться в диапазоне 1,6-2,4 г/м³, что, с учетом конструктивных особенностей сооружения, соответствует интенсивности аэрации 13,5-14,5 м³/м²·ч. Указанный диапазон интенсивности аэрации, в свою очередь, соответствует значениям, требуемым для предотвращения выноса активного ила из осветлителя и обеспечения требуемой степени илоразделения в эрлифтном биореакторе. Необходимая степень очистки по взвешенным веществам определяется величиной интегрального показателя качества очистки (ИПКО).

В пятом разделе приведена оценка технико-экономической эффективности технологии БОСЭБ. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований работы систем с эрлифтными биореакторами, рассмотрена экономическая эффективность предлагаемых решений. Укрупненное описание основных технико-экономических показателей предлагаемой схемы А/А-ЭБ в сравнении с существующими, приведено в таблице 9.

По относительным показателям (времени пребывания, удельного расхода воздуха, степени рециклов и количества зон перемешивания) процесс БОСЭБ превосходит все использующиеся в настоящее время технологические схемы.

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 2021г., на что получено положительное заключение Комитета Экологической политики при Главе ДНР и Госстройэкспертизы ДНР.

Проектная производительность сооружений, согласно техническому заданию, составляла 1000 м³/сут.

Таблица 9 - Укрупненная характеристика схем биологической очистки сточных вод.

Технологическая схема	Интегральный показатель качества очистки ИПКО	Время пребывания сточной жидкости в процессе очистки T _{очт} , ч	Удельный расход воздуха на очистку и перемешивание I _{ок} м ³ /м ³	Кратность превышения рециркуляционных потоков над расходом исходного стока S _{PEЦ}	Количество условных зон механического перемешивания Z _{ПЕР}
Процессы УСТ и МУСТ	8-10	16...25	22...42	1,5...7,0	2
Йоханнесбургский процесс	9-12	17...26	22...42	1,5...7,0	3
Процесс DEPHANOX	7-10	30...36	18...34	1,0...5,0	3
Процесс А/А-ЭБ	7-10	18...24	15...20	0,6...1,0	2

Для станции очистки сточных вод пгт. Карло-Марксово предусмотрена реконструкция объекта незавершенного строительства по технологии БОСЭБ (первоначально запроектирована технология Биотал-1000). Согласно коммерческому предложению ООО «Биотал», стоимость технологической части объекта составила 26 млн.353 тыс. руб. Стоимость технологической части для реализации технологии БОСЭБ, согласно сметным расчетам, составила 12 млн. 137 тыс. руб.

Таким образом, экономический эффект от реализации технологии БОСЭБ составил 12млн или 54% относительно базового варианта.

В шестом разделе 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.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обоснованы критериальные параметры, позволяющие количественно оценить эффективность работы станций биологической очистки городских сточных вод. Предложенные параметры учитывают качество очистки, объем и гидродинамические характеристики сооружений, расход воздуха в системе с активным илом.
2. Предложена диаграмма требований к современным станциям очистки сточных вод, которая включает в себя аспекты качества очистки, надежности, управляемости и экологической безопасности данного вида деятельности.
3. Существующие схемы биологического удаления биогенных элементов (азота и фосфора) из сточных вод не обеспечивают высокого качества очистки. Причиной отклонения качества очистки сточных вод от расчетных значений является несовершенство вторичного илоразделения, связанное с протеканием во вторичных отстойниках анаэробных процессов в активном иле с выделением в очищенную воду вторичных загрязнений.
4. 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 высокоэффективными сооружениями для симультанной нитри-денитрификации, совмещенной с вторичным илоразделением.
5. Предложено понятие биохимического профиля биологической очистки. Построение такого профиля для проектируемых либо действующих сооружений позволяет наглядно оценить скорости протекающих процессов для принятия адекватных инженерных решений.
6. Предложена математическая модель сооружений очистки городских сточных вод в рамках концепции БОСЭБ, основанная на биохимических зависимостях ASM3+Bio-P, гидродинамических зависимостях эрлифтного биореактора и балансовых уравнениях в системе очистки. В качестве инструмента биохимического моделирования предложено использовать программную среду Cell

Designer, позволяющую визуализировать и контролировать не только изменения масс компонентов системы, но и вклад каждого отдельного процесса.

7. Предложены собственные технологические схемы удаления органических загрязнений, соединений азота и фосфора, названные «ЭБ», «А-ЭБ», «А-А-ЭБ», «А/А-ЭБ», включающие элементы улучшенного биологического удаления фосфора и симультанной нитри-денитрификации в эрлифтных биореакторах.
8. Выполнено моделирование работы системы БОСЭБ по предложенным схемам А-А-ЭБ и А/А-ЭБ. По результатам моделирования теоретически установлены пределы соотношений органических загрязнений и биогенных элементов в исходном стоке, при котором будет обеспечиваться качество очистки до норм действующего Федерального Закона РФ № 7-ФЗ "Об охране окружающей среды".
9. Сконструирована опытно-промышленная установка биологической очистки сточных вод по схемам А-А-ЭБ и А/А-ЭБ с использованием эрлифтных биореакторов. Установка работала на реальных городских сточных водах г. Донецка с обеспечением необходимой степени удаления органических загрязнений и биогенных элементов.
10. Выполнена оценка адекватности предложенной модели путем сопоставления результатов теоретических расчетов и опытно-промышленных исследований. Выполнена оценка сходимости результатов теоретических расчетов с данными работы опытно-промышленной установки, которая показала достаточную адекватность предложенной модели.
11. Установлено, что для сточных вод г. Донецка более эффективной является схема А/А-ЭБ, характеризующаяся удельным расходом воздуха $I_{OK} 15 \text{ м}^3/\text{м}^3$, коэффициентом рециркуляции $S_{РЕЦ} 0,7$ и устройством 2-х зон перемешивания ($Z_{ПЕР}$).
12. 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.
13. Результаты исследований внедрены при разработке проекта реконструкции очистных сооружений пгт. Карло-Марксово, ДНР, производительностью $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Экономический эффект от внедрения системы БОСЭБ относительно базового варианта (технология «Biotal») составил 14,21 млн.руб. или 54% по капитальным затратам.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

- публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. 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. *(проанализированы перспективы использования для очистки городских сточных вод аэротенков с затопленной эрлифтной аэрацией – элемента эрлифтного биореактора).*
2. 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)*
3. 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).*
4. 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).*
5. 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).*
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. 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. *(приведены основные результаты опытно-промышленных испытаний технологии очистки сточных вод на базе эрлифтных биореакторов).*
- публикации в зарубежных журналах, индексируемых международной реферативной базой цитирования SCOPUS:**
12. 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).*

13. 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 GXPSSO. (*приведены результаты исследований по определению граничных параметров работы эрлифтной циркуляции для обеспечения илоразделения во взвешенном слое активного ила*).

– публикации по материалам конференций:

14. 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.

15. Рожков, В.С. Сравнение подходов к моделированию биологической очистки сточных вод в Украине и других странах / В. С. Рожков, Ю. В. Васильева // Сборник статей 5ой Восточно-Европейской конференции «Опыт и молодость в решении водных проблем», – Киев, – 26-28 июня 2013. – С344-351.

16. 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.

17. 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.

18. 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:

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.

– публикации в других изданиях:

20. 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.