

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»


На правах рукописи

Февральских Ольга Викторовна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ХОЗЯЙСТВЕННО-
БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА
НА БИОФИЛЬТРАХ**

Специальность: 2.1.4 – Водоснабжение, канализация, строительные системы
охраны водных ресурсов

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Гогина Елена Сергеевна

Самара 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА БИОФИЛЬТРАХ	12
1.1 Конструктивное исполнение биофильтров	15
1.1.1 Капельные биофильтры.....	16
1.1.2 Высоконагружаемые биофильтры.....	18
1.1.3 Башенные биофильтры.....	19
1.1.4 Затопленные биофильтры	19
1.2 Классификация и конструктивное исполнение загрузочных материалов	24
1.2.1 Засыпной загрузочный материал.....	24
1.2.2 Блочный загрузочный материал.....	27
1.2.3 Рулонный загрузочный материал	30
1.3 Технологические схемы очистки сточной воды на биофильтрах.....	31
Выводы по главе 1.....	35
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА НА БИОФИЛЬТРАХ.....	36
Задачи исследований.....	36
2.1 Методика проведения исследований	36
2.2 Выбор оптимальных загрузочных материалов	39
2.3 Проведение лабораторных исследований по определению времени контакта воды с поверхностью загрузочного материала в биофильтре.....	47
2.4 Результаты лабораторных исследований на модельной жидкости	52
2.4.1 Первый этап эксперимента.....	52
2.4.2 Второй этап эксперимента	62
2.4.3 Исследование работы лабораторной модели при периодическом поступлении сточных вод.....	88
2.5 Результаты работы биофильтров, работающих в режиме нитрификации- денитрификации в полупроизводственных условиях	90
Выводы по главе 2.....	101
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОФИЛЬТРОВ	102

3.1 Обзор существующих методов моделирования и расчета очистки сточной воды на биофильтрах	102
3.2 Математическое моделирование биофильтров.....	104
3.3 Верификация разработанной математической модели	114
Выводы по главе 3	116
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА БИОФИЛЬТРАХ	117
4.1 Рекомендации по реконструкции очистных сооружений г. Мытищи.....	117
4.2 Технико-экономический расчет реконструкции канализационных очистных сооружений с. Эльбрус	128
Выводы по главе 4.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132
Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы	133
Список литературы	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ В	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	164

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Интенсивный рост городов и агломераций является причиной увеличения антропогенной нагрузки на водные объекты и обуславливает необходимость строительства, реконструкции и модернизации систем и сооружений водоснабжения и водоотведения.

Рост антропогенной нагрузки способствует развитию эвтрофикации водных объектов, основной причиной которой является сброс недоочищенных сточных вод, особенно с повышенным содержанием биогенных элементов. Эвтрофикация не только негативно сказывается на фауне водоемов, но и приводит к увеличению стоимости водоподготовки для городов и населенных пунктов. Таким образом, целесообразным представляется предотвращение попадания биогенных элементов в водный объект при помощи наиболее энергоэффективной и экономически обоснованной технологии.

Основная доля муниципальных очистных сооружений была построена в 60–80-е годы XX века. В том числе в эти годы было построено большое количество сооружений биофильтрации. Однако за прошедшие десятилетия существенно изменилось природоохранное законодательство, вследствие чего большая часть муниципальных сооружений морально устарела. Разработанные в конце прошлого века технологии не позволяют достичь требуемого на сегодняшний день качества очистки, при этом непосредственно конструктивно сооружения находятся в работоспособном состоянии. Таким образом, представляется необходимым провести исследования по разработке технологических схем биофильтрации, которые впоследствии могли бы быть использованы как для строительства новых очистных сооружений, так и для реконструкции имеющихся.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиям биофильтров посвящены работы ученых: D. S. Chaudhary, M. Henze, K. A. Rabbani, И. М. Таварткиладзе.

В России особое внимание процессам биологической очистки посвятили: С. В. Яковлев, Т. А. Карюхина, И. Н. Чурбанова, Н. А. Залетова, В. И. Баженов, И. И. Павлинова, В. Н. Швецов. Существенный вклад в изучение вопросов биофильтрации внесли ученые: Ю. В. Воронов, В. П. Саломеев, А. Л. Ивчатов, Е. В. Вильсон.

Однако технологии денитрификации-нитрификации при применении биофильтров до сих пор не получили должного развития и внедрения. Не предложено и единого метода расчета биофильтров с учетом удаления соединений азота.

Объект исследования

Городские канализационные очистные сооружения биологической очистки сточных вод.

Предмет исследования

Процесс биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от органических загрязнений и соединений азота на биофильтрах.

Цель исследования

Разработка технологии глубокой биологической очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах с определением технологических параметров и методики расчета.

Задачи исследования:

- экспериментальное исследование глубокой биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота на биофильтрах с чередующимися аноксидными (анаэробными) и аэробными зонами;
- формирование математической модели процесса глубокой биологической очистки сточных вод на биофильтрах с денитрификацией-нитрификацией;
- разработка методики расчета биофильтров с денитрификацией-нитрификацией с учетом скорости фильтрования, типа загрузочного

материала, площади контакта воды с биопленкой, температуры сточных вод и времени пребывания очищаемой воды;

– применение разработанных технологических схем глубокой биологической очистки сточных вод на биофильтрах с денитрификацией-нитрификацией для строительства и реконструкции очистных сооружений;

– технико-экономическое обоснование разработанной технологии глубокой биологической очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах с чередующимися аноксидными (анаэробными) и аэробными зонами.

Научная новизна

– теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность проведения процесса глубокой биологической очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах, работающих в режиме с денитрификацией - нитрификацией с чередующимися аноксидными (анаэробными) и аэробными зонами и рециркуляцией возвратного потока очищенной сточной воды, с разными типами загрузочного материала.

– установлена зависимость эффективности очистки сточных вод от формирования видового состава биологической пленки на биофильтрах с чередующимися аноксидными (анаэробными) и аэробными зонами, образующейся в условиях рециркуляции очищенной сточной воды;

– установлены математические зависимости, описывающие процесс глубокой биологической очистки сточных вод на биофильтрах при одновременном проведении процессов денитрификации - нитрификации.

Теоретическая и практическая значимость исследования

– разработана и теоретически обоснована технология глубокой биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота на биофильтрах с применением процессов денитрификации - нитрификации с рециркуляцией возвратного потока очищенной воды с разными типами загрузочных материалов;

- разработана методика расчета биофильтра для проведения процессов денитрификации - нитрификации, учитывающая скорость фильтрования, тип загрузочного материала, площадь контакта воды с биопленкой, температуру сточных вод и время пребывания очищаемой воды вод в реакторе;

- определены оптимальные режимы работы и технологические параметры биофильтра для обеспечения эффективной глубокой биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод;

- разработаны рекомендации по применению разработанной технологии для реконструкции станции очистки сточных вод г. Мытищи (Московская область), составлен плана снижения сбросов загрязняющих веществ торгового центра «Жемчужина Сибири», Тобольск, подготовлены предпроектные решения по реконструкции канализационных очистных сооружений с. Эльбрус.

Методология и методы исследования

В ходе решения поставленных задач использовались общепринятые методы экспериментального и математического исследования, а именно:

- методы моделирования процессов очистки сточных вод на модельной жидкости и реальной сточной воде;

- методы планирования эксперимента, технологического контроля, организации и управления процессом эксперимента с лабораторной моделью с применением вычислительной техники;

- методы обработки результатов экспериментов на основании исследований с использованием микроскопии и инструментов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты лабораторных и полупроизводственных экспериментов на искусственно составленной сточной жидкости и реальной сточной воде, выполненные при различных технологических режимах, обеспечивающих одновременное проведение процессов денитрификации и

нитрификации, описанные в виде математических уравнений с эмпирически установленными коэффициентами;

– оптимальные технологические параметры для реализации предложенной технологии для глубокой биологической очистки сточных вод от органических загрязнений и соединений азота;

– рекомендации для расчета строительства и реконструкции канализационных очистных сооружений очистки сточных вод с использованием биофильтров.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается длительностью экспериментов, сходимостью результатов, полученных в лабораторных и полупроизводственных условиях, применением стандартизированных методов измерений и анализа, использованием методов статистической обработки результатов.

Апробация результатов работы

Основные результаты исследования выносились на обсуждение на конференциях и семинарах: IWA 6th Eastern European Young Water Professionals Conference “EAST Meets WEST” (28–30 мая 2014 г., Стамбул, Турция), 11-м международном водном форуме «Вода: экология и технология» ЭКВАТЭК 2014 (3–4 июня 2014 г., Москва), Восемнадцатой Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (22–24 апреля 2015 г., Москва), Международной научной конференции «Молодые исследователи – регионам» (21–22 марта 2015 г., Вологда), XII Научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН Сергея Васильевича Яковлева «Яковлевские чтения» (15–17 марта 2015 г., Москва), IWA 7th Eastern European Young Water Professionals Conference (17–19 сентября 2015 г., Белград, Сербия), Межрегиональной научной конференции «IX Ежегодная 10-я научная сессия аспирантов и молодых ученых» (26–27 ноября 2015 г., Вологда), Научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Энергоэффективные технологии водоснабжения и водоотведения» в рамках

деловой программы Международного водного форума (выставки) «Вода: экология и технология» ЭКВАТЭК-2016 (27 апреля 2016 г., Москва), IWA 9th Eastern European Young Water Professionals Conference (24–27 мая 2017 г., Будапешт, Венгрия), 6th International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, (14–16 ноября 2018 г., Москва), The Sixth German-Russian Week of the Young Researcher “Urban Studies:City of the Future” (12–16 сентября 2016 г., Москва), XXII International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment (18–21 апреля 2019 г., Ташкент, Узбекистан), XIV Международной научно-практической конференции «Техновод-2023» (18–21 апреля 2023 г., Кисловодск), Всероссийской научно-технической конференции «Совершенствование систем водоснабжения и водоотведения по очистке природных и сточных вод» к 90-летию кафедры «Водоснабжение и водоотведение» (26–27 октября 2023 г., Самара), Международной научной конференции XV Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л. «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность. Искусственный интеллект» (2–4 июля 2024 г., Москва).

Результаты работы были поддержаны стипендией Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, № СП-2261.2015.1.

Разработанные на основе результатов исследований проектные рекомендации были использованы при разработке предпроектных решений реконструкции очистных сооружений хозяйственно-бытовых сточных вод г. Мытищи (Московская область), составлении плана снижения сбросов загрязняющих веществ торгового центра «Жемчужина Сибири», Тобольск, подготовке предпроектных решений реконструкции канализационных очистных сооружений с. Эльбрус. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Строительство систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» МГРИ.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно сформулировал цель и задачи исследований, разработал программу экспериментов, спроектировал испытательные стенды моделей биофильтров с чередующимися аноксидными (анаэробными) и аэробными зонами, провел серию испытаний. На основе результатов экспериментов разработал технологию глубокой очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота на биофильтрах с одновременным проведением процессов денитрификации-нитрификации. Также автор разработал математическую модель для расчета характеристик биофильтра в режиме глубокой очистки воды на основе аппроксимации результатов экспериментов и предложил на ее основе алгоритм программы для ЭВМ. Автором апробированы результаты полученных исследований и подготовлены научные публикации.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.1.4 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов», пункты «Методы очистки природных и сточных вод, технологические схемы и конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов» и «Применение информационных технологий для автоматического контроля, управления и повышения эффективности работы сооружений и оборудования систем водного хозяйства».

Публикации по результатам исследований

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых изданиях. Материалы диссертации опубликованы в 22 печатных работах, в том числе 7 статей напечатаны в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»,

4 работы опубликованы в журналах, входящих в системы цитирования Web of Science, Scopus.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 164 страницах машинописного текста, включает 133 рисунков, 36 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 140 наименований, в том числе 42 – на иностранном языке, и приложений.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА БИОФИЛЬТРАХ

В основе биологической очистки сточных вод лежат естественные процессы жизнедеятельности микроорганизмов. Скопления микроорганизмов используют в качестве источника питания растворенные в воде органические соединения.

Сооружения биологической очистки можно разделить на сооружения с протеканием процесса очистки в условиях, близких к естественным, и реакторы, работающие в искусственно созданных условиях, – к таким сооружениям относятся аэротенки, биофильтры [94], циркуляционно-окислительные каналы, SBR-реакторы и т. д.

Искусственные сооружения бывают следующих типов: с активным илом, с прикрепленной биомассой и комбинированные реакторы, в которых находится активный ил и прикрепленная на загрузке биопленка.

В настоящее время основное внимание уделяется биофильтрам, реакторам с движущимся слоем биопленки, интегрированному активному илу с фиксированной пленкой, мембранным биопленочным реакторам и процессам гранулированного ила [103].

Биофильтр представляет собой реактор, заполненный загрузочным материалом, на котором зафиксирована биологическая пленка. Биопленка представляет собой скопление микроорганизмов, которые окисляют загрязнения, находящиеся в сточной воде, вступая в контакт с каплями очищаемой воды, проходящими биофильтрацию.

Биофильтр можно представить в виде биосорбционного реактора, осуществляющего более интенсивное по сравнению с аэротенком изъятие загрязнений из сточной воды [80].

Впервые капельный биофильтр был представлен в Англии в 1893 году [87, 104]. Отечественные исследования биофильтров в 1963 году проводили С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов и др. [11,12,13,14,94]. Далее работу по изучению биофильтров продолжили В. П. Саломеев, А. Л. Ивчатов, Е. В. Вильсон и др. [10, 25, 74].

Методы биофильтрации описаны и рекомендованы справочниками НДТ [26], европейскими справочниками BREF и техническим справочником компании Degrémont [81].

Пик проектирования и строительства биофильтров пришелся на 1960–1970-е годы. Основными сооружениями для очистки тогда являлись аэротенки и биофильтры. К сожалению, в 90-х годах прошлого века наблюдалось значительное снижение активности как проектных, так и научно-исследовательских работ. За последние годы существенно изменились требования к эффективности очистки сточной воды хозяйственно-бытового происхождения, изменился расход, приходящийся на очистные станции, поменялся состав поступающих сточных вод.

Классификация биологических фильтров достаточно обширна. Основные типы биофильтров [12, 73, 69] приведены на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 - Классификация биофильтров по типу контакта загрузочного материала с водой

Биофильтры подразделяются на две крупные категории. Первая – это реакторы с прикрепленной биопленкой, иммобилизированной на поверхности загрузочного материала, через который протекает вода. Такие реакторы в литературе называют орошаемыми биофильтрами [81], «сухими» [24] или капельными.

Вторая крупная категория – затопленные биофильтры, в сооружениях этого типа загрузка находится в толще воды [33]. Такие биофильтры можно разделить на две крупные подкатегории: погружные фильтры [73] и биофильтры с затопленной загрузкой [76, 35, 69] (часто называют биореакторами с загрузочным материалом и биотенками).

На практике существует достаточно тонкая грань между затопленным биофильтром и биореактором с загрузочным материалом, как правило, классификация зависит от процентного содержания загрузки в реакторе.

Также биологические фильтры подразделяются (рис. 1.2) по *способу вентиляции сооружения* (с естественной и искусственной подачей воздуха) и *по наличию рециркуляции*, по *способу подачи воды* (с нисходящим и восходящим потоком воды), по *конструктивному исполнению загрузочного материала*.

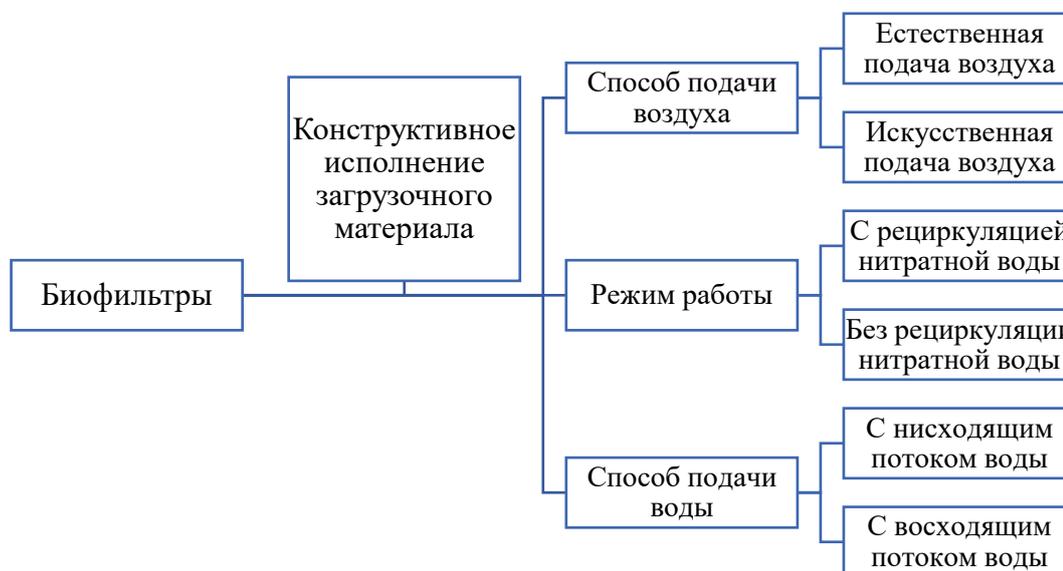


Рисунок 1.2 - Классификация биофильтров по конструктивным и технологическим признакам

В главах 1.1 и 1.2 детально рассмотрены наиболее популярные конструктивные исполнения биологических фильтров и различных загрузочный материал.

1.1 Конструктивное исполнение биофильтров

Биофильтры проектируются со сплошными и несплошными стенками и двойным дном. Стенки биофильтров выполняются из различных материалов, как правило, это сборный железобетон или кирпич. В биофильтре конструктивно предусмотрены бортики: стена сооружения выше слоя загрузочного материала на 0,5–0,7 м [87, 94].



Рисунок 1.3 - Биофильтры в Великобритании [135]

Биофильтры проектируются в виде круглых, многогранных или прямоугольных резервуаров [11,12, 80, 87,135].



Рисунок 1.4 - Биофильтры г. Сатка (фотографии представлены АО «Энергосистемы»)

1.1.1 Капельные биофильтры

Капельный (оросительный, орошаемый или перколяторный) биофильтр – сооружение с биопленкой, заполненное загрузочным материалом. Через слой загрузочного материала при помощи распределительных устройств проходит очищаемая вода. Осуществляется процесс биофильтрации: сточная жидкость на своем пути соприкасается с биологической пленкой, в которой и происходит окисление [11,12, 23, 33, 94, 69, 87].

В капельном биофильтре сточная вода подается в виде капель или струй, слой загрузочного материала составляет 1–2 м.

В капельном биофильтре преимущественно используется естественная вентиляция, которая происходит через открытую поверхность, дренаж и смотровые окна за счет разницы температур.

Встречаются конструкции капельных биофильтров, где устроены несплошные стенки, например, из кирпича, уложенного в шахматном порядке, без прилегания друг к другу. Гидравлическая нагрузка в классических капельных биофильтрах, как правило, составляет $0,5\text{--}2 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$.

Капельный биофильтр – традиционный реактор с биопленкой, применяется для очистки как хозяйственно-бытовых, так и промышленных сточных вод. На рис. 1.5 представлена общая схема работы орошаемого биофильтра.

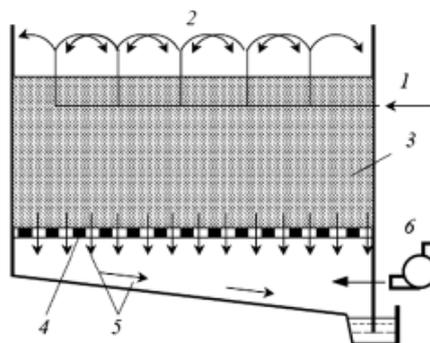


Рисунок 1.5 - Схема работы биофильтра:

- 1 – подача сточной воды; 2 – распределение сточной воды; 3 – загрузочный материал;
4 – дренаж; 5 – очищенная сточная вода; 6 – подача воздуха

Очищаемая вода через водораспределительное устройство 2 поступает в слой фильтрующей загрузки 3.

В России предложены различные варианты таких биофильтров, конструктивно различающихся только загрузочным материалом [59, 33, 12, 94]. Диапазон проектной мощности построенных в прошлом веке биофильтров с жесткой засыпной и мягкой загрузкой составляет, как правило, до $10\ 000 \text{ м}^3/\text{сут}$, с жесткой блочной – до $50\ 000 \text{ м}^3/\text{сут}$ [94]. Большинство существующих канализационных очистных сооружений, имеющих в своем составе биофильтры, работают с производительностью до $20\ 000 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Известны комбинированные сооружения [29, 52] с использованием капельных биофильтров (рис. 1.6).

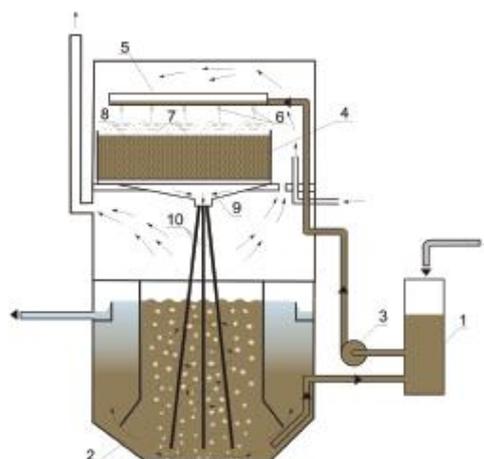


Рисунок 1.6 - Комбинированная установка:

1 – камера смешения; 2 – аэротенк-отстойник; 3 – насос; 4 – биофильтр;
5 – распределительные лотки; 6 – сливные патрубки; 7 – отражательные диски; 8 –
загрузка; 9 – сборный поддон; 10 – аэрационные колонны

Одним из преимуществ биофильтров в сравнении с прочими реакторами являются низкие энергозатраты во время их эксплуатации. Это объясняется отсутствием необходимости интенсивного насыщения сточных вод кислородом, а также перемешивания.

1.1.2 Высоконагружаемые биофильтры

В России высоконагружаемые фильтры получили название «аэрофильтры». Конструктивно такие биофильтры аналогичны капельным, однако слой загрузочного материала больше – 2–4 м. Благодаря большому обмену воздуха в таких сооружениях заиливание реактора снижается. В них, как правило, используют загрузочный материал крупных фракций. Благодаря повышенной нагрузке по воде окислительная мощность в таких сооружениях выше. Известна конструкция закрытых аэрофильтров с верхней подачей воздуха, который подается сверху вниз [94].

Как правило, высоконагружаемые биофильтры характеризуются также повышенной скоростью движения сточной жидкости, что способствует

выносу задержанных нерастворенных примесей и отмирающей биопленки. Особенностью эксплуатации аэрофильтра является необходимость увеличения гидравлической нагрузки ($10\text{--}30 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$), чтобы обеспечить промывку биофильтров [11,15, 33, 94,127].

1.1.3 Башенные биофильтры

Башенные биофильтры конструктивно схожи с капельными биофильтрами, высота слоя загрузки составляет 8–16 м [14, 94]. Какого-либо распространения в нашей стране такие сооружения не получили. Несмотря на это, в Российской Федерации запатентованы различные модификации башенного биофильтра [59, 53, 55]. На рис. 1.7 представлен башенный биофильтр в Швейцарии.



Рисунок 1.7 - Башенный биофильтр в Швейцарии (16 м)

1.1.4 Затопленные биофильтры

Затопленные биофильтры – реакторы, в которых загрузка находится в толще воды [24, 69, 94].

Условно разделить такие биофильтры можно на биофильтры с затопленной загрузкой и погружные (полупогружные).

К первой категории можно отнести разработку компании Degrémont – Biofor – затопленный биореактор, заполненный загрузочным материалом

Biolite. В реактор, представленный на рис. 1.8, очищаемая вода подается снизу через колпачки, которые непрерывно аэрируются [81].

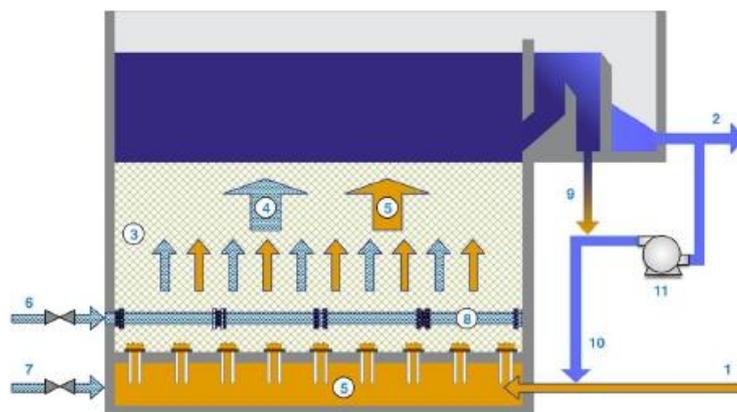


Рисунок 1.8 - Biofor [81, 69]:

1 – подача воды; 2, 5 – очищенная и сточная вода; 3 – загрузочный материал; 4 – воздух;
6, 7 – подача воздуха (8) аэратором; 9, 10 – промывная вода

Также к категории затопленных биофильтров относится технология реактора с подвижным слоем. Данная технология основывается на комбинации классической технологии с активным взвешенным илом и технологии с применением биопленки. В биореакторе загрузочный материал, который является носителем для биопленки, поддерживается во взвешенном состоянии благодаря системе аэрации или же за счет разницы плотности материала и сточных вод. Согласно зарубежным исследованиям [105,138], в реакторе MBBR снижение ХПК достигает 90 %, а снижение концентрации фенола – 95 % при условии меньшего объема сооружений в сравнении с классической технологией со взвешенным илом.

Аналогичной технологии MBBR является технология реактора с жестко закрепленным носителем (FBBR), в котором также сочетаются традиционные процессы, происходящие в реакторах с активным илом и в биофильтрах, используется взвешенная биомасса и прикрепленная биомасса [30, 31, 87]. Загрузочный материал – носитель биомассы, как следует из названия, закреплен в виде блочных конструкций.

К затопленным биофильтрам также относится биофильтр с псевдооживленным слоем (FBR). Биологическая пленка иммобилизируется на

плавающей загрузке. Достигается это при помощи непрерывного восходящего потока воды [99]. Каждый элемент загрузки, находясь во взвешенном состоянии внутри субстрата, полностью им окружен, что повышает производительность биореактора. Однако необходимо учесть, что псевдооживленный слой расширяется, а это влечет за собой увеличение объема реактора. Данная технология применима в большей степени для промышленных сточных вод, например, сточных вод фармацевтических производств. Множество ученых проводили исследования технологии биофильтров с псевдооживленным слоем. Например, Гонсалес [114, 115] изучал удаление фенолов из сточных вод в лабораторных условиях с применением колонны с псевдооживленным слоем. Полученные результаты внушают надежду на проведение более глубоких исследований в этой области и дальнейшую разработку моделей биореакторов в промышленных масштабах в ближайшей перспективе.

Другой разновидностью биофильтра с псевдооживленным слоем является биофильтр с частично псевдооживленным слоем (Semifluidized-Bed Reactor). Такого типа реакторы также применимы для очистки вод от промышленных производств. В отличие от реактора с псевдооживленным слоем скорость восходящего потока в таких реакторах выше, а значит, выше и производительность реактора. Загрузочный материал находится во взвешенном состоянии, образуя так называемый псевдооживленный слой, на заданной высоте в колонне реактора закрепляется решетка (сетка). Достигая этой высоты, загрузочный материал накапливается там, образуя уплотненный слой. Таким образом, загрузочный материал формирует два слоя – псевдооживленный и уплотненный (рис. 1.9).

Ряд ученых опубликовали экспериментальные исследования аэробной очистки сточных вод с помощью инверсных реакторов с псевдооживленным слоем (рис. 1.10) [117, 132, 133, 137]. Исследовалась очистка сточных вод нефтеперерабатывающих и пивоваренных заводов [132, 133, 137], очистка сточных вод от крахмала [130] и очистка бытовых сточных вод [117]. В

инверсных реакторах с псевдооживленным слоем используется верхняя подача исходных сточных вод. Загрузочный материал находится во взвешенном состоянии благодаря низкой плотности используемых элементов.

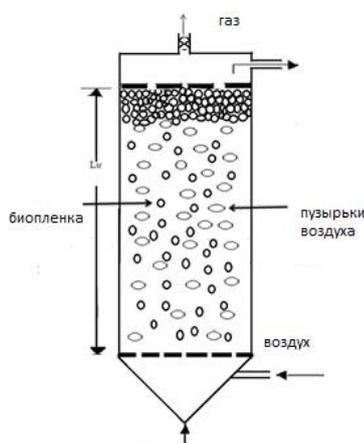


Рисунок 1.9 - Схематичное изображение реактора с частично псевдооживленным слоем

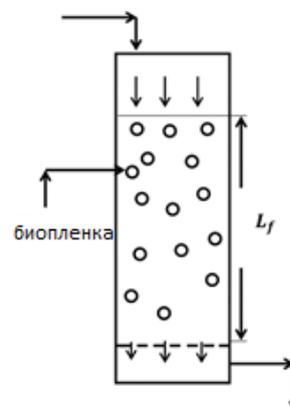


Рисунок 1.10 - Схематичное изображение инверсного реактора с псевдооживленным слоем

Еще одной разновидностью биореактора является DSFF-реактор (downflow stationary fixed film). В данном реакторе очистка производится с помощью биопленки, образующейся на внутренней поверхности труб, через которые протекают очищаемые сточные воды. Пандей и Нараянан [124,126] успешно исследовали многоканальные DSFF-биореакторы для биодеструкции молочной кислоты в сточных водах молочного производства (синтетического образца). В ходе исследования была сформирована математическая модель с последующими экспериментами на промышленной установке. Для очистки применялся многоканальный (до 30 каналов) реактор с диаметром труб 25,4 мм, длина труб составляла 6 м. Эффективность разложения молочной кислоты достигала 78 %.

К погружным биофильтрам можно отнести реакторы с периодически затопляемой загрузкой.

В нашей стране такие сооружения получили название дисковых биофильтров. Биофильтр, представленный на рис. 1.11, состоит из ряда дисков, расположенных на вращающемся горизонтальном валу.

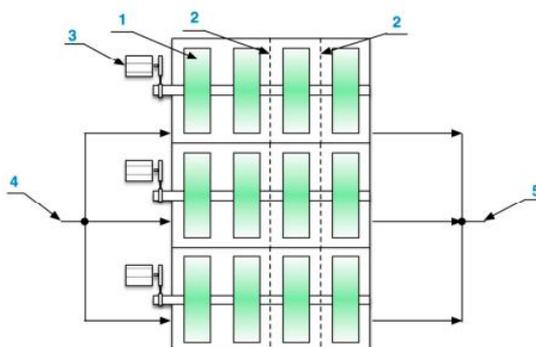


Рисунок 1.11 - Дискový биофильтр [116, 69]:

1 – диски; 2 – перегородки; 3 – приводы; 4 – подача; 5 – выход

Дискóвые биофильтры эффективно осуществляют удаление органических и взвешенных веществ – до 95 % [69].

Изобретение [58] (рис. 1.12) обеспечивает улучшение эффективности очистки сточных вод за счет увеличения скорости переноса кислорода. Особенностью изобретения является использование мобильных загрузочных материалов с большой площадью поверхности.

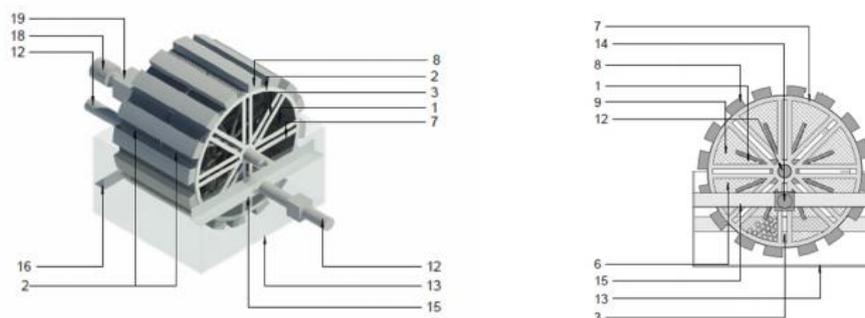


Рисунок 1.12 - Модифицированный погружной вращающийся биофильтр:

1 – барабан; 2 – цилиндр; 3 – вентиляционный зазор; 4 – опорные кольца; 5 – ребра; 6 – сетка; 7 – каркас; 8 – черпалки; 9 – ячейки; 12 – вал; 13 – резервуар биофильтра; 14 – подача; 15 – распределение воды; 16 – лоток отвода; 17 – отвод; 18 – двигатель

К недостаткам затопленных биофильтров можно отнести высокие по сравнению с орошаемыми биофильтрами затраты на электроэнергию.

1.2 Классификация и конструктивное исполнение загрузочных материалов

По виду загрузочного материала биофильтры традиционно классифицируются на биофильтры с объемной загрузкой и плоскостной. Однако в последнее время используется загрузочный материал, который обладает свойствами как объемного, так и плоскостного. Таким образом, целесообразно подразделять загрузку на засыпную, блочную, мягкую или рулонную [12, 14, 94].

Для изготовления современных загрузок для реакторов используется различный исходный материал: поливинилхлорид, первичный и вторичный полипропилен, поликарбонат, тефлон, полиамид, полиэтилен и другие материалы. Основными требованиями к материалу, из которого изготавливается загрузка, являются способность фиксировать на себе биомассу и отсутствие вторичных загрязнений от самого сырья.

В последнее время загрузочный материал используется в компактных очистных сооружениях для частных домов, а также для интенсификации работы различных биореакторов, а значит, увеличиваются и темпы производства [16,97].

1.2.1 Засыпной загрузочный материал

Основной характеристикой загрузочного материала является его хаотичное расположение в реакторе.

В Российской Федерации еще со времен СССР активно в качестве загрузки используется щебень, такой загрузочный материал на биофильтрах был распространен вплоть до 1970-х годов и на сегодняшний день эксплуатируется на многих объектах [11, 25, 73].

В качестве носителя биомассы в биофильтрах используются шунгизит, керамзит, гравий, термозит, керамика, пластмасса, металлы [21, 76].

Для барабанных биофильтров в качестве засыпной загрузки используют различные пластмассовые изделия (кусочки труб, шарики и т. п.) [80, 79, 93].

Современные производители часто используют такие термины, как тонущая и плавающая загрузка, загрузочный материал именуют наполнителем для биофильтров [4, 5, 6, 7].

Также такой загрузочный материал можно классифицировать следующим образом: с наружной поверхностью, с внутренней поверхностью, с наружной и с внутренней поверхностью.

Некоторые из «тонущих» материалов представлены на рис. 1.13–1.16.



Рисунок 1.13- Тонущий загрузочный материал. Размеры элемента: диаметр – 14 мм, высота – 12 мм [5]



Рисунок 1.14 - Загрузочный материал производства Kaldner. Размеры элемента: диаметр – 14 мм, высота – 12 мм



Рисунок 1.15 - Кольца Рашига, полиэтиленовые пористые цилиндры. Наружный диаметр– 120 мм, толщина стенки – до 10 мм.

Удельная площадь орошения – до 55 м²/м³



Рисунок 1.16 - Загрузочный материал производства «Агростройсервис» [46].
Размеры элемента: диаметр – 16 мм, высота – 10 мм

Зачастую засыпной (насыпной) загрузочный материал в биофильтрах используется как плавающий в затопленных реакторах и наоборот.

Плавающая биозагрузка представляет собой элементы из полимерных материалов. На стенках загрузки нарастает пленка из бактерий – активный ил, который очищает воду путем разложения загрязнений на безопасные составляющие в процессе своей жизнедеятельности.

Немаловажным фактором при выборе плавающей биозагрузки является форма гранул (рис. 1.17–1.20), чтобы при эксплуатации исключить эффект их слипания между собой [80, 79].



Рисунок 1.17 - Загрузочный материал в виде кубиков из ППУ с размерами 2,5 x 2,5 см [6]



Рисунок 1.18 - Элементы биозагрузки Mutag BioChip («биочипсы») –пористые диски диаметром 25 мм и толщиной 1,1 мм [46]



Рисунок 1.19 - Загрузочный материал производства «Агростройсервис» [46]



Рисунок 1.20 - Бишары

У данного загрузочного материала существует такая характеристика, как плавучесть, которая бывает положительной, отрицательной либо нейтральной.

В работе Н. А. Макиши [35, 36] проводились исследования функционирования реакторов с различными плавающими материалами – высокую эффективность удаления соединений азота удалось достичь с использованием биосфер.

1.2.2 Блочный загрузочный материал

Блочный загрузочный материал достаточно широко распространен благодаря удобству монтажа [69]. На рис. 1.21–1.25 представлены различные загрузочные материалы от разных производителей [4, 5, 6, 7, 9, 46, 45, 135].

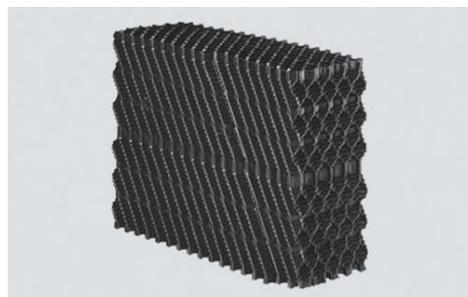
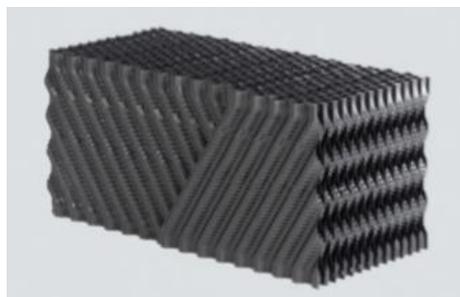


Рисунок 1.21 - Загрузочный материал с различным направлением движения воды производства Brentwood –с поперечно-перекрестной структурой и с трубчатыми каналами [135]

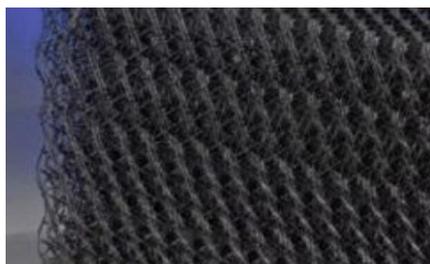


Рисунок 1.22 - Сетчатая загрузка BIOdek [27]

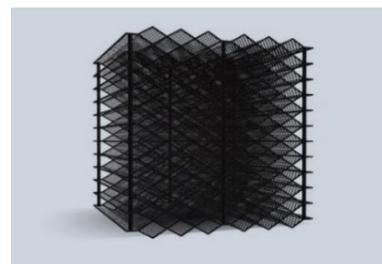


Рисунок 1.23 - Блок биологической загрузки НПО «Агростройсервис» [46]

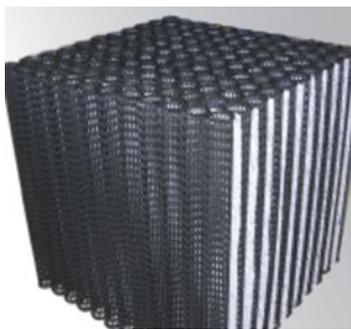


Рисунок 1.24 - Загрузочный материал «Полипортер» производства НПФ «Этек» [45]



Рисунок 1.25 - Блоки биологической загрузки производства НПК «Техводполимер» [7]

Загрузочные материалы (1.21–1.25), как правило, имеют общее название – блок биологической загрузки (ББЗ), различаются конфигурацией, определяющей движение воды, и материалом изготовления. Применение блоков биологической загрузки распространено как в капельных биофильтрах, так и в затопленных реакторах. Стандартные размеры блоков составляют 500 x 500 x 500 мм.

Такие блоки имеют ряд преимуществ: простота монтажа, высокая прочность, конструкция имеет небольшой вес.

Основным недостатком блочной загрузки является периодическое заиливание пространства между прутьями. Во избежание заиливания межъячеистых пространств необходимо организовывать процесс регенерации биопленки. Для правильной работы очистных сооружений с прикрепленной биомассой необходимо своевременно регенерировать загрузку, удаляя с нее излишнюю иммобилизованную биомассу. Для применения такого загрузочного материала следует уделить особое внимание механической очистке, поскольку в сточной воде присутствуют различные волокнистые включения, которые могут прикрепляться к загрузке [73], далее могут образовываться застойные зоны, которые, как правило, приводят к вторичному загрязнению. Регенерацию загрузки производят интенсивным встряхиванием, как правило, с помощью крупнопузырчатой аэрации [24, 30, 31].

К блочной загрузке можно отнести *жестко закрепленную загрузку*, представленную на рис. 1.26, 1.27.



Рисунок 1.26 - Загрузочный материал «Поливом» производства НПФ «Этек» [45]



Рисунок 1.27 - Кассета биологической загрузки Alta Air Master [100]

Жестко закрепленная загрузка, как правило, представлена в различных модификациях.

О. А. Ружицкая в работе [71] для удаления фосфатов использует загрузочный материал «Поливом», армированный низкоуглеродистой сталью. М. М. Пукемо в работе [69] рассматривает контактные биореакторы с петельным загрузочным материалом (рис. 1.26).

Следует отметить весьма распространенный в России ершовый загрузочный материал. Ершовая загрузка представляет собой металлические стержни, на которых расположены вертикально направленные щетины, которые, группируются в блоки, поэтому классифицировать такой загрузочный материал целесообразно как блочный (рис. 1.28 и 1.29).



Рисунок 1.28 - Ершовый загрузочный материал производства завода «ТехВодХоз» [9]



Рисунок 1.29 - Ершовый загрузочный материал производства НПО «Агростройсервис» [46]

1.2.3 Рулонный загрузочный материал

Рулонный загрузочный материал из пластмассы, металла, асбестоцемента, керамики, тканей и многих других материалов используют в качестве загрузки для биофильтра. Рулонный материал относят к плоскостной загрузке [12, 94].

Материал ARMAfilter представляет собой плоские листы, которые состоят из спрессованных полиэтиленовых волокон. Они выполняют одновременно две функции: биологическая очистка воды и фильтрация взвесей и твердых частиц [20]. На рис. 1.30–1.31 представлен рулонный загрузочный материал.

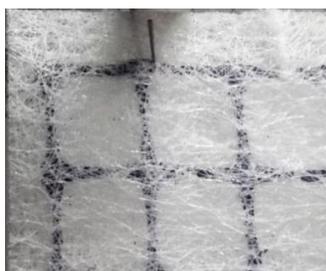


Рисунок 1.30 - Листовой загрузочный материал «Поливом» производства «Этек» [45]



Рисунок 1.31- Matala

Исследования очистки сточных вод с крупнопористым рулонным материалом проводил Д. Г. Смирнов в своей работе [77]. Однако в последнее время рулонный загрузочный материал не имеет широкого распространения.

При всем многообразии загрузочного материала можно выделить общие характеристики, некоторые примеры представленные в табл. 1.1.

Таблица 1.1- Характеристики загрузочных материалов

Название	Материал	Тип	Пористость	Удельная поверхность (теоретическая)
Поливом [45]	Полимер	Плоскостной	До 90 %	До 3000 м ² /м ³
ББЗ [7]	Полимер	Блочный	93–97 %	60–350 м ² /м ³
ПЗ плавающая [7]	ПНД	Засыпной	70–80 %	693,6 м ² /м ³
ПЗ тонущая [7]	ПНД	Засыпной	70–80 %	693,6 м ² /м ³
ВЮ-850 [7]	ПНД	Засыпной	70–80 %	850 м ² /м ³

1.3 Технологические схемы очистки сточной воды на биофильтрах

Биофильтр может являться основным очистным сооружением средней (и меньше) мощности. Однако в современных схемах биофильтры применяются в качестве предварительной очистки и чаще всего как ступень доочистки.

На советскую эпоху пришелся пик строительства биофильтров, было разработано множество типовых проектов. Наибольшую популярность получили капельные (орошаемые) биофильтры. Классическая схема очистки на биофильтрах включает в себя биофильтр как основной реактор биологической очистки и вторичный отстойник, в большинстве случаев осуществляется рециркуляция нитратной воды (рис. 1.32). Такие технологические схемы хорошо изучены и работают с 60–70-х гг. прошлого века, обеспечивая полную биологическую очистку [94, 13, 14, 10].



Рисунок 1.32 - Принципиальная схема очистки сточных вод с биофильтром в качестве основного реактора

Следует отметить, что запроектированные и построенные по описанной схеме (рис. 1.31) сооружения в большинстве случаев обеспечивают проектную эффективность очистки и находятся в работоспособном состоянии.

Современные требования к качеству очищаемой воды более высокие, поэтому технологические схемы с использованием только биофильтров достаточно редкие, как правило, это двухступенчатые схемы [23, 106, 120] (рис. 1.33).

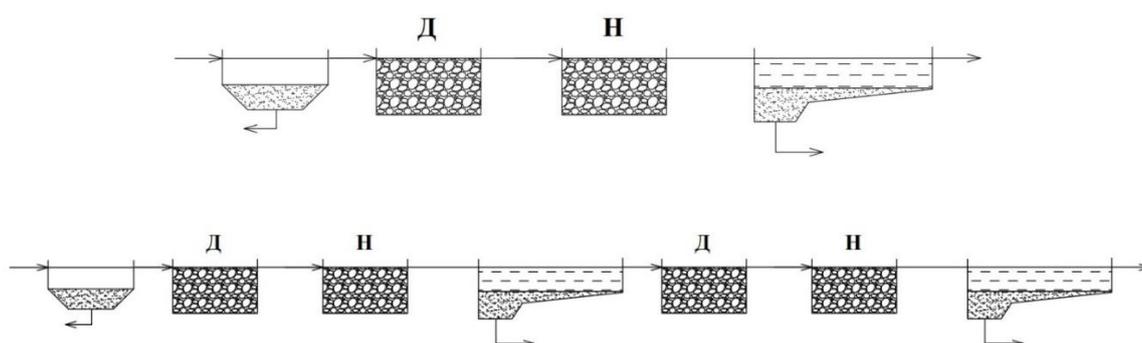


Рисунок 1.33 - Двухступенчатые системы с биофильтрами, используемыми для нитрификации-денитрификации

В настоящее время основная очистка проводится, как правило, в аэротенках со взвешенным илом, а доочистка – на биофильтрах [44, 92, 89]. В этих случаях применяют как капельные, так и затопленные биофильтры. Для затопленных биофильтров зачастую предусматривают третичный отстойник (рис. 1.34).



Рисунок 1.34 - Принципиальная схема очистки сточных вод с биофильтром в качестве сооружения доочистки

С учетом строгих требований к очищенной воде в качестве основного могут быть применены другие типы биофильтров, например, затопленные, которые зачастую являются комбинацией методов очистки со взвешенным и прикрепленным илом. В таких технологических решениях выделяют два типа сооружений – нитрификаторы и денитрификаторы, как и в классической схеме биологической очистки со взвешенным илом.

К настоящему времени разработаны технологические схемы нитрификации и денитрификации, реализуемые на различных биореакторах [15, 16, 23, 24, 35, 76, 86, 87]. Практика показывает, что процессы денитрификации-нитрификации осуществляются в различных реакторах с задействованием как прикрепленной, так и взвешенной формы активного ила [35, 87, 17, 20].

Также биофильтр часто используется в качестве первой либо второй ступени биологической очистки. Используется двухстадийная технологическая схема с использованием биофильтра и реактора с активным илом [76, 104, 109].

В 2016 году группой ученых в Южной Африке было проведено исследование работы биофильтра для очистки сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами [102]. Лабораторная установка включала в себя три основные ступени очистки: первичный отстойник, затопленный биофильтр, вторичный отстойник. Движение сточных вод осуществлялось снизу вверх (рис. 1.35).

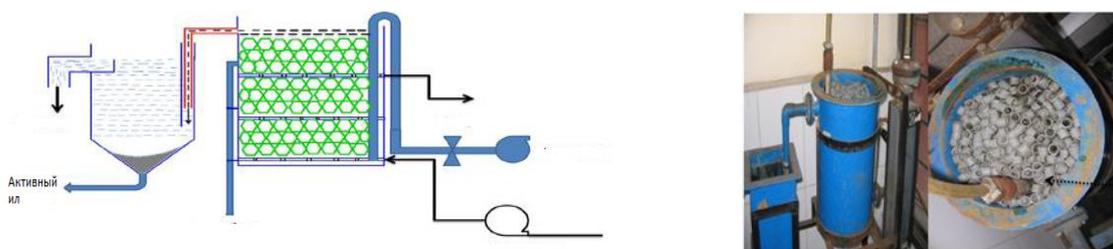


Рисунок 1.35 - Схематичная детализация конструкции реактора и вторичного отстойника, изображения лабораторной установки

В качестве исходного субстрата применялись неочищенные сточные воды с действующих очистных сооружений. Растворы металлов (кадмий, цинк, никель, медь) готовились отдельно, а затем подмешивались в исходный сток. В ходе работы было достигнуто снижение концентраций тяжелых металлов до 71 %, при концентрации тяжелых металлов более 20 мг/л эффективность их удаления снижалась, а эффективность удаления органических загрязнений осталась на высоком уровне (82–90 %).

Исследование подтверждает высокую устойчивость биопленки к токсинам. Для подобных сточных вод (например, загрязненных тяжелыми металлами) целесообразно применение предварительной очистки на биофильтрах и последующей очистки на сооружениях с активным илом (рис. 1.36).

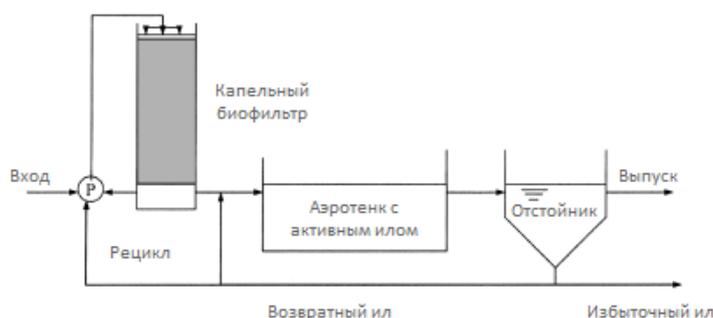


Рисунок 1.36 - Принципиальная схема очистки с применением биофильтра на первой ступени очистки

Н. А. Макиша в своей работе предложил технологическую схему двухступенчатой очистки сточных вод, состоящую из реактора с плавающим загрузочным материалом, капельного биофильтра и вторичного отстойника. Рассматривались схемы с биофильтром как на первой, так и на второй ступени. Наибольшую эффективность показала технологическая схема с биофильтром на первой ступени [36, 35].

Дабровски и Каролинчак предлагают схему очистки воды, образующейся на пивоваренном производстве. Лабораторная модель состоит

из капельного биофильтра на первой ступени и вертикального реактора на второй [108].

В НИУ МГСУ проводились исследования очистки сточной воды на биофильтрах [23], исследовалась схема с пре-денитрификацией, где на первой ступени создавались анаэробные условия, а на второй аэробные.

Анализ существующих технологических схем показал возможность использовать биофильтры как денитрификаторы, так и нитрификаторы, создавая условия как в других ректорах биологической очистки, традиционно используемых для глубокого удаления соединений азота и органических загрязнений.

Выводы по главе 1

1. Биофильтры в современных технологических схемах очистки сточных вод используются как сооружения доочистки либо как одна из ступеней очистки.
2. Конструктивные решения существующих биофильтров позволяют эксплуатировать их с момента постройки (60–70-е гг. XX в.) по настоящее время в проектом режиме. Разработка технологических схем денитрификации-нитрификации с использованием биофильтров позволит обеспечить качество очищенной воды для сброса ее в водные объекты рыбохозяйственного значения.
3. Полимерный загрузочный материал характеризуется большой удельной поверхностью, малым весом и высокой пористостью.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА НА БИОФИЛЬТРАХ

Задачи исследований

Основными задачами исследований являются:

1. Выбор модификации загрузочного материала для использования в биофильтрах, работающих в режиме денитрификации-нитрификации.
2. Разработка технологических схем глубокой очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах.
3. Определение оптимальных условий для разработанных технологических схем.

2.1 Методика проведения исследований

Эксперимент включал в себя два этапа – работу модели в лабораторных условиях на искусственно составленной сточной жидкости и работу полупроизводственной установки, установленной на городских сооружениях канализации. Продолжительность эксперимента составила 24 месяца.

До проведения основного исследования была произведена оценка загрузочных материалов. Для этого загрузка помещалась в модель биофильтра цилиндрической формы высотой 2 м с высотой загрузочного слоя 1,9 м. Также использовалась модель вторичного отстойника. Пилотные модели были выполнены из оргстекла. Подача сточной воды производилась из отдельной емкости.

Все загрузочные материалы тестировались в стандартном режиме и с рециркуляцией нитратной воды (возвратной воды с содержанием нитратов). Каждый подэтап исследования проводился в течение 60–70 дней при расходе поступающей сточной воды 50 л/сут. Отбор проб производился 3 раза в неделю. Лабораторная модель работала без удаления биомассы из вторичного

отстойника. В процессе эксперимента устанавливалась различная гидравлическая нагрузка. Отбор проб воды осуществлялся в соответствии с правилами [19].

Первый этап исследований проводился в лабораторных условиях. Зоны биофильтрации были загружены полимерными материалами. Лабораторные установки работали параллельно.

Исследования выполнялись на смоделированной сточной воде, состав которой имитировал реальную сточную воду. Основой модельной жидкости был сухой пептон, раствор которого добавлялся в водопроводную воду, находящуюся в баке. Также дополнительно для формирования модельной сточной жидкости использовались растворы ацетатов, хлористого аммония и фосфатов.

Характеристики искусственной сточной воды указаны в табл. 2.1. Расход задавался с помощью насоса-дозатора.

Таблица 2.1 - Химический состав искусственной сточной воды

Концентрация, мг/л	Показатели				
	БПК ₅	Взвешенные вещества	N-NH ₄	N _{tot}	P-PO ₄
Максимальная	165,0	150,0	77,4	130,0	8,2
Минимальная	53,2	37,9	8,0	25,7	1,1
Средняя	97,3	75,7	24,2	57,0	3,2

После завершения лабораторных исследований работы пилотной модели на искусственно составленной жидкости для верификации полученных результатов и оптимизации предложенной технологической схемы были проведены испытания полупроизводственной установки в реальных условиях.

Испытания проводились на канализационных очистных сооружениях в Московской области (очистные сооружения г. Мытищи). Характеристики сточной воды приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 -Химический состав сточной воды (очистные сооружения г. Мытищи)

Концентрация, мг/л	Показатели				
	БПК ₅	Взвешенные вещества	N-NH ₄	N _{tot}	P-PO ₄
Максимальная	130	195,1	41,65	85,5	7,0
Минимальная	39	37,6	12,11	25,0	1,3
Средняя	81,3	91,22	26,39	53,5	3,1

Химические анализы проводились по следующим методикам: БПК_п (ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97, МИ 222.0265/1.00258/2014) [63, 41], ХПК (ПНД Ф 14.1:2:4.190-03, МВИ № 22-09) [64, 38], фосфат-ионы (МВИ № 25-10) [39], нитрат-ионы (ПНД Ф 14.1:2:4.4-95, МВИ № 101-08) [66, 37], нитрит-ионы (НДП 10.1:2:3.91-06, МВИ № 101-08) [43, 37], аммоний-ионы (ПНД Ф 14.1.1-95, МВИ № 101-08) [61, 37], взвешенные вещества (ПНД Ф 14.1:2:4.254-09) [65], водородный показатель (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97) [62], общий азот (МВИ № 65-10) [40].

Биологическая пленка оценивалась по следующим методикам: доза ила (ФР 1.31.2008.04398, 1.31.2008.04397) [84, 83], зольность (ФР 1.31.2008.04399) [85], иловый индекс (ФР 1.31.2008.04398) [84].

Исследования биопленки при помощи светового микроскопа осуществлялись по методу «раздавленной капли», общепринятому в микробиологических исследованиях. Для сканирующей электронной микроскопии использовали сканирующий (растровый) электронный микроскоп Quanta 250 FEI, который позволяет получать изображения

различных объектов с увеличением, превышающим 100 000 крат. В работе с электронным микроскопом использовался Large Field Detector (LFD).

На протяжении всего лабораторного эксперимента постоянная внешняя температура составляла $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура искусственно составленной сточной жидкости составляла $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.2 Выбор оптимальных загрузочных материалов

Большая часть биофильтров построена в 1960–1970-е гг., традиционной загрузкой тогда являлся природный материал, имеющий большой вес, малую пористость и небольшую удельную поверхность. В последнее десятилетие возросло производство новых полимерных загрузочных материалов в связи с расширением сферы применения загрузки – использованием в качестве инертного носителя в сооружениях с активным илом [96, 95, 98].

На основе выводов, сделанных в 1-й главе, для исследования выбраны пластмассовые изделия. Важными факторами для выбора загрузочных материалов для проведения исследований являются их широкое применение и масштабное производство.

Необходимо, чтобы загрузочный материал удовлетворял ряду требований: долговечность, большая удельная площадь контакта, небольшой вес, высокий показатель пористости [23].

Внешний вид исследуемых загрузочных материалов представлен ниже (рис. 2.1–2.5).



Рисунок 2.1 - № 1 «Трубчатая ребристая»



Рисунок 2.2 - № 2 «Ячеистый полимер»



Рисунок 2.3 - № 3 «Пространственная сетка»



Рисунок 2.4 - № 4 «Трубчатая с полимерной нитью»



Рисунок 2.5 - № 5 «Биошары»

В табл. 2.3 представлены характеристики загрузочных материалов. Теоретическая удельная поверхность и пористость приняты по сведениям производителей [7,45,46].

Предварительно образцы помещались в дистиллированную воду на сутки, далее проводился анализ воды по ХПК. Было отмечено, что материал № 3 изначально показывал высокие концентрации по ХПК (30 мг/л), однако после длительной промывки материала водопроводной водой значения ХПК нормализовались.

Таблица 2.3 - Характеристики загрузочного материала

Загрузочный материал	ХПК, мг/л	Описание загрузочного материала	Габариты элемента	Расположение в реакторе	Пористость, %	Удельная поверхность
№ 1 «Трубчатая ребристая загрузка»	1,5	Гофрированный элемент с углублениями по всей внешней поверхности через каждые 5 мм. Материал ПВХ	Высота элемента 30 мм. Внешний диаметр 15 мм, внутренний диаметр 13 мм	Стохастическое	75–80	180 м ² /м ³
№ 2 «Ячеистый полимер»	2,4	Элемент в форме параллелепипеда с волокнистой структурой	50 x 30 x 10 мм	Стохастическое	85–90	2500 м ² /м ²⁽¹⁾
№ 3 «Пространственная сетка»	3,3	Цилиндры с ромбовидной полой структурой стенок	Высота 150 мм. Внешний диаметр 60 мм, внутренний диаметр 55–57 мм	Структурированно е – шахматный порядок	83–90	150 м ² /м ³
№ 4 «Трубчатая с полимерной нитью»	3,1	Цилиндры с полимерной нитью	Внешний диаметр 17 мм, внутренний диаметр 13 мм	Стохастическое	83–93	200 м ² /м ³
№ 5 «Биошары»	3,3	Шары, выполненные из полипропилена, со сложной внутренней поверхностью	Внешний диаметр 12 мм	Стохастическое	70–80	300 м ² /м ³

¹ Удельная поверхность на единицу объема зависит от компоновки загрузки в реакторе.

В биофилтре удаление загрязнений происходит при контакте сточной воды с биологической пленкой, прикрепленной к поверхности загрузочного материала [14, 94]. Био пленка состоит из бактерий, среди которых развиваются нитчатые бактерии, нити грибов, бесцветные жгутиковые, инфузории, коловратки, черви [101, 103, 32, 74], водоросли и насекомые в верхнем слое [32]. Большое значение для нарастания био пленки имеют характеристики загрузки (пористость, величина удельной поверхности загрузки). Сама биологическая среда реактора (конкуренция видов микроорганизмов и др.) влияет на ограничение числа видов, населяющих био пленку [73].

Решающим фактором при выборе загрузочного материала является возможность иммобилизовать на себе био пленку, поэтому прежде всего исследована такая способность. Исследование включало в себя: наблюдение за образованием биомассы на загрузочном материале, анализ биологической пленки при помощи светового и электронного микроскопа, исследование работы классического капельного реактора, в том числе регулярное проведение анализов по основным химическим показателям. Результаты наблюдения за нарастанием биомассы и видовым составом в соответствии с режимами работы (с рециркуляцией нитратной воды и без) представлены в табл. 2.4. и 2.5. Для проведения эксперимента было произведено наращивание био пленки с использованием инокулирования активным илом [96, 111]. Иловый индекс определялся путем смыва биомассы напором водопроводной воды с поверхности загрузочного материала и дальнейшего отстаивания полученной иловой смеси в цилиндре.

Эффективность удаления загрязнений представлена в табл. 2.6, где 1 – стандартный режим, а 2 – с рециркуляцией нитратной воды в объеме 100 %. На рис. 2.6–2.9 представлены элементы загрузочного материала с иммобилизированной на нем биомассой для разных режимов работы био фильтра.

Таблица 2.4 - Характеристики биопленки (стандартный режим работы биофильтра)

Загрузка	Внешний вид биопленки	Видовой состав	Толщина, мм	Доза биомассы, г/л	Иловый индекс, см ³ /г
№ 1	Прозрачная со слабовыраженной светло-коричневой окраской. Биопленка нарастает только в средней части биофильтра	<i>Chilodonella uncinata</i> – одна, малоподвижна	До 5	-	-
№ 2	Желтый оттенок, густая волокнистая структура биомассы	<i>Philodina roseola</i> , <i>Paramecium caulatum</i> в достаточном количестве	До 5	1,02	125
№ 3	Биомасса с неплотной волокнистой структурой легко открепляется от загрузки, занимает значительную часть пространства между ячейками. Желтый оттенок	Nematoda, различные коловратки в достаточном количестве	До 10	1,82	150
№ 4	Прозрачная с коричневой окраской	Nematoda, <i>Gallidina vorax</i> , <i>Stylonichia pustulata</i> в достаточном количестве	До 4	0,91	79
№ 5	Не обнаружено	-	-	-	-

Таблица 2.5 - Характеристики биопленки (режим работы биофильтра с рециркуляцией воды)

Загрузка	Внешний вид биопленки	Видовой состав	Толщина, мм	Доза биомассы, г/л	Иловый индекс, см ³ /г
№ 1	Прозрачная со светло-коричневой окраской	<i>Chilodonella uncinata</i> , <i>Gallidina vorax</i>	До 4	0,72	78
№ 2	Темно-коричневая, имеет плотную структуру, располагается в межъячейном пространстве	Бесцветные жгутиковые. В середине реактора наблюдаются <i>chilodonella uncinata</i> и <i>philodina roseola</i>	До 2	0,23	65
№ 3	Темно-коричневая, имеет плотную структуру, прикреплена к внутренней и внешней поверхности загрузки	<i>Peranema trichophorum</i> , <i>philodina roseola</i>	До 1	0,61	38
№ 4	Темно-коричневая, имеет плотную структуру, прикреплена к внутренней и внешней поверхности загрузки	<i>Nematoda</i> , <i>gallidina vorax</i> , <i>stylonichia pustulata</i> , <i>philodina roseola</i>	До 2	0,52	44
№ 5	Не обнаружено	-	-	-	-

Таблица 2.6 - Эффективность удаления загрязнений

Загрузка	БПК ₅		NH ₄ ⁺		PO ₄ ³⁻		Взвешенные вещества	
	%							
	1	2	1	2	1	2	1	2
1	20,9	29,8	29,1	25,0	1,6	3,9	24,4	31,0
2	87,4	90,0	69,1	60,8	0	2,2	25,6	34,5
3	86,5	87,0	20,7	43,3	2,9	19	26,0	33,0
4	89,6	87,5	11,3	70,4	1,9	4,8	27,2	35,1

Анализируя результаты гидробиологических и гидрохимических анализов, а также визуального обследования, можно сделать выводы о формировании различного вида биопленки в исследуемых режимах. Все типы биопленки можно классифицировать как плотные и волокнистые: *плотная пленка* – это иммобилизованная биомасса, которая образует гладкую поверхность; *волокнистые пленки* в основном образуют нитчатые бактерии [87].



Рисунок 2.6 - Стандартный режим: несколько элементов загрузочного материала «Пространственная сетка», середина реактора



Рисунок 2.7 - С рециркуляцией нитратной воды: несколько элементов загрузочного материала «Пространственная сетка», середина реактора



Рисунок 2.8 - Стандартный режим: элемент загрузочного материала, извлеченный из середины реактора



Рисунок 2.9 - С рециркуляцией нитратной воды: элемент загрузочного материала, извлеченный из середины реактора

В стандартном режиме образуется волокнистая пленка, а с рециркуляцией – плотная пленка (рис. 2.6–2.9). В режиме с рециркуляцией не наблюдается схождения биопленки, это связано с образованием тонкого слоя биомассы в труднодоступном пространстве в теле загрузочного материала, прирост которой саморегулируется за счет пищевых связей микроорганизмов.

Отмечается, что наличие рециркуляции формирует качественные показатели биопленки (табл. 2.4, 2.5). Исследования показали, что тонкий слой биопленки эффективней толстого [73, 74, 87]. Сама биологическая среда биофильтров (конкуренция видов микроорганизмов) влияет на ограничение числа видов, населяющих биопленку. Наличие рециркуляции приводит к образованию такого видового состава биологической пленки, который способствует формированию эффективного тонкого слоя биомассы. Отмечается, что глубина очистки сточной воды зависит от структуры биопленки.

В целом видовой состав и показатели биопленки доказывают (табл. 2.5), что лабораторная модель работает хорошо, это подтверждается результатами анализов (табл. 2.6).

При использовании рециркуляции наблюдалось более полное обрастание загрузочного материала, увеличивалась эффективность удаления загрязнений (табл. 2.6). При этом наблюдалось улучшение результатов (табл.

2.5) гидрохимического анализа биомассы для режима работы биофильтра в режиме с рециркуляцией.

Загрузочные материалы № 1 и 5 слабо фиксировали на себе биомассу. Наиболее полное (около 80 % объема) обрастание поверхности загрузки наблюдалось при использовании загрузочного материала № 3. Обрастание загрузочных материалов № 2 и 4 проходило в основном по траектории движения воды, наблюдались участки без биопленки (около 35 % объема).

Отмечается низкая доза биомассы, при которой происходит эффективная очистка, такой же эффект наблюдался в работах Макиши [35] и Словцова [76].

На основании исследований загрузочных материалов (табл. 2.4–2.6) были отобраны образцы № 2 – ячеистый полимер, № 3 – пространственная сетка, № 4 – трубчатая с полимерной нитью.

2.3 Проведение лабораторных исследований по определению времени контакта воды с поверхностью загрузочного материала в биофильтре

Интенсивность процессов, происходящих в биологическом фильтре, зависит от ряда контролируемых параметров, в том числе и от длины пути очищаемой жидкости. Были проведены исследования фильтрующей скорости на различных загрузочных материалах для использования в дальнейших расчетах размера реактора.

Также определены зависимости времени пребывания воды в реакторе от гидравлической нагрузки, которые предполагается применять для моделирования необходимых размеров сооружения.

Исследования по определению времени контакта проводились на лабораторных моделях, работающих в проточном режиме. Для упрощения методики опыт проводился на водопроводной воде. Расходы поступающей воды варьировались.

В пилотную установку залповым сбросом поступал раствор концентрированного красителя (в объеме 25 мл), для определения изменения концентрации трассера в выходящей воде использовался фотоэлектрокалориметр UNICO 2100. Для проведения экспериментов использовался краситель красный E124 массой 1,5 г, разведенный в 200 мл дистиллированной воды. Эксперимент проводился при расходе воды от 50 до 200 л/сут.

Для определения времени контакта по графику зависимости концентрации от времени отбора вычислялись площадь криволинейной трапеции, ее статический момент, а также центр тяжести. Опыт был проведен для всех исследуемых загрузочных материалов.

Эксперимент проводился с тремя видами загрузочного материала, которые были отобраны на основании результатов исследований первого этапа: № 2 «Ячеистый полимер», № 3 «Пространственная сетка», № 4 «Трубчатая с полимерной нитью».

Опыт был проведен многократно для каждого заданного режима работы со всеми загрузочными материалами. Время контакта определялось по формуле:

$$t = \frac{\sum S_x \cdot Y}{\sum S}, \quad (2.1)$$

где:

$\sum S$ – площадь;

$\sum S_x$ – статический момент.

Время пребывания:

$$t = \frac{\varepsilon \cdot H}{q\zeta}, \quad (2.2)$$

где:

H – высота загрузки, м;

q – гидравлическая нагрузка, м³/(м³·сут);

ε и ζ – константы, определенные эмпирически.

Результаты исследований с загрузкой № 2 «Ячеистый полимер» представлены на рис. 2.10–2.12.

На основании построенных кривых определяем зависимость времени контакта от нагрузки по воде. Получаем зависимость для двух случаев – максимум и среднее значение времени пребывания. Следует отметить, что построенная линия тренда практически совпадает с полученными кривыми.

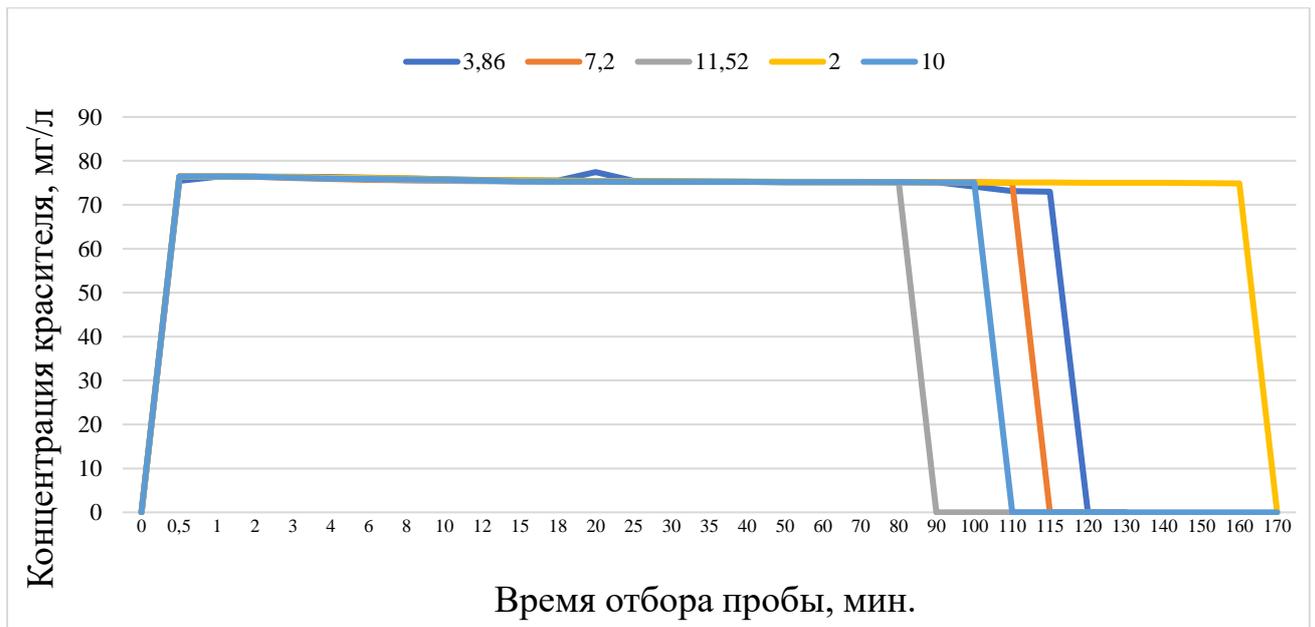


Рисунок 2.10 - Концентрация трассера при различной гидравлической нагрузке для модели, загруженной материалом «Ячеистый полимер»

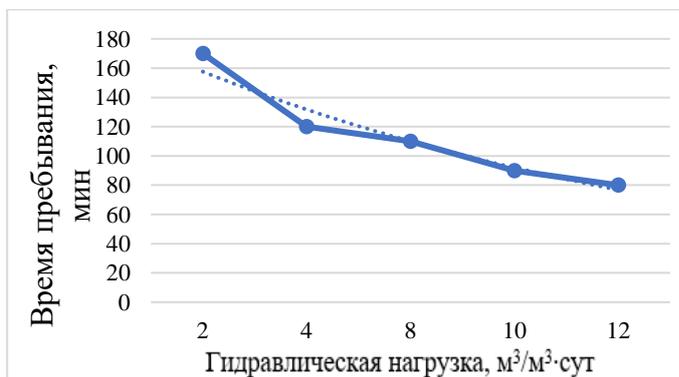


Рисунок 2.11 - Максимальное время пребывания окрашенной воды

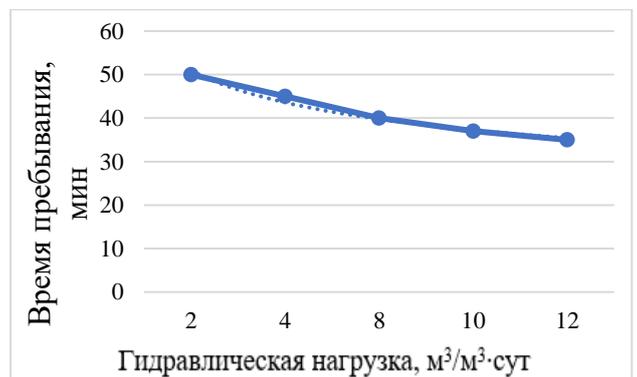


Рисунок 2.12 - Среднее время пребывания окрашенной воды

После обработки результатов экспериментов в логарифмических координатах формула (2.2) приобретает вид:

$$t_{max} = 188,61 \cdot 1,9 \cdot q^{-0,18}; \quad (2.3)$$

$$t_{cp} = 50,97 \cdot 1,9 \cdot q^{-0,226}. \quad (2.4)$$

Результаты определения времени контакта с загрузочным материалом № 3 «Пространственная сетка» представлены на рис. 2.13–2.15.

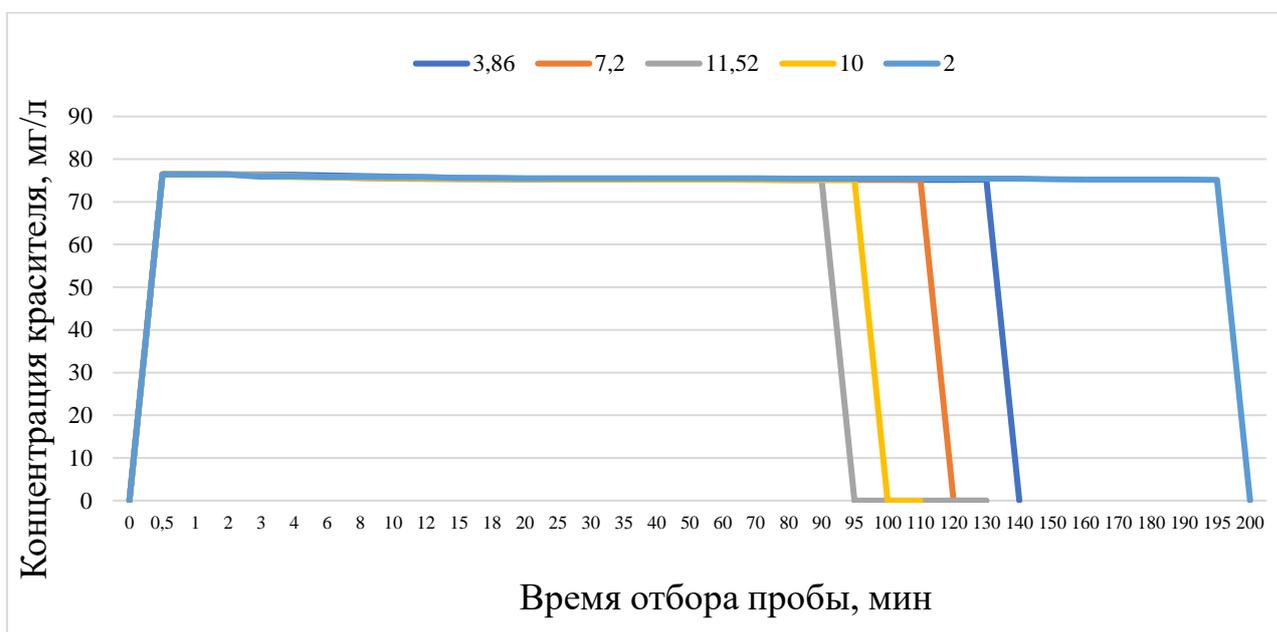


Рисунок 2.13 - Концентрация трассера при различной гидравлической нагрузке для модели, загруженной материалом № 3 «Пространственная сетка»

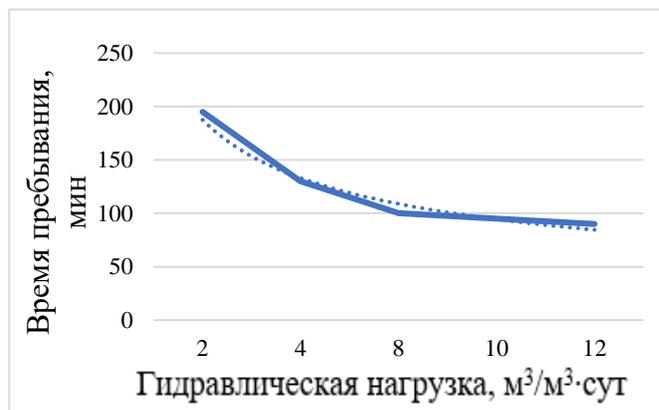


Рисунок 2.14- Максимальное время пребывания окрашенной воды

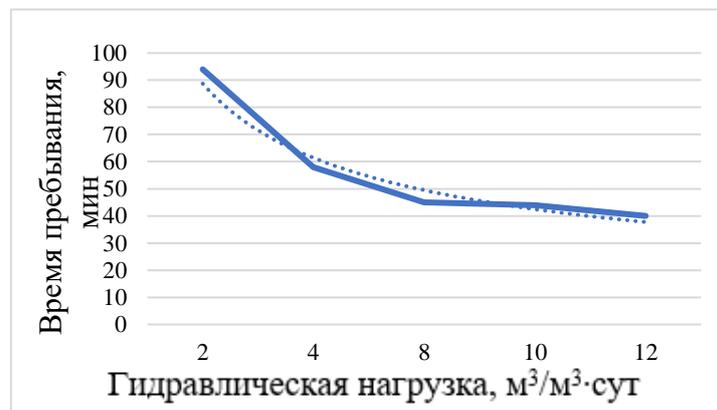


Рисунок 2.15 - Среднее время пребывания окрашенной воды

$$t_{max} = 187,4 \cdot 1,9 \cdot q^{-0,49}; \quad (2.5)$$

$$t_{cp} = 89 \cdot 1,9 \cdot q^{-0,5}. \quad (2.6)$$

Результаты определения времени контакта с загрузочным материалом №4 «Трубчатая загрузка с полимерной нитью» представлены на рис. 2.16–2.18.

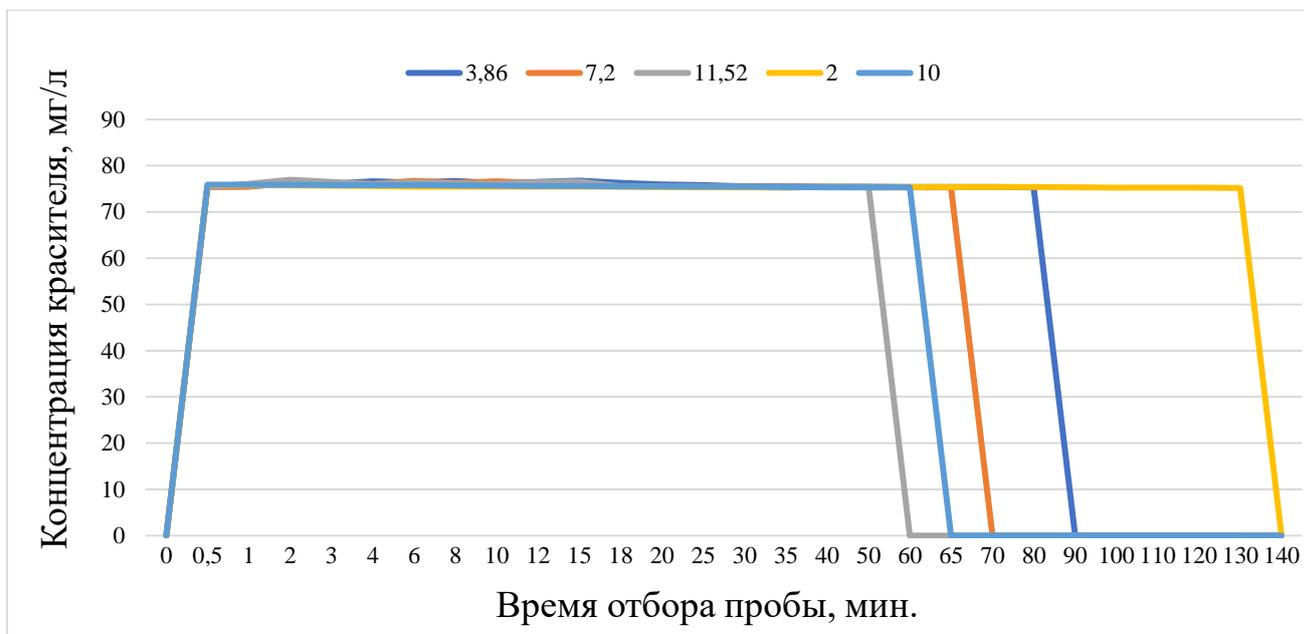


Рисунок 2.16 - Концентрация трассера при различной гидравлической нагрузке для модели, загруженной материалом № 4 «Трубчатая загрузка с полимерной нитью»

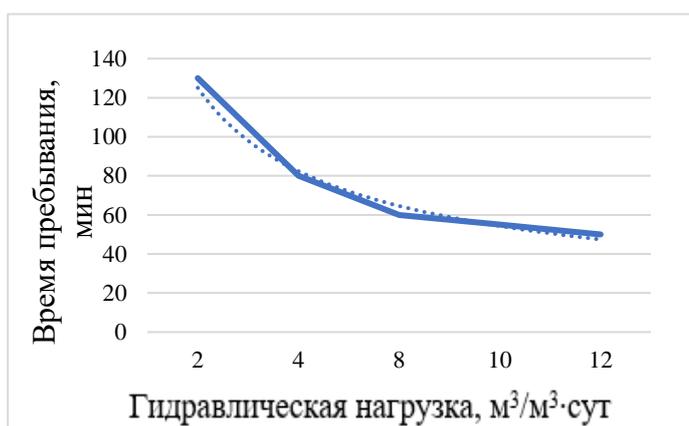


Рисунок 2.17 - Максимальное время пребывания окрашенной воды

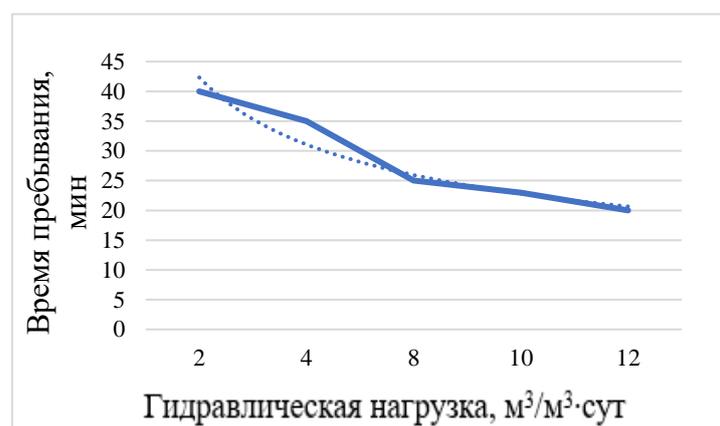


Рисунок 2.18 - Среднее время пребывания окрашенной воды

$$t_{max} = 125,1 \cdot 1,9 \cdot q^{-0,602}; \quad (2.7)$$

$$t_{cp} = 42,34 \cdot 1,9 \cdot q^{-0,446}. \quad (2.8)$$

2.4 Результаты лабораторных исследований на модельной жидкости

Лабораторные исследования включали в себя два крупных этапа – исследования модели с двумя (первый этап эксперимента) и четырьмя (второй этап эксперимента) зонами биофильтрации.

2.4.1 Первый этап эксперимента

В первый этап эксперимента входило два подэтапа. На первом подэтапе исследовалась модель с двумя зонами биофильтрации, работающая в режиме без рециркуляции нитратной воды (рис. 2.19), на втором – с рециркуляцией (рис. 2.20).

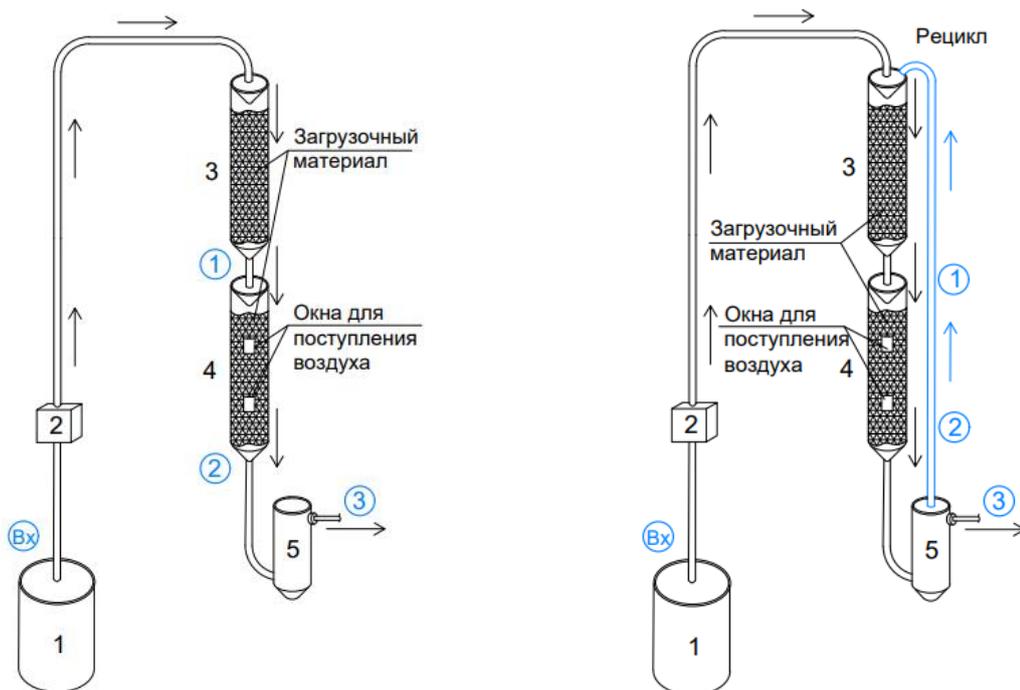


Схема денитрификации-нитрификации

Рисунок 2.19 - Лабораторная установка.

Рисунок 2.20 - Лабораторная установка.

Стандартный режим

Режим с рециркуляцией нитратной воды

1 – бак подаваемой воды; 2 – насос-дозатор, 3 – анаэробная (аноксидная) зона, 4 – аэробная зона, 5 – вторичный отстойник.

Точки отбора проб: Вх – на входе; из бака; 1 – после анаэробной (аноксидной) зоны; 2 – после аэробной зоны; 3 – на выходе из вторичного отстойника

Лабораторная модель включает в себя две колонны, представляющие собой биофильтры, и одну колонну, моделирующую вторичный отстойник. Подача сточной воды в первую колонну производилась из емкости объемом 60 л при помощи насоса-дозатора через резиновые трубки диаметром 10 мм. Для равномерного распределения подаваемой воды использовались воронка и плоская чаша для дробления капель. Высота каждой колонны – 1 м, высота слоя загрузки – 0,9 м, объем – 7 л, материал – органическое стекло.

Первым расположен биофильтр, изолированный от поступления воздуха, далее реактор, в котором были выполнены окна для поступления воздуха.

Вторичный отстойник также был выполнен из оргстекла объемом 1 литр. Рециркуляция (где она предусматривалась) осуществлялась из верхней части вторичного отстойника. В схеме с рециркуляцией нитратной воды в третьей зоне за счет подачи нитратной воды обеспечивались аноксидные условия.

Вода поступала изначально в анаэробную (аноксидную) зону биофильтрации, далее во второй биофильтр (аэробная зона).

Сточная вода, прошедшая биофильтрацию, поступала во вторичный отстойник. Во втором режиме работы часть нитратной воды из вторичного отстойника с помощью эрлифта возвращалась в первый биофильтр. Эрлифт работал в режиме рециркуляции 100 %. Этап 1 эксперимента продолжался 6 месяцев.

Подэтап 1.1

Для ускорения нарастания биомассы в пилотную установку был инокулирован активный ил, взятый с действующих очистных сооружений. Результаты этапа были описаны ранее [122, 34].

В пилотной установке № 1.1-1 реактор был оснащен загрузкой «Пространственная сетка» в обеих зонах. На 15-е сутки с начала эксперимента на загрузочном материале иммобилизовалась биологическая пленка. В табл.

2.7 представлены усредненные показатели работы установки, в табл. 2.8 – технологические показатели. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.21–2.25).

Таблица 2.7- Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 1.1-1

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	25,08	57,24	-	-	3,13	103,78	70,99
1	39,35	58,16	0,154	4,83	2,83	105,32	38,51
2	40,64	56,21	0,440	7,57	2,93	78,00	27,57
3	34,66	55,03	0,445	8,74	2,80	49,43	14,81

Таблица 2.8 - Технологические показатели работы пилотной установки № 1.1-1

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы		
			1	2	3
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	0*	24,84	52,37
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	0*	0*	0*
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	45,75	61,16	79,14
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	0*	25,78	54,35
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	0*	0*	0*
6	Нагрузка по БПК ₅	г/м ³ ·сут	261,53		
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/м ³ ·сут	63,20		
8	Окислительная мощность БПК ₅	г/м ³ ·сут	0,00	64,97	136,95
9	Окислительная мощность N-NH ₄	г/м ³ ·сут	0,00	0,00	0,00
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /м ³ ·сут	2,52		

* Вследствие возникновения вторичного загрязнения вода на выходе из реактора по химическим показателям была более загрязненной, чем на входе.

Процесс денитрификации-нитрификации протекает нестабильно (рис. 2.21).

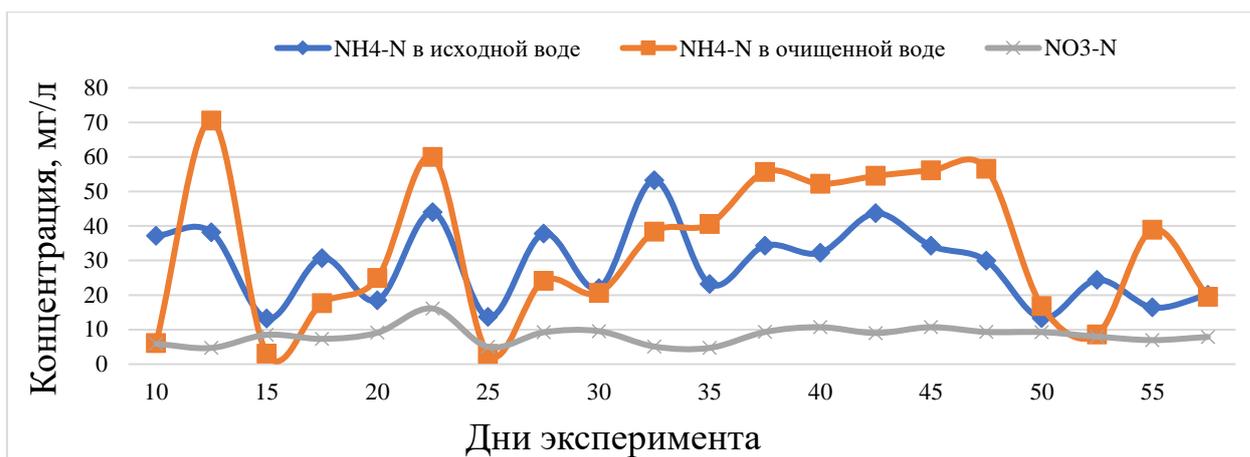


Рисунок 2.21 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 1.1-1

Зависимость окислительной мощности удаления легкоокисляемых органических загрязнений от их исходного содержания в пилотной установке № 1.1-1 показана на рис. 2.22.

Взаимосвязь между окислительной мощностью удаления азота аммонийного (рассчитанной как количество удаленного $N-NH_4$ 1 м³ биофильтра в сутки) и исходным содержанием азота аммонийного в исследуемой сточной жидкости в пилотной установке № 1.1-1 показана на рис. 2.23.

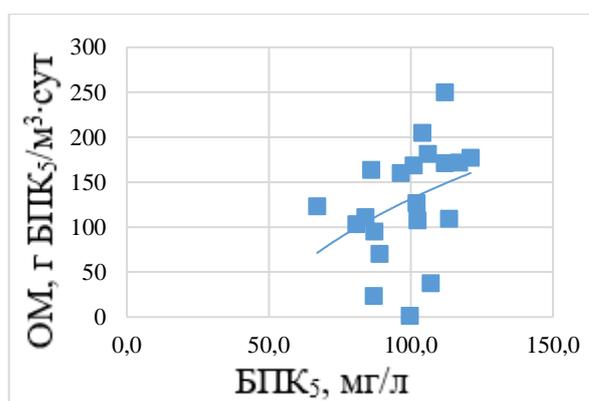


Рисунок 2.22 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания БПК₅ в пилотной установке № 1.1-1

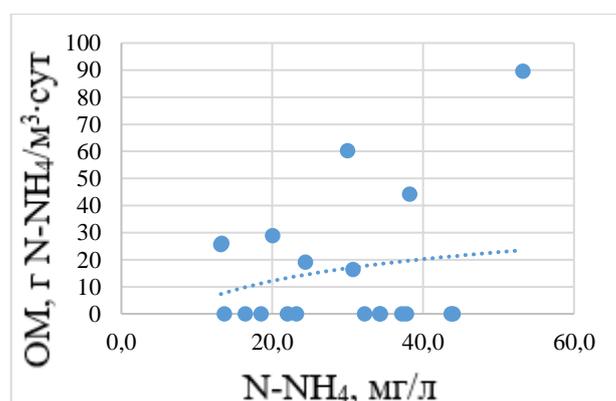


Рисунок 2.23 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания $N-NH_4$ в пилотной установке № 1.1-1

При анализе рис. 2.22 и 2.23 становится очевидным, что процесс удаления органических загрязнений протекает нестабильно, а нитрификация и

денитрификация практически отсутствуют, удаления фосфатов также практически не происходит. На рис. 2.24 и 2.25 представлена эффективность снижения БПК₅ и N-NH₄ в зависимости от нагрузки по органическим загрязнениям и азоту аммонийному соответственно.

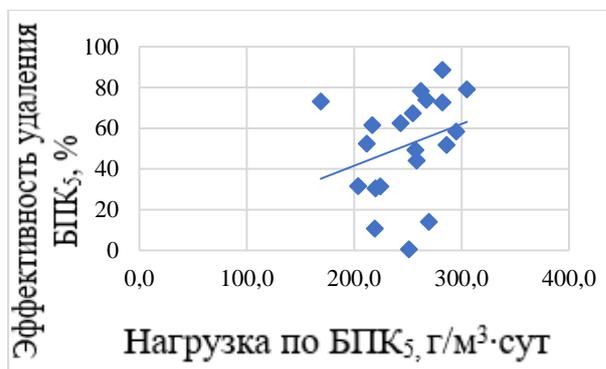


Рисунок 2.24 - Зависимость эффективности снижения БПК₅ от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке № 1.1-1

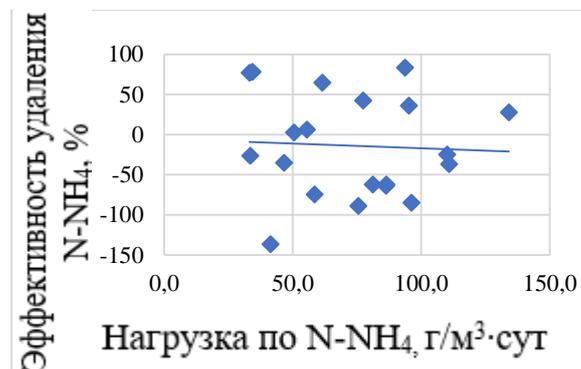


Рисунок 2.25 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH₄ в пилотной установке № 1.1-1

На рис. 2.25 видно, что в ряде случаев образуется вторичное загрязнение, графически это все точки ниже отметки 0. Вторичное загрязнение объясняется наличием скопления большого количества биомассы в межъячейном пространстве.

Подэтап 1.2

Далее исследовалась та же пилотная установка, но уже с рециркуляцией нитратной воды в объеме 100 % (рис. 2.20) – № 1.2-1.

Поскольку на загрузочном материале уже была зафиксирована биомасса, выход на рабочий режим был осуществлен в течение 10 суток – это время понадобилось для адаптации биоценоза биопленки к изменившимся условиям.

В табл. 2.9 представлены усредненные показатели работы установки № 1.2-1, в табл. 2.10 – технологические показатели. Посуточные показатели приведены на графиках (рис. 2.26–2.30).

Таблица 2.9 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 1.2-1

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	23,09	58,14	-	-	2,89	99,63	78,78
1	21,35	51,67	0,215	5,33	2,35	74,13	44,39
2	16,29	39,89	0,544	7,62	2,19	47,02	26,27
3	12,09	28,10	0,480	8,34	2,04	23,93	12,47

Таблица 2.10 - Технологические показатели работы пилотной установки № 1.2-1

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы		
			1	2	3
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	25,60	52,81	75,98
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	7,53	29,44	47,62
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	43,66	66,65	84,17
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	25,50	52,61	75,70
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	1,74	6,80	11,00
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	251,08		
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	58,19		
8	Окислительная мощность БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	64,29	132,60	190,76
9	Окислительная мощность N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	4,38	17,14	27,72
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	2,52		

Процесс нитрификации протекает более стабильно, чем в отсутствие рециркуляции, также наблюдается процесс частичной денитрификации (рис. 2.26).

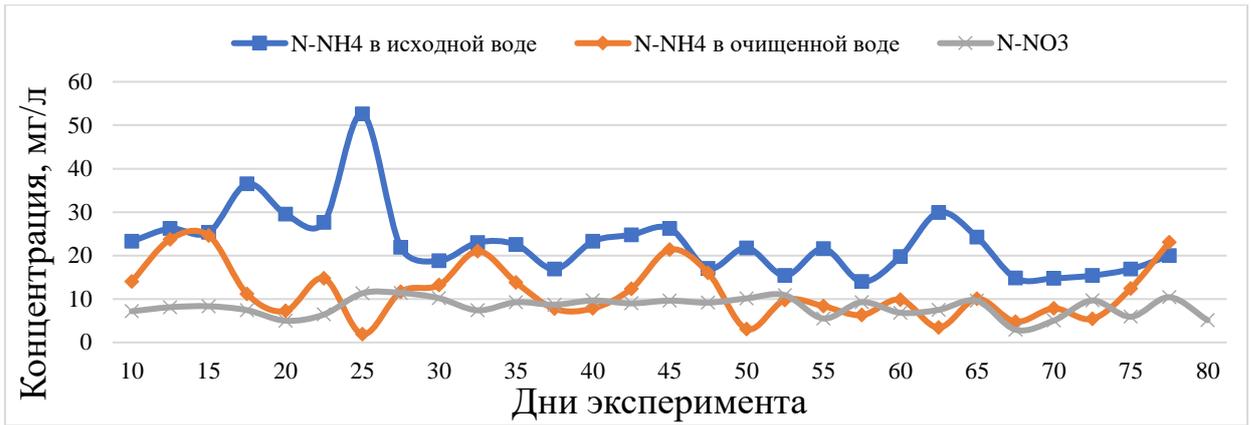


Рисунок 2.26 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 1.2-1

На рис. 2.27 представлена зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических веществ.

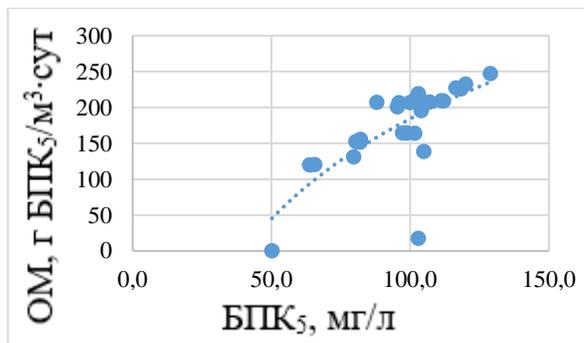


Рисунок 2.27 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 1.2-1

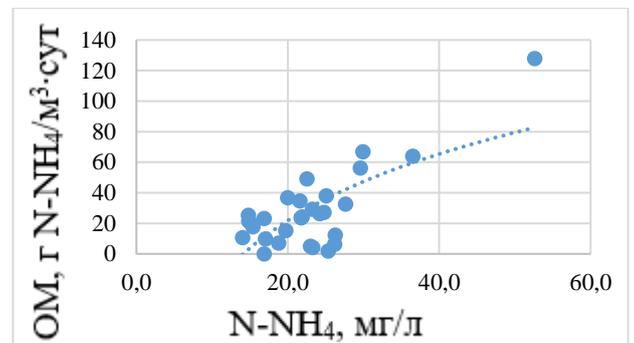


Рисунок 2.28 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного в пилотной установке № 1.2-1

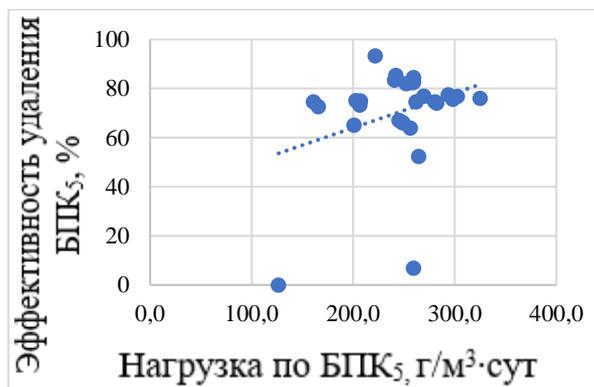


Рисунок 2.29 - Зависимость эффективности снижения BPK5 от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке № 1.2-1

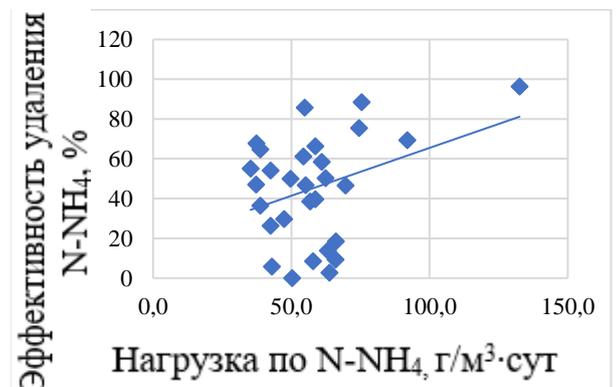


Рисунок 2.30 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH4 в пилотной установке № 1.2-1

Наблюдается более стабильная работа модели в режиме с рециркуляцией. Процесс удаления органических загрязнений протекает глубоко и стабильно (рис. 2.27 и 2.28), чего нельзя сказать о процессах денитрификации. Эффективность удаления азота невысокая, практически не удаляются фосфаты, низкая эффективность удаления промежуточных продуктов – нитритов, нитраты образуются в небольшом количестве.

Далее исследовалась пилотная установка № 1.2-2, конструктивно исполненная так же, как и № 1.2-1 (рис. 2.19), но с другими загрузочными материалами. В верхней зоне загружен материал «Ячеистый полимер», в нижней – «Пространственная сетка». Такой выбор обусловлен тем, что в верхних зонах, где осуществляется процесс денитрификации, необходимо ограничить поступление воздуха, поэтому выбран более плотно расположенный загрузочный материал.

Пилотная установка работала в режиме с рециркуляцией нитратной воды (100 %), которая осуществлялась из вторичного отстойника. Для роста биомассы была произведена инокуляция активным илом. Выход установки на рабочий режим произошел на 15-е сутки.

Средние значения химических показателей работы пилотной установки № 1.2-2 представлены в табл. 2.11. В табл. 2.12 представлены технологические показатели работы установки. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.31–2.35).

Таблица 2.11 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 1.2-2

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	26,82	63,45	-	-	3,16	107,36	86,34
1	23,59	40,02	0,569	5,23	3,02	31,51	44,31
2	16,57	31,41	0,691	7,44	2,86	18,28	23,09
3	11,33	24,03	0,613	8,77	2,75	9,77	12,40

Таблица 2.12 - Технологические показатели работы пилотной установки № 1.2-2

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы		
			1	2	3
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	70,65	82,97	90,90
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	12,04	38,22	57,76
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	48,68	73,26	85,64
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	75,85	89,08	97,59
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	3,23	10,25	15,49
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	270,55		
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	67,59		
8	Окислительная мощность БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	191,14	224,48	245,93
9	Окислительная мощность N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	8,14	25,83	39,03
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	2,52		

Процесс денитрификации-нитрификации протекает недостаточно глубоко.

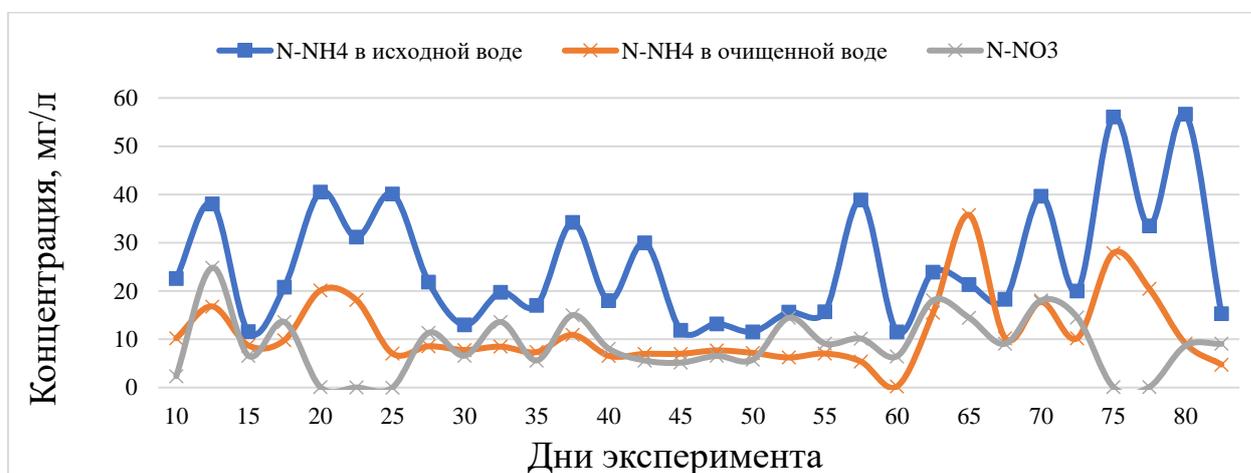


Рисунок 2.31 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 1.2-2

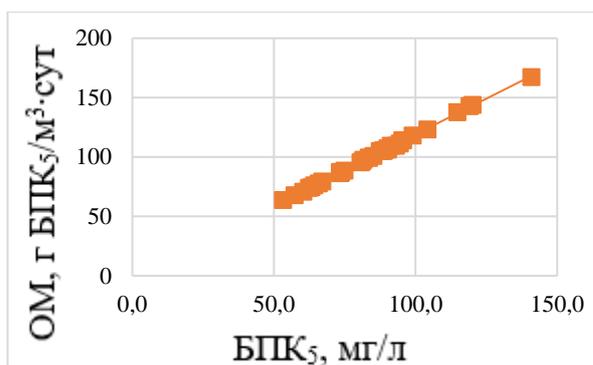


Рисунок 2.32 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 1.2-2

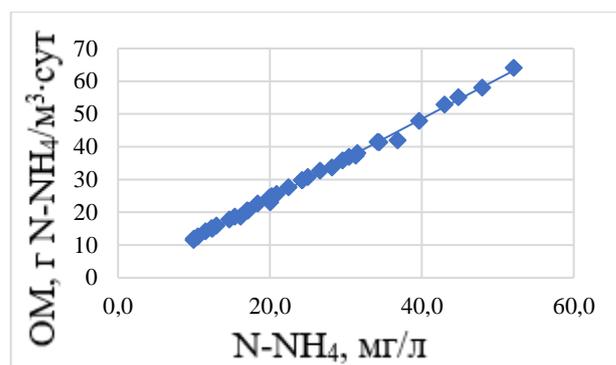


Рисунок 2.33 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного в пилотной установке № 1.2-2

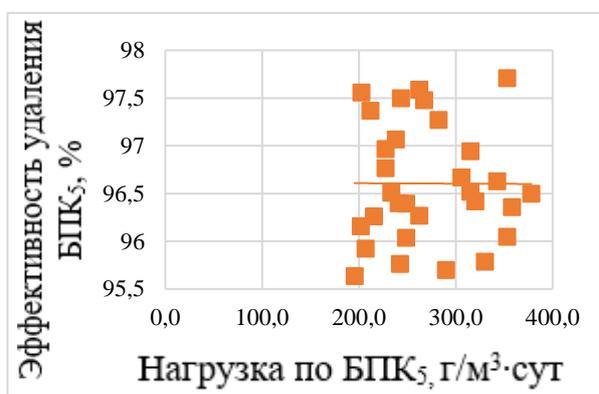


Рисунок 2.34 - Зависимость эффективности снижения БПК₅ от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке № 1.2-2

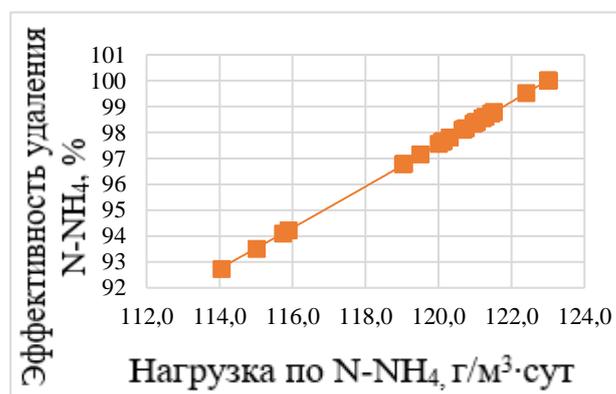


Рисунок 2.35 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH₄ в пилотной установке № 1.2-2

Сравнивая работу пилотных установок № 1.2-1 и № 1.2-2 (обе модели работали в режиме с рециркуляцией нитратной воды), можно сделать вывод, что качественно технологические показатели выше у установки № 1.2-2. Также следует отметить, что при работе пилотной установки № 1.2-2 достигнута высокая эффективность удаления БПК₅.

Проанализировав работу исследуемых технологических схем с двумя зонами биофильтрации, можно отметить, что работа пилотных установок № 1.2-1 и № 1.2-2 показывает достаточно эффективные показатели удаления

органических загрязнений. В пилотной установке № 1.1-1 образуется вторичное загрязнение за счет неравномерного скопления биомассы.

Процессы денитрификации во всех схемах не протекают достаточно глубоко: низкая эффективность удаления промежуточного продукта – нитритов, недостаточное образование нитратов. Практически не отмечается удаление фосфатов. Максимальная окислительная мощность по азоту аммонийному составляет $39,03 \text{ г}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$, очевидно наличие процесса нитрификации. На основе анализа полученных результатов рационально рассмотреть работу пилотных установок со снижением гидравлической нагрузки.

2.4.2 Второй этап эксперимента

Подэтап 2.1

Пилотная установка состояла из четырех зон, в первой и третьей зоне располагался реактор, изолированный от поступления кислорода. Во второй и четвертой зоне устраивался биофильтр с окнами для поступления кислорода.

Реакторы выполнены из оргстекла объемом 7 л, для равномерной подачи воды использовались воронка и плоская чаша для дробления капель. Высота колонны составляла 1 м, высота слоя загрузки – 0,9 м.

Вторичные отстойники также были выполнены из оргстекла объемом 1 л.

Для описания работы пилотной установки с четырьмя зонами биофильтрации примем первую ступень очистки – первую аэробную и анаэробную зону и первый вторичный отстойник, вторую ступень очистки – вторую аэробную и анаэробную зону и второй вторичный отстойник.

Вода поступала в первый биофильтр, далее сточная вода самотеком поступала во второй реактор (капельный биофильтр). После прохождения первой ступени очистки было организовано промежуточное отстаивание во вторичном отстойнике, после которого жидкость поступала в третий

биофльтрационный реактор, аналогичный первому, и далее в четвертый реактор, который был выполнен аналогично второму. Прошедшая биофильтрацию жидкость поступала во второй вторичный отстойник.

Всего в эксплуатации по данной схеме находилось одновременно две установки в режиме работы без рециркуляции нитратной воды, на которых в параллельном режиме исследовались образцы загрузочного материала – подэтап 2.1. После с тем же загрузочным материалом проводились исследования во втором режиме – с рециркуляцией, подэтап 2.2.

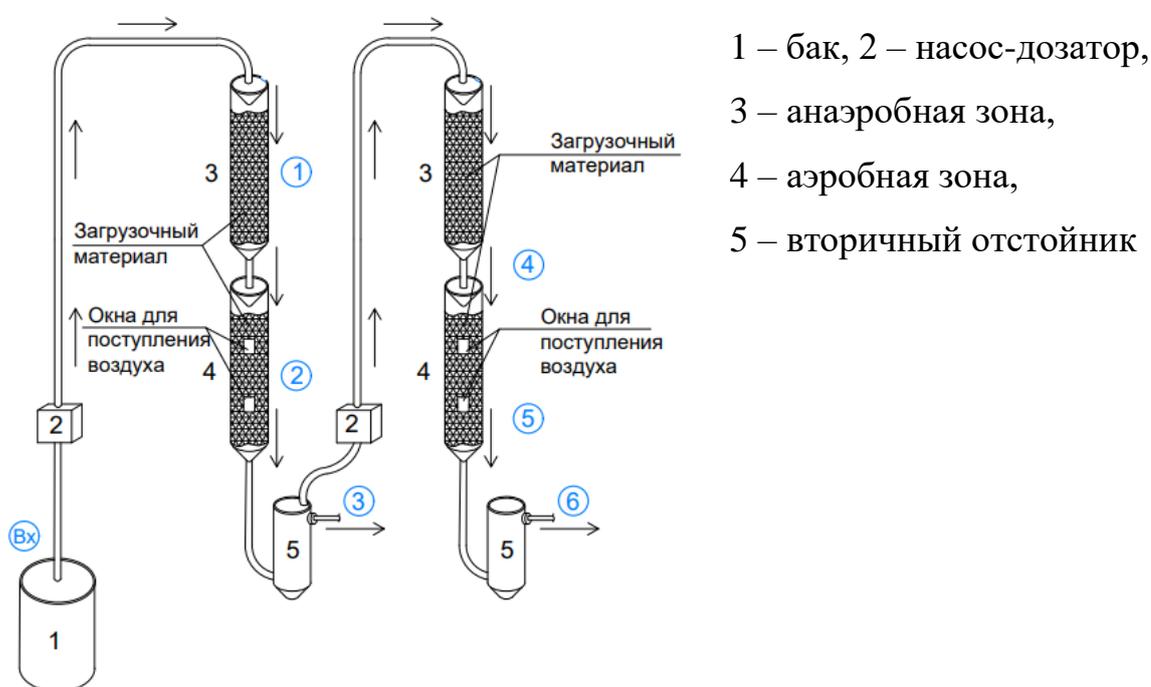
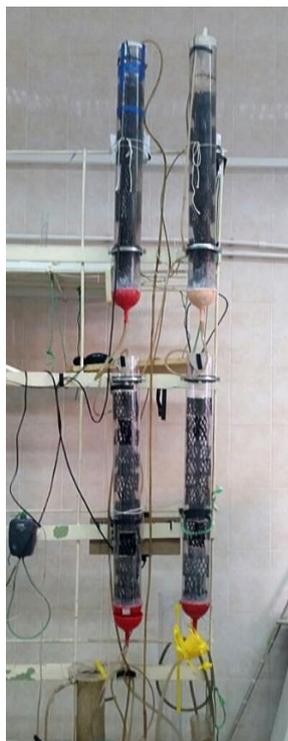


Рисунок 2.36 - Схема работы лабораторной установки без рециркуляции нитратной воды. Схема денитрификации-нитрификации с промежуточным отстаиванием.
Точки отбора проб: Вх – на входе из бака; 1 – после первой анаэробной зоны; 2 – после первой аэробной зоны; 3 – на выходе из первого вторичного отстойника; 4 – после второй анаэробной зоны; 5 – после второй аэробной зоны; 6 – на выходе из второго вторичного отстойника



Пилотная установка с загрузочным материалом «Пространственная сетка»



Пилотная установка с загрузочными материалами «Ячеистый полимер» и «Пространственная сетка»

Рисунок 2.37 - Лабораторная установка с четырьмя зонами биофильтрации

В установке № 2.1-1 реакторы оснащены загрузкой «Пространственная сетка» во всех зонах. К пилотной установке с двумя зонами биофильтрации был добавлен второй модуль – два аналогичных реактора и вторичный отстойник. Использовался тот же расход сточных вод, что и в модели с двумя зонами, поскольку на этапе 1 было выявлено, что такой гидравлический режим позволяет создавать «рабочий» слой биопленки. Поскольку на загрузочном материале уже была зафиксирована биомасса, выход на рабочий режим был осуществлен в течение 10 суток – это время понадобилось для адаптации биоценоза биопленки к изменившимся условиям.

Средние значения химических показателей работы пилотной установки № 2.1-1 представлены в табл. 2.13. В табл. 2.14 представлены технологические показатели работы установки. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.38–2.43).

Таблица 2.13 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 2.1-1

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	20,72	55,30	-	-	3,23	94,70	82,51
1	41,13	57,17	0,235	5,28	2,91	84,23	53,32
2	40,60	56,83	0,452	7,11	2,97	69,91	44,00
3	35,71	54,02	0,471	7,85	2,96	48,50	30,23
4	14,11	37,01	0,670	12,17	2,84	33,37	20,41
5	10,43	34,42	0,670	14,78	2,72	25,05	15,91
6	11,22	32,99	0,709	14,77	2,76	19,17	9,70

Таблица 2.14 - Технологические показатели работы пилотной установки № 2.1-1

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы					
			1	2	3	4	5	6
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	11,06	26,18	48,79	64,76	73,55	79,76
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	0*	0*	0*	31,90	49,66	45,85
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	35,38	46,67	63,36	75,26	80,72	88,24
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	10,47	24,79	46,20	61,33	69,65	75,53
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	0*	0*	0*	6,61	10,29	9,50
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	116,48					
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	25,49					
8	ОМ БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	12,88	30,49	56,83	75,44	85,67	92,90
9	ОМ N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	0,00	0,00	0,00	8,13	12,66	11,69
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	1,23					

* Вследствие возникновения вторичного загрязнения вода на выходе из реактора по химическим показателям была более загрязненной, чем на входе.

Наблюдается образование вторичного загрязнения по соединениям азота (табл. 2.13, рис. 2.38), связанное с особенностью формирования биомассы образованием толстого слоя биопленки. Основная часть азота

аммонийного удаляется на второй ступени (табл. 2.13), тогда как БПК₅ в основном снимается на первой ступени (табл. 2.13, рис. 2.29), это же подтверждают исследования пилотных моделей с двумя зонами биофильтрации. Эффективность удаления соединений азота и фосфатов низкая. Процесс денитрификации протекает недостаточно глубоко, образовавшиеся в процессе нитрификации соединения азота – нитриты и нитраты – практически не удаляются (рис. 2.39, табл. 2.13).

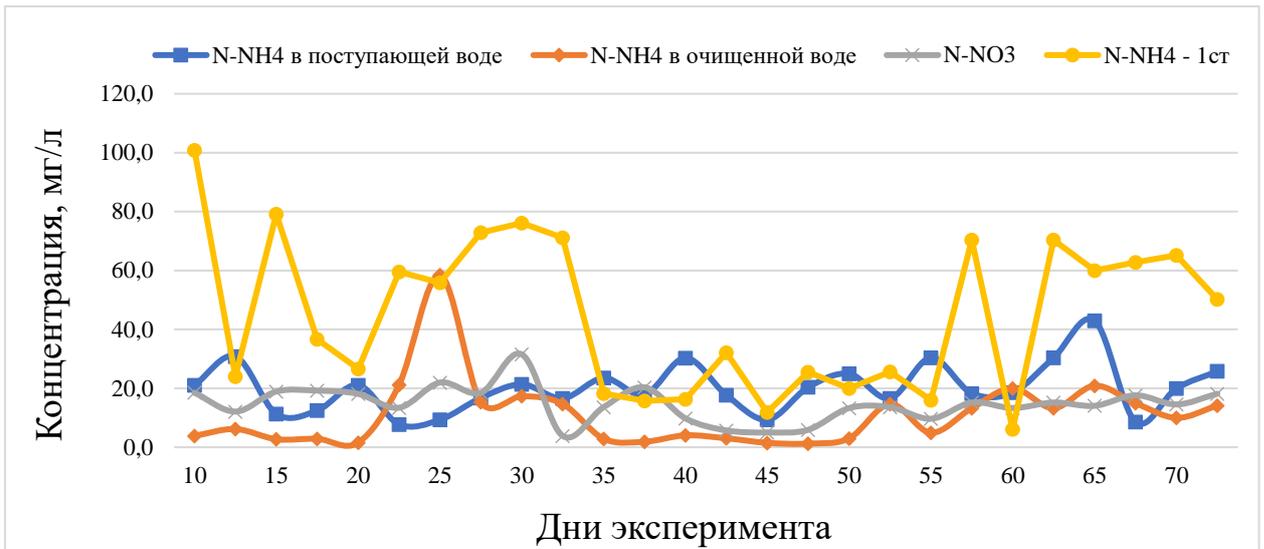


Рисунок 2.38 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 2.1-1

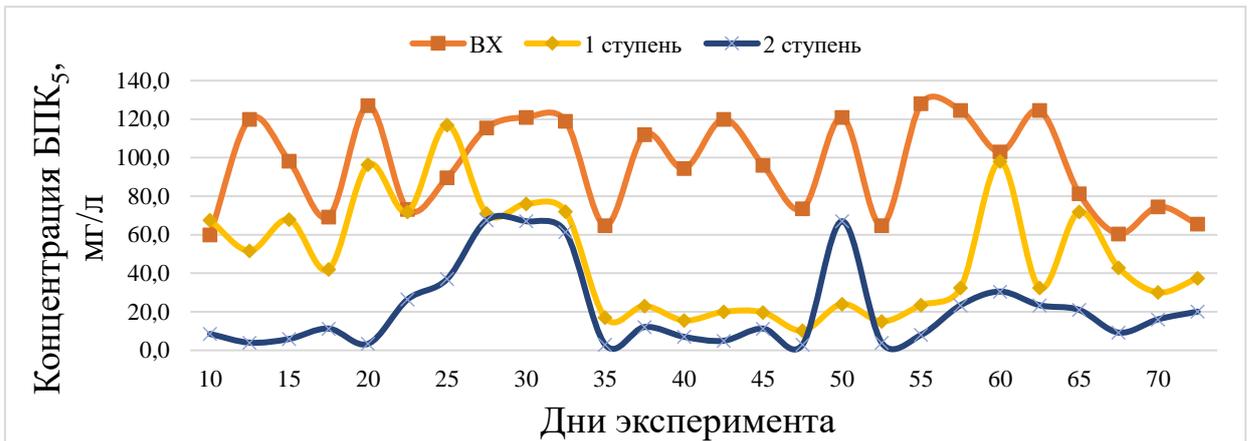


Рисунок 2.39 - Содержание БПК₅ в пилотной установке № 2.1-1

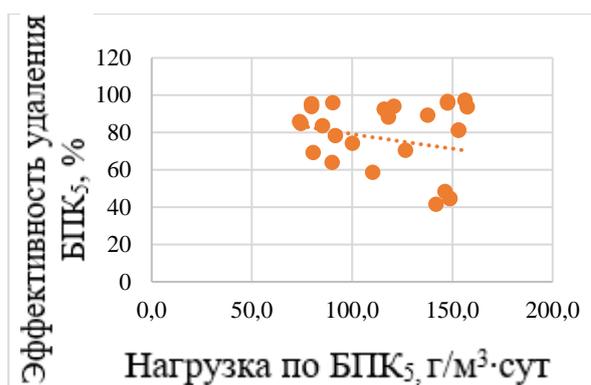


Рисунок 2.40 - Зависимость эффективности снижения БПК₅ от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке № 2.1-1

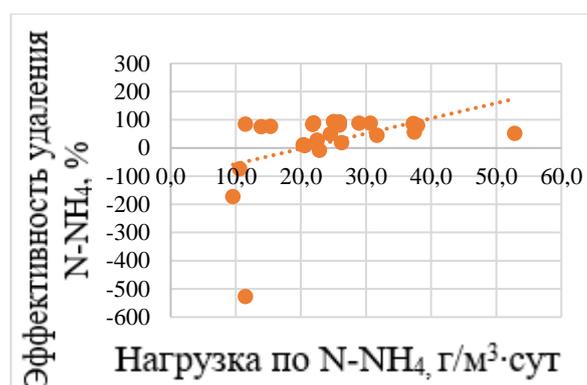


Рисунок 2.41 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH₄ в пилотной установке № 2.1-1

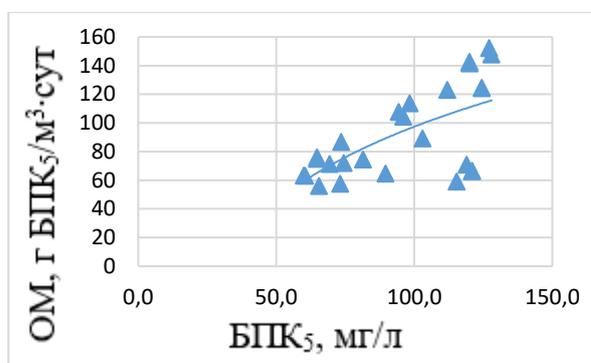


Рисунок 2.42 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 2.1-1

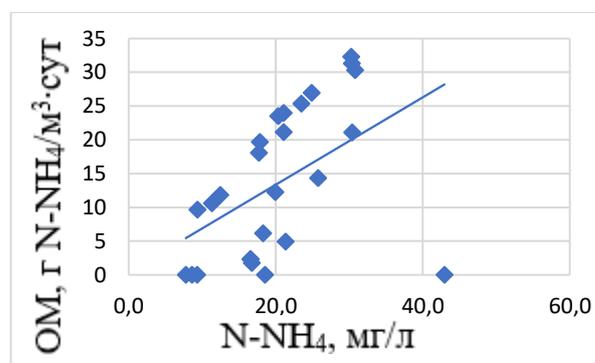


Рисунок 2.43 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного в пилотной установке № 2.1-1

После анализа работы пилотной модели № 2.1-1, а также моделей с двумя зонами биофильтрации становится очевидной необходимостью введения рециркуляции нитратной воды.

Подэтап 2.2

Все последующие экспериментальные установки работали в режиме с рециркуляцией нитратной воды в объеме 100 %. Рециркуляция осуществлялась из вторичных отстойников при помощи эрлифта.

Схема работы пилотной модели представлена на рис. 2.44.

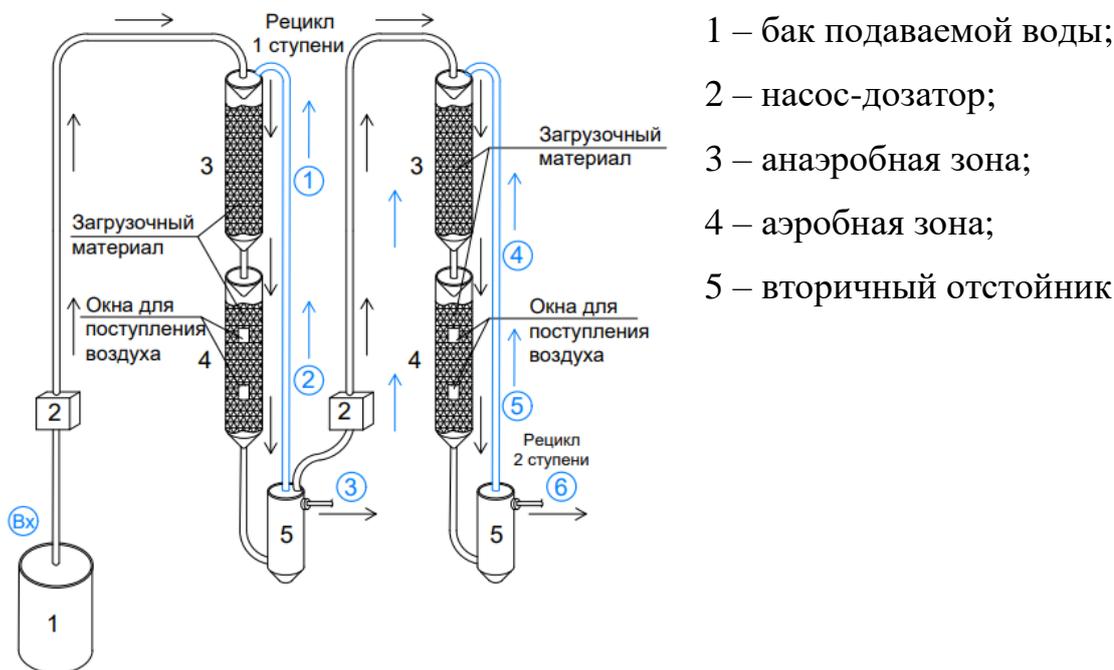


Рисунок 2.44 - Схема работы лабораторной установки с рециркуляцией нитратной воды.

Схема денитрификации-нитрификации с промежуточным отстаиванием.

Точки отбора проб: Вх – на входе из бака; 1 – после первой аноксидной зоны; 2 – после первой аэробной зоны; 3 – на выходе из первого вторичного отстойника; 4 – после второй аноксидной зоны; 5 – после второй аэробной зоны; 6 – на выходе из второго вторичного отстойника.

В пилотной установке № 2.2-1 реакторы оснащены загрузкой «Пространственная сетка» во всех зонах. Поскольку на загрузочном материале уже была зафиксирована биомасса, выход на рабочий режим был осуществлен в течение 10 суток – это время понадобилось для адаптации биоценоза биопленки к изменившимся условиям.

Средние значения химических показателей работы пилотной установки № 2.2-1 представлены в табл. 2.15. В табл. 2.16 представлены технологические показатели работы установки. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.45–2.50).

Таблица 2.15 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 2.2-1

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	23,08	60,12	-	-	3,38	103,86	76,18
1	23,00	47,52	0,182	5,64	3,19	54,93	45,73
2	15,04	34,99	0,637	7,57	2,92	32,69	30,59
3	14,20	31,55	0,808	8,95	2,90	21,58	19,42
4	4,45	20,47	0,643	11,70	2,75	10,84	12,51
5	1,50	16,68	0,395	11,97	2,58	7,25	8,65
6	0,63	10,8	0,150	9,68	1,88	3,28	6,49

Таблица 2.16 - Технологические показатели работы пилотной установки № 2.2-1

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы					
			1	2	3	4	5	6
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	47,11	68,52	79,22	89,56	93,02	96,84
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	0,35	34,84	38,47	80,72	93,50	97,27
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	39,97	59,85	74,51	83,58	88,65	91,48
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	48,93	71,17	82,28	93,02	96,61	100,58
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	0,08	8,04	8,88	18,63	21,58	22,45
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	127,75					
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	28,39					
8	ОМ БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	60,18	87,54	101,2	114,4	118,8	123,7
9	ОМ N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	0,10	9,89	10,92	22,91	26,54	27,61
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	1,23					

Окислительная мощность по азоту аммонийному на первой ступени низкая, однако эффективность удаления соединений на двух ступенях можно оценивать как высокую – 97,27 %.

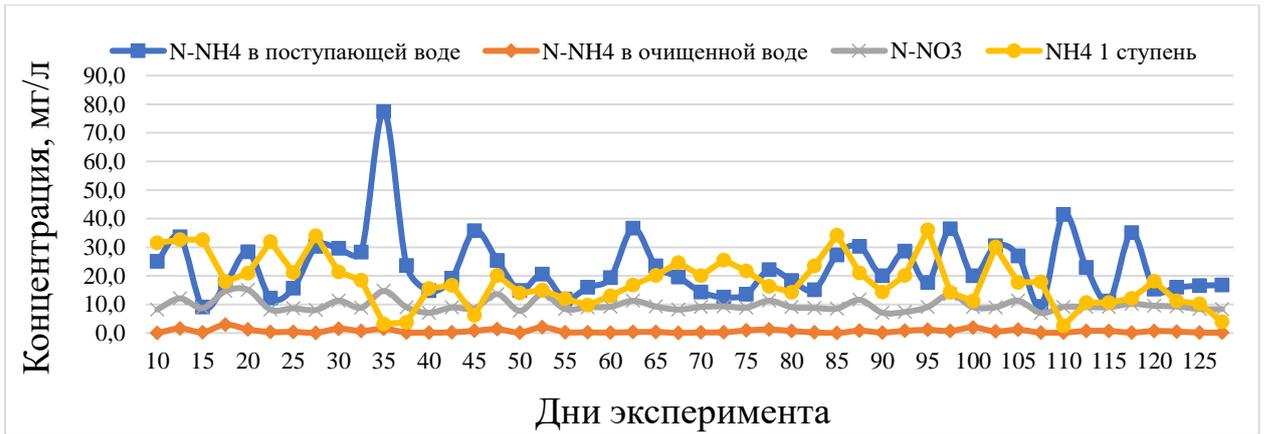


Рисунок 2.45 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 2.2-1

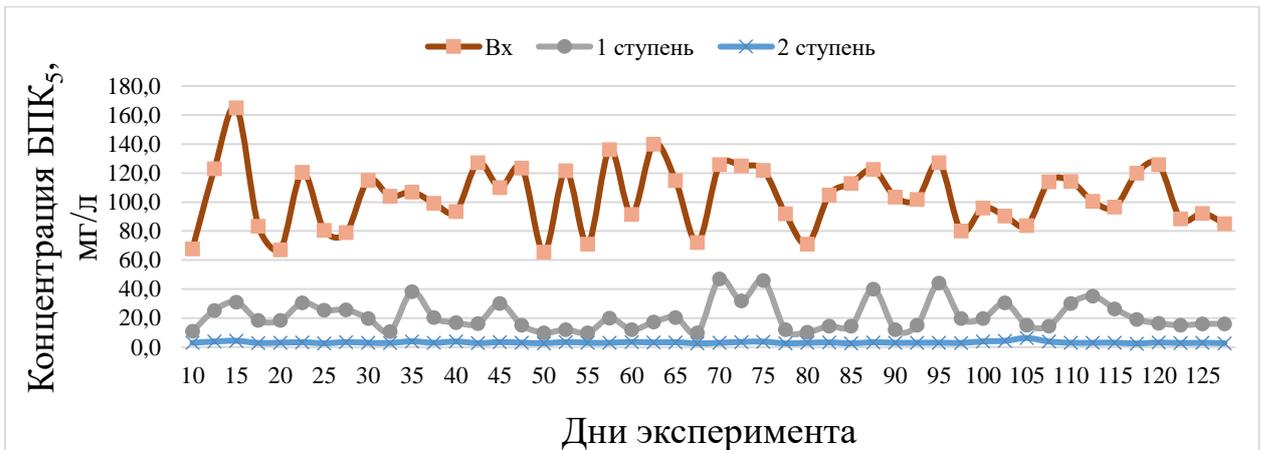


Рисунок 2.46 - Содержание органических загрязнений в пилотной установке № 2.2-1

В пилотной установке № 2.2-1 на второй ступени технологической схемы достигается высокая эффективность очищения как по БПК₅, так и по N-NH₄, однако по промежуточному продукту – нитритам – эффективность удаления недостаточная, также низкая эффективность удаления у фосфатов. Соотношение БПК₅ к азоту аммонийному составляет 1,5, что является достаточно низким показателем.

Для технологических схем, работающих в режиме с рециркуляцией нитратной воды, рационально рассмотреть технологические показатели по ступеням.

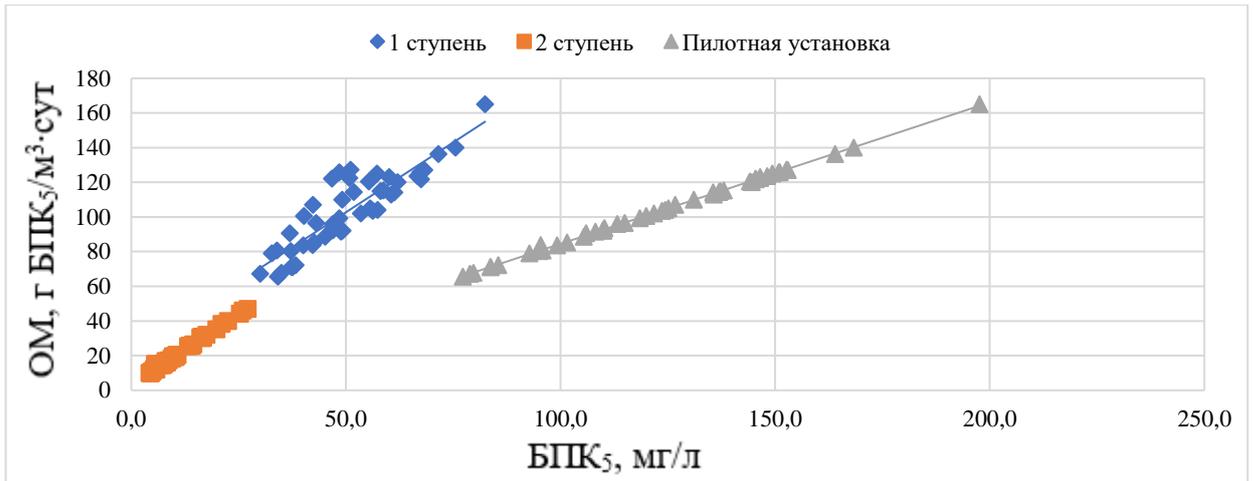


Рисунок 2.47 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 2.2-1

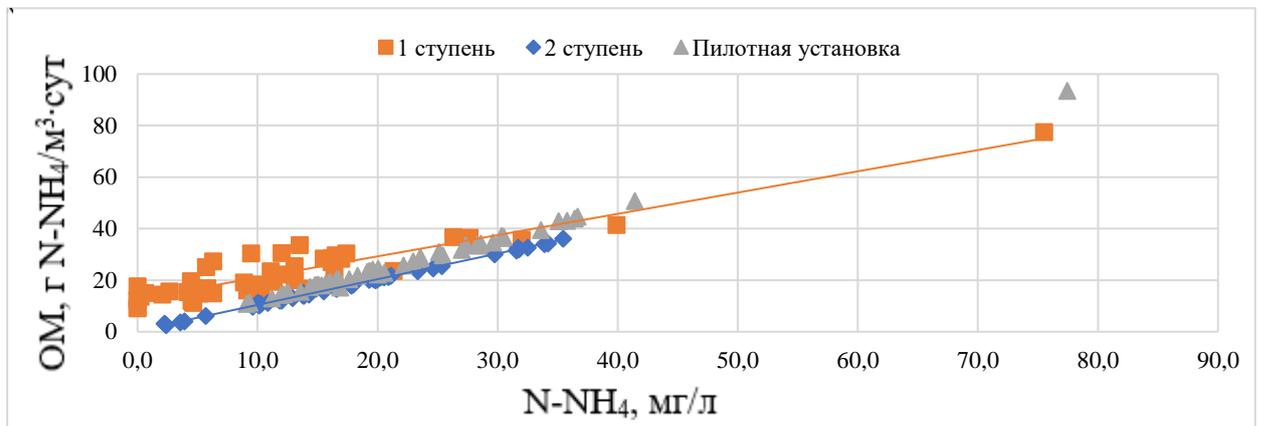


Рисунок 2.48 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного в пилотной установке № 2.2-1

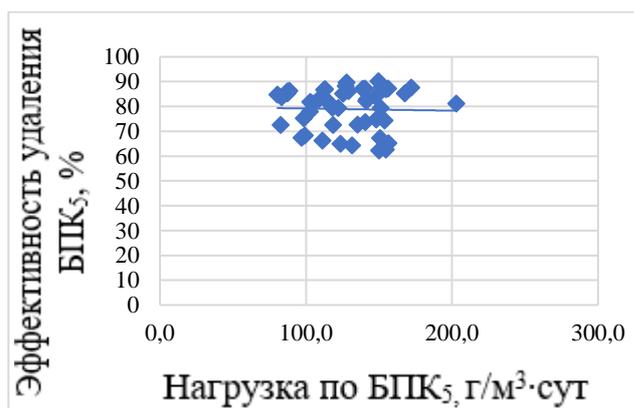


Рисунок 2.49 - Зависимость эффективности снижения BPK₅ от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке № 2.2-1

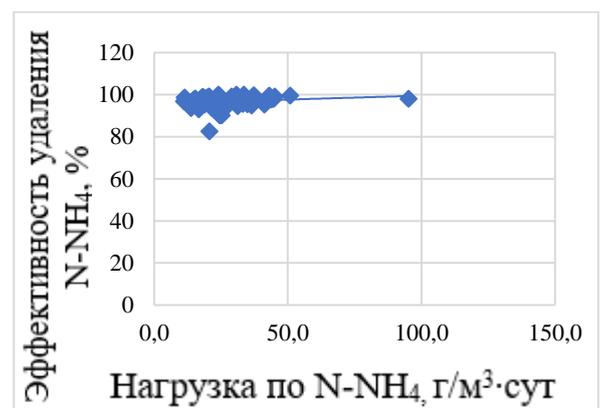


Рисунок 2.50 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH₄ в пилотной установке № 2.2-1

Денитрификация в биопленке происходит следующим образом: нитрат диффундирует сквозь аэробную часть биопленки и денитрификация происходит в аноксидной зоне [87, 119].

Для анализа процессов денитрификации целесообразно использовать показатели скорости удаления нитрата, на рис. 2.51 представлено изменение концентрации нитрата в пилотной установке по времени.

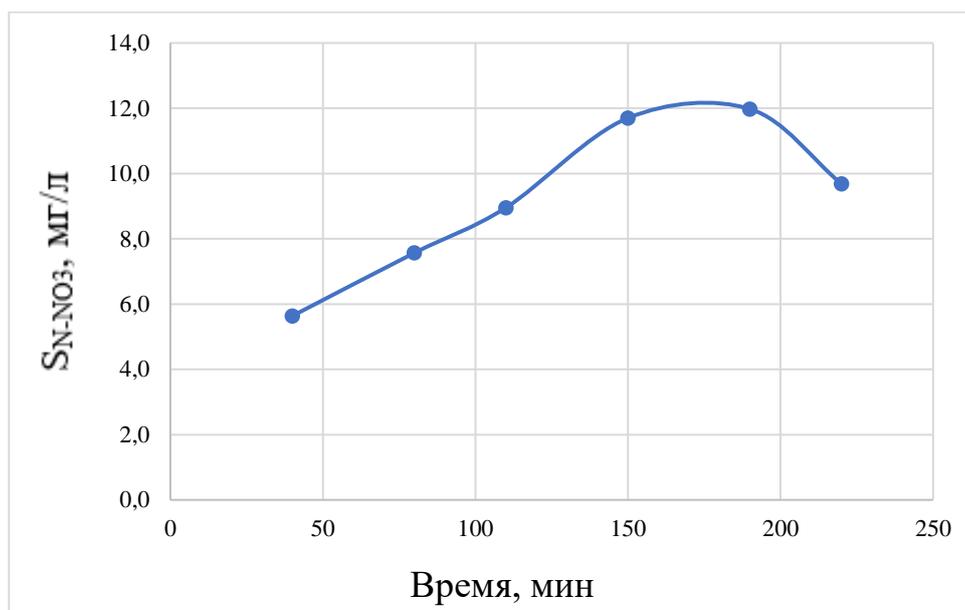


Рисунок 2.51 - Изменение концентрации $N-NO_3$ в пилотной установке № 2.2-1 в зависимости от времени пребывания

Для процесса денитрификации лимитирующим фактором может оказаться содержание как органических веществ, так и нитратов [87, 119]. Соотношение этих веществ представлено на рис. 2.52.

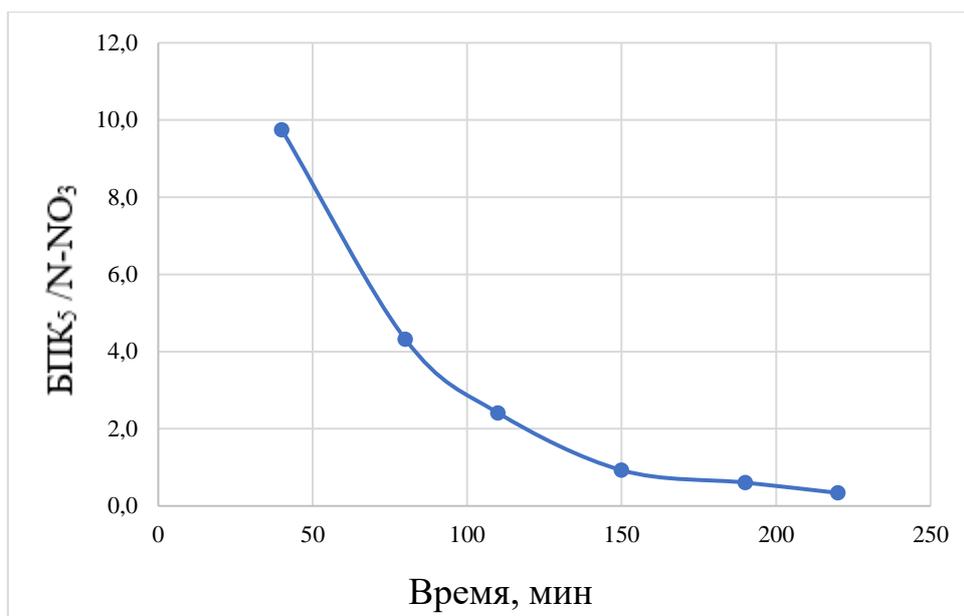


Рисунок 2.52 - Соотношение концентрации БПК₅ и N-NO₃ в пилотной установке № 2.2-1 в зависимости от времени пребывания

Скорость удаления нитрата r , г/(м³·ч) определена эмпирически с учетом исследований по определению времени контакта сточной воды с загрузочным материалом. Для установки № 2.2-1 скорость составит $r = 10,1$ г/(м³·ч).

В таких же условиях происходила работа пилотной установки № 2.2-2. Верхние зоны биофильтрации загружены материалом «Ячеистый полимер», а нижние – «Пространственная сетка». Пилотная установка работала по схеме, изображенной на рис. 2.44.

Поскольку на загрузочном материале уже была зафиксирована биомасса, выход на рабочий режим был осуществлен в течение 10 суток – это время понадобилось для адаптации биоценоза биопленки к изменившимся условиям.

Средние значения химических показателей работы пилотной установки № 2.2-2 представлены в табл. 2.17. В табл. 2.18 представлены технологические показатели работы установки. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.53–2.58).

Таблица 2.17 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 2.2-2

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	25,16	53,98	-	-	2,47	85,33	64,48
1	23,79	41,47	0,480	5,27	2,49	34,98	37,47
2	15,42	30,05	0,630	6,50	2,39	21,30	22,06
3	11,19	23,72	0,534	8,91	2,35	8,71	12,19
4	6,51	17,14	0,376	8,24	2,26	5,81	8,89
5	1,98	10,65	0,179	6,98	2,24	4,37	7,01
6	0,31	7,41	0,038	6,05	2,11	2,87	5,64

Таблица 2.18 - Технологические показатели работы пилотной установки № 2.2-2

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы					
			1	2	3	4	5	6
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	59,01	75,04	89,79	93,19	94,88	96,64
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	5,45	38,71	55,52	74,13	92,13	98,77
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	41,89	65,79	81,09	86,21	89,13	91,25
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	50,35	64,03	76,62	79,52	80,96	82,46
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	1,37	9,74	13,97	18,65	23,18	24,85
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	104,96					
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	30,95					
8	ОМ БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	61,93	78,76	94,24	97,81	99,58	101,43
9	ОМ N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	1,69	11,98	17,18	22,94	28,51	30,57
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	1,23					

Процессы денитрификации-нитрификации протекают стабильно и глубоко, соединения азота эффективно удаляются на второй ступени. Соотношение БПК₅ к азоту аммонийному составляет 1,4, что является достаточно низким показателем.

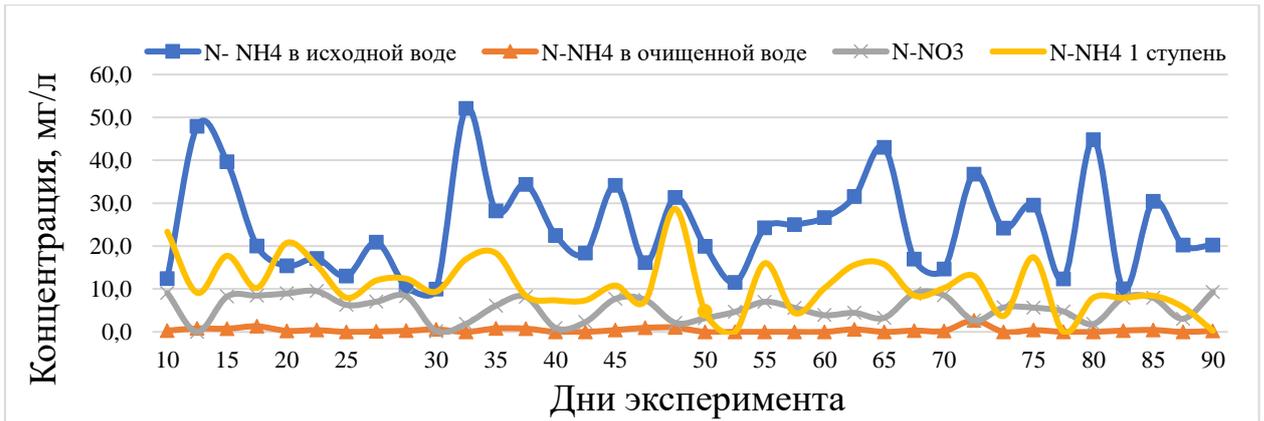


Рисунок 2.53 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 2.2-2

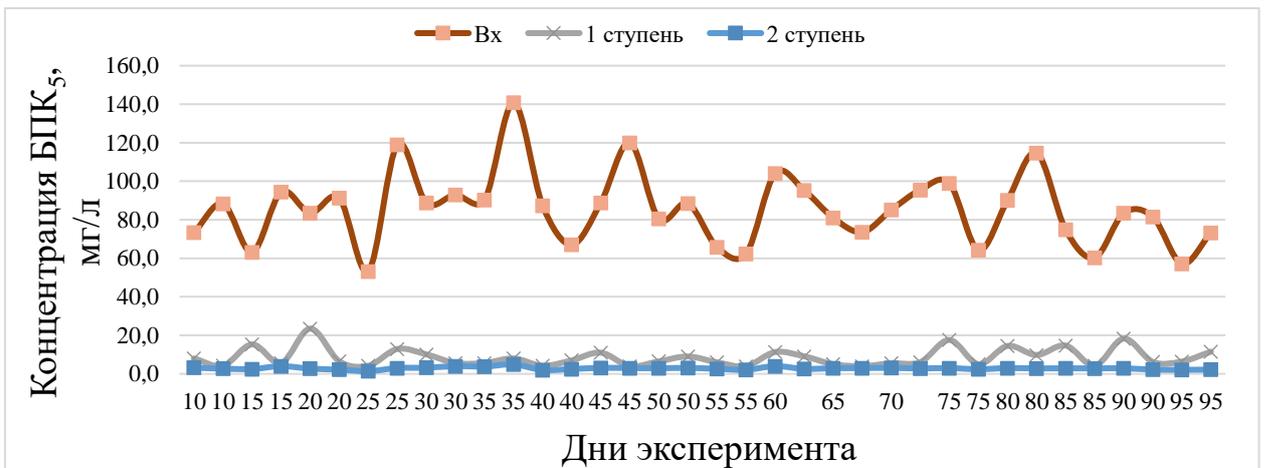


Рисунок 2.54 - Содержание BPK5 в пилотной установке № 2.2-2

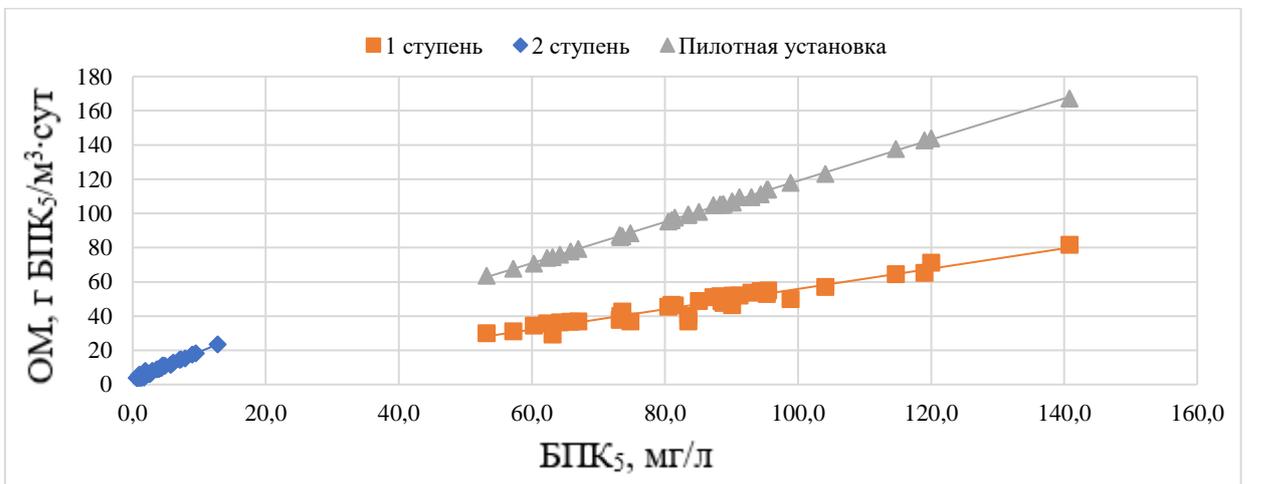


Рисунок 2.55 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 2.2-2

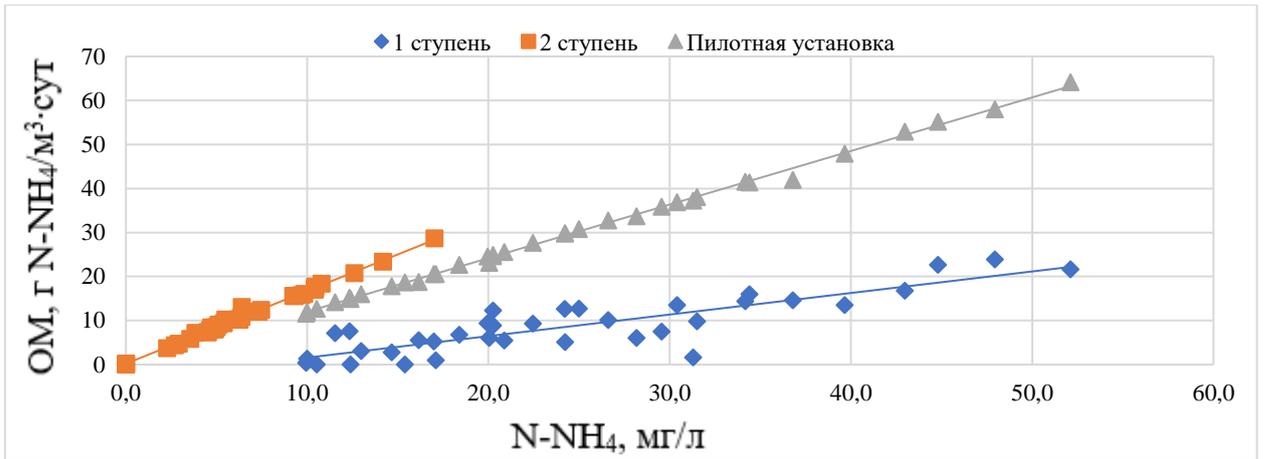


Рисунок 2.56 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного в пилотной установке № 2.2-2

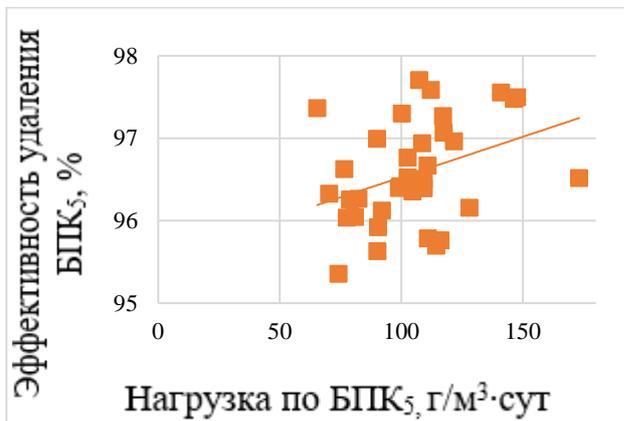


Рисунок 2.57 - Зависимость эффективности снижения БПК₅ от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке № 2.2-2

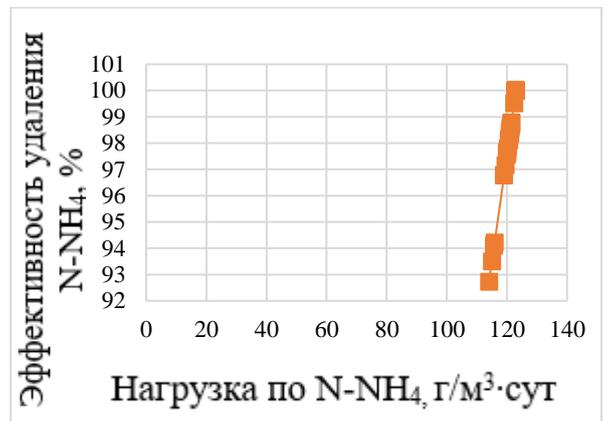


Рисунок 2.58 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH₄ в пилотной установке № 2.2-2

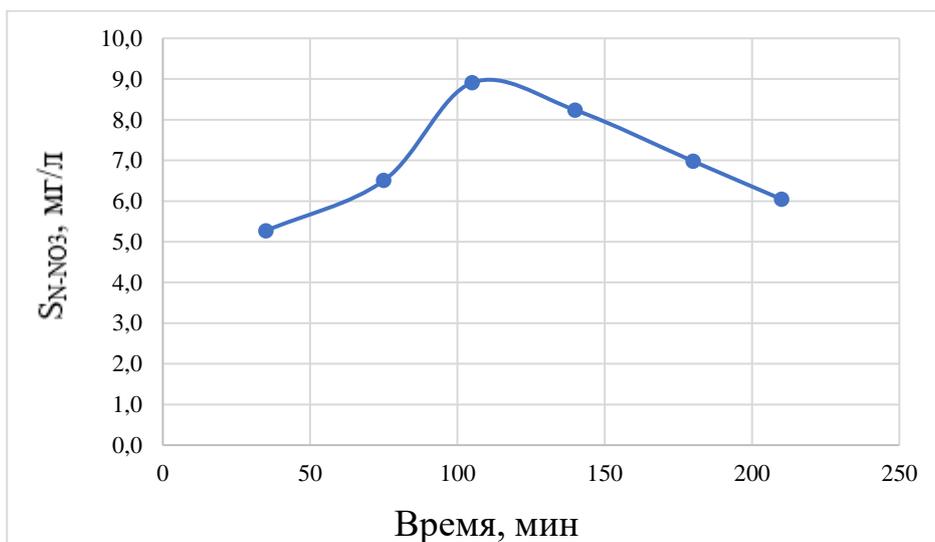


Рисунок 2.59 - Изменение концентрации N-NO₃ в пилотной установке № 2.2-2 в зависимости от времени пребывания

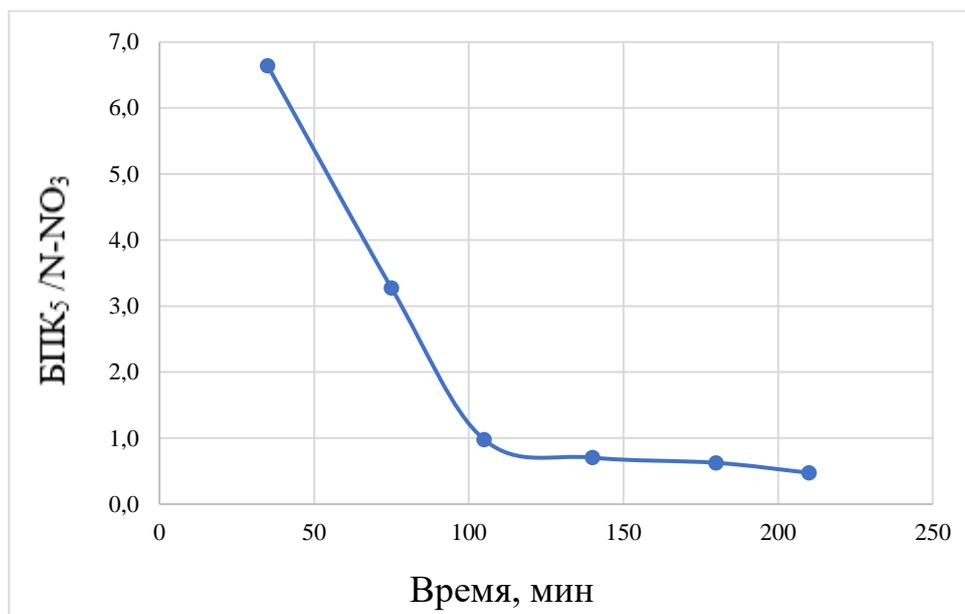


Рисунок 2.60 - Соотношение концентрации N-NO₃ и БПК₅ в пилотной установке № 2.2-2 в зависимости от времени пребывания

Скорость удаления нитрата для установки № 2.2-2 составит 114 г/(м³·ч).

Результаты работы обеих установок с четырьмя зонами биофильтрации, работающих в режиме с рециркуляцией нитратной воды, демонстрируют схожие качественные показатели на выходе.

В обеих пилотных установках на первой ступени происходило снижение основного содержания легкоокисляемых органических веществ, которое также продолжалось на второй ступени. Удаление же основной массы азота аммонийного проходило на второй ступени.

Полученные данные свидетельствуют о том, что на второй ступени проходила денитрификация. Следует отметить, что условия для прохождения реакции нитрификации-денитрификации на второй ступени достаточно нестандартные и характеризуются низким содержанием БПК₅. Соотношение БПК₅/N-NH₄ 1,4–1,5.

Такой эффект уже наблюдала Н. А. Залетова ранее в работе [24] в технологической схеме с прикрепленной микрофлорой.

В литературе достаточно широко описано одновременное протекание процессов в биопленке [91]. Хенце [24] обозначает, что денитрификация может происходить в биопленке, даже если в протекающей в биофильтре воде создаются аэробные условия. Денитрификация может протекать в самой центральной части биопленки, если там присутствует органическое вещество.

Одновременное проведение процессов денитрификации-нитрификации связано с тем, что в слое биопленки находятся органические загрязнения, которые используются как источник питания. Органические загрязнения в биопленке возникают либо в процессе сорбции, либо вследствие отмирания клеток [1, 87].

Денитрификация происходит в глубине биомассы, а нитрификация на поверхности биопленки. «Поставка» связанного кислорода непосредственно в биопленку и установление оптимального гидравлического режима создают тонкий слой биомассы, являющийся наиболее эффективным.

Следует отметить более эффективную работу пилотной модели № 2.2-2 по сравнению с моделью № 2.2-1. Выше эффективность удаления соединений азота и органических загрязнений. Связано это с характеристиками загрузочного материала. Более плотно расположенные друг к другу прутики загрузочного материала «Ячеистый полимер» позволяют образовывать тонкую плотную биомассу в большем количестве, а увеличение длины пути за счет расположения загрузочного материала в теле реактора увеличивает «рабочую» площадь загрузочного материала.

В табл. 2.17 представлены результаты работы пилотной установки № 2.2-2, после анализа результатов выявлена высокая эффективность снижения загрязнений по БПК₅ и N-N₄. Концентрация нитратов соответствует нормам сброса в водные объекты рыбохозяйственного значения, а концентрация нитритов несколько превышает нормы. Таким образом, принято решение исследования такой пилотной модели с более низкой гидравлической нагрузкой (№ 2.2-3) с целью определения возможности достижения ПДК по сбросу в водные объекты рыбохозяйственного значения в том числе и по

органическим загрязнением, а также определения оптимального режима работы технологической схемы.

Поскольку на загрузочном материале уже была зафиксирована биомасса, выход на рабочий режим был осуществлен в течение 10 суток – это время понадобилось для адаптации биоценоза биопленки к изменившимся условиям.

Средние значения химических показателей работы пилотной установки № 2.2-3 представлены в табл. 2.19. В табл. 2.20 представлены технологические показатели работы установки. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.61–2.66).

Таблица 2.19 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 2.2-3

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	25,32	54,02	-	-	3,56	89,77	70,63
1	22,79	43,71	0,417	4,87	2,93	45,63	39,36
2	15,01	35,54	0,691	8,88	2,51	27,10	24,45
3	9,56	25,01	0,582	10,91	2,40	11,19	14,36
4	5,34	14,26	0,311	9,40	2,33	8,13	10,45
5	1,68	12,32	0,108	7,33	2,16	3,77	8,33
6	0,14	7,46	0,024	6,62	2,07	2,16	6,25

Таблица 2.20 - Технологические показатели работы пилотной установки № 2.2-3

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы					
			1	2	3	4	5	6
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	49,17	69,81	87,53	90,94	95,80	97,59
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	9,99	40,72	62,24	78,91	93,36	99,45
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	44,27	65,38	79,67	85,20	88,21	91,15
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	44,14	62,67	78,58	81,64	86,00	87,61
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	2,53	10,31	15,76	19,98	23,64	25,18
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	79,00					
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	22,28					
8	ОМ БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	38,84	55,15	69,15	71,84	75,68	77,10
9	ОМ N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	2,23	9,07	13,87	17,58	20,80	22,16
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	0,88					

Процессы денитрификации-нитрификации протекают стабильно и глубоко, соединения азота эффективно удаляются до нормативов сброса в водные объекты рыбохозяйственного значения. Происходит также глубокое удаление органических загрязнений.

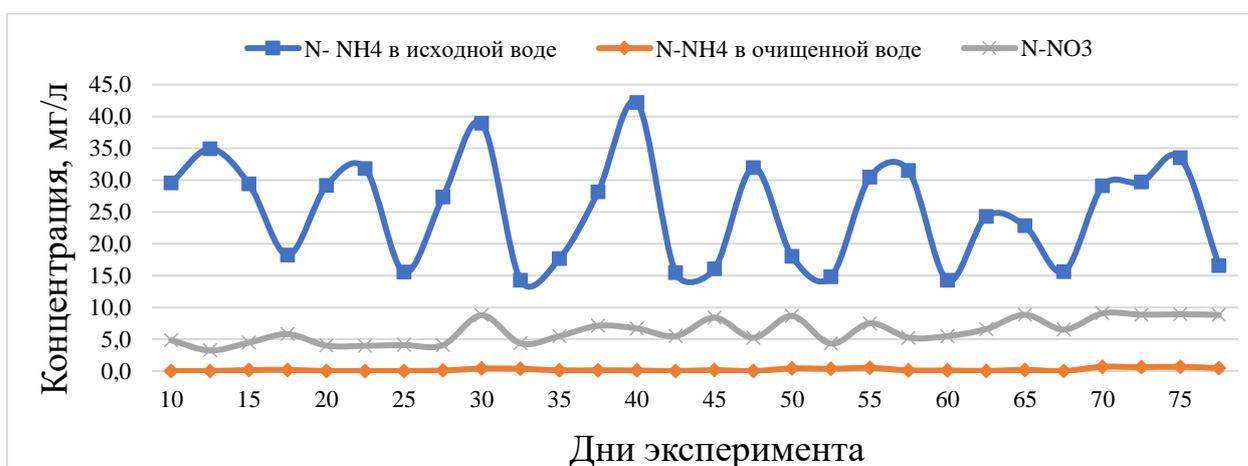


Рисунок 2.61 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 2.2-3

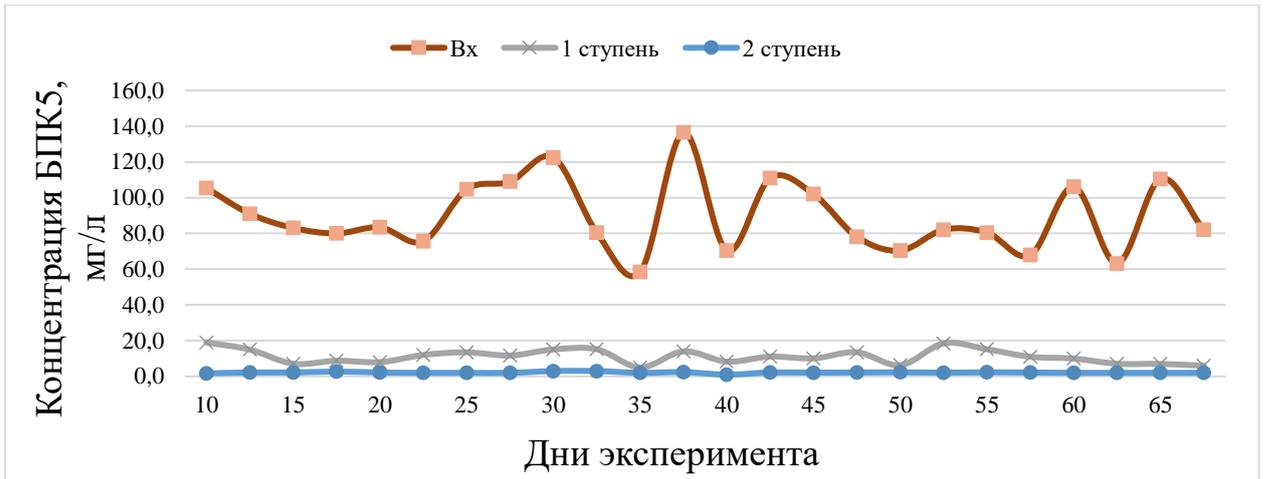


Рисунок 2.62 - Содержание органических загрязнений в пилотной установке № 2.2-3

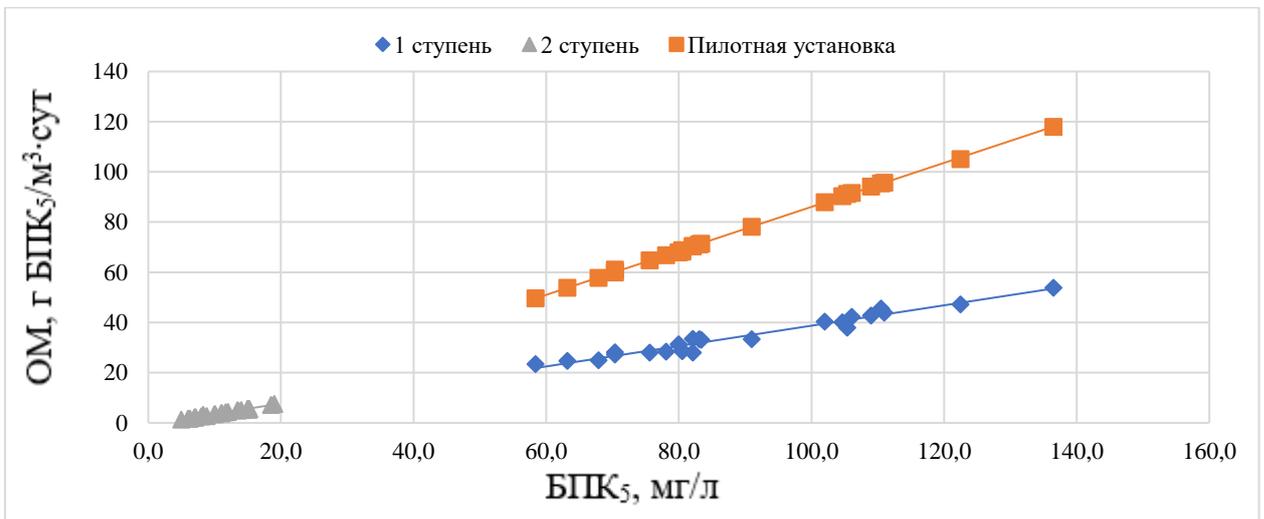


Рисунок 2.63 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 2.2-3

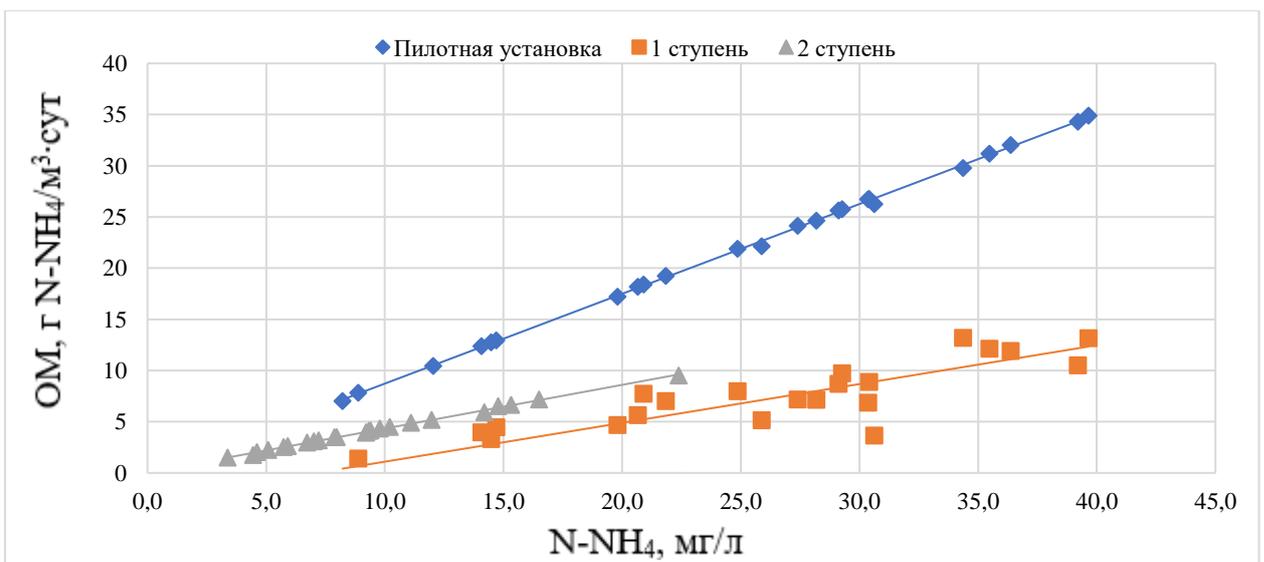


Рисунок 2.64 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного в пилотной установке № 2.2-3

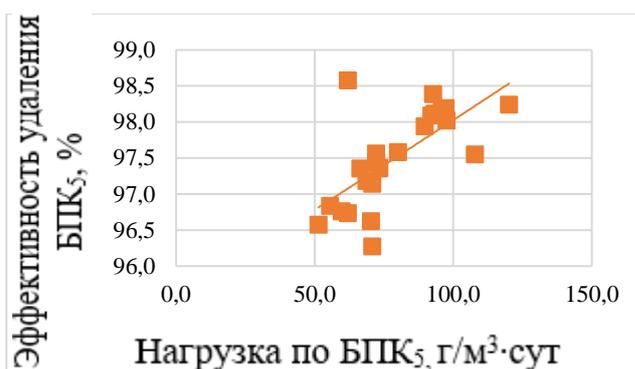


Рисунок 2.65 - Зависимость эффективности снижения БПК₅ от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке № 2.2-3

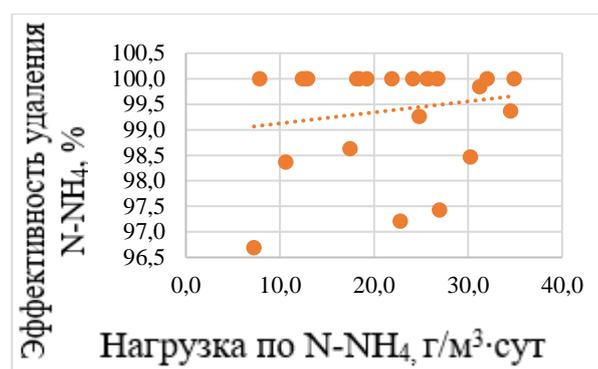


Рисунок 2.66 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH₄ в пилотной установке № 2.2-3

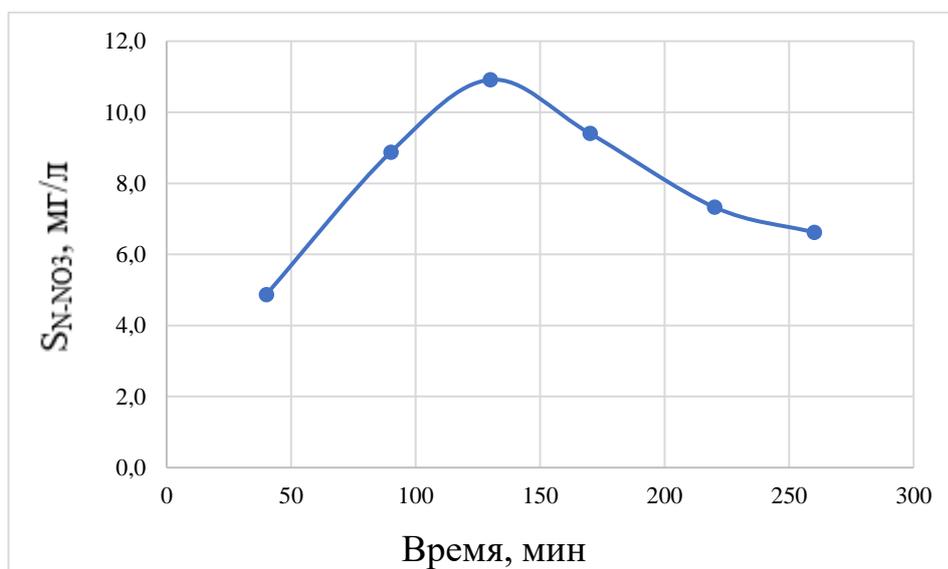


Рисунок 2.67 - Изменение концентрации N-NO₃ в пилотной установке № 2.2-3 в зависимости от времени пребывания

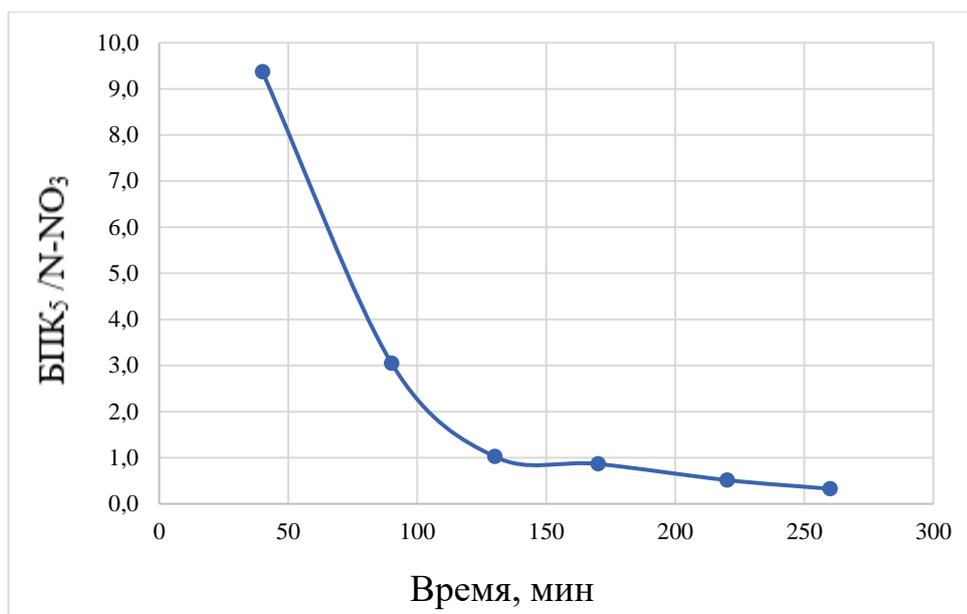


Рисунок 2.68 - Соотношение концентрации N-NO₃ и БПК₅ в пилотной установке № 2.2-3 в зависимости от времени пребывания

Подэтап 2.3

В предыдущих пилотных установках зоны нитрификации и денитрификации имели одинаковые габариты реактора. Однако в других реакторах-аэротенках зона денитрификации, как правило, существенно меньше в объеме. Задачей подэтапа 2.3 являлось исследование работы модели, где зона денитрификации была существенно меньше, чем зона нитрификации. Соотношение зон денитрификации и нитрификации – 25 и 75 % соответственно.

Все зоны биофильтрации загружены материалом «Ячеистый полимер». Пилотная установка работала по схеме, отображенной на рис. 2.44.



Рисунок 2.69 - Лабораторная модель с четырьмя зонами биофильтрации с загрузочным материалом «Ячеистый полимер» с соотношением зон денитрификации и нитрификации 25 и 75 %

В исследуемой модели первый и третий реактор были изолированы от поступления кислорода. Объем каждой такой зоны составлял 5 л. Высота колонны – 0,5 м, высота слоя загрузки – 0,4 м. Во второй и четвертый реактор воздух поступал естественным путем. Высота колонны составляла 1 м, высота загрузочного материала – 0,9 м. Вторичные отстойники также были выполнены из оргстекла объемом 1 л.

После прохождения через первый биофильтр сточная вода поступала во второй реактор (классический капельный биофильтр с полимерной загрузкой). Пройдя биофильтрацию сточная вода направлялась во вторичный отстойник, далее поступала в третий биофильтрационный реактор, аналогичный первому, после которого сточная жидкость поступала в

четвертый реактор, который был выполнен аналогично второму. Прошедшая биофильтрацию сточная вода направлялась во второй вторичный отстойник.

Выход на рабочий режим был осуществлен в течение 25 суток, инокуляция биомассы производилась с других установок, работающих параллельно с текущей.

Гидравлический режим был выбран такой же, как и на предыдущих экспериментальных установках, ввиду его оптимальности с точки зрения фиксации биомассы и выноса отмершей биопленки. Однако в связи с уменьшением аноксидной зоны гидравлическая нагрузка возросла.

Средние значения химических показателей работы пилотной установки № 2.3-1 представлены в табл. 2.21. В табл. 2.22 представлены технологические показатели работы установки. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.69–2.71).

Таблица 2.21 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 2.3-1

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	21,23	52,45	-	-	1,46	90,14	81,35
1	26,80	45,36	1,041	1,34	1,67	64,98	58,36
2	21,09	41,43	1,221	4,38	1,66	42,52	41,10
3	14,72	32,41	1,040	7,69	1,63	26,84	22,93
4	11,91	23,93	0,820	4,12	1,57	20,81	13,15
5	7,40	16,33	0,663	2,31	1,53	17,14	9,43
6	4,88	12,33	0,611	1,72	1,51	15,83	6,07

Таблица 2.22 - Технологические показатели работы пилотной установки № 2.3-1

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы					
			1	2	3	4	5	6
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	27,91	52,83	70,22	76,91	80,99	82,44
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	0*	0,66	30,66	43,90	65,14	77,01
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	28,26	49,48	71,81	83,84	88,41	92,54
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	25,16	47,62	63,30	69,33	73,00	74,31
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	0*	0,14	6,51	9,32	13,83	16,35
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	147,83					
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	34,82					
8	ОМ БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	41,26	78,10	103,8	113,7	119,7	121,9
9	ОМ N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	0*	0,23	10,68	15,28	22,68	26,81
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	1,64					

* Вследствие возникновения вторичного загрязнения вода на выходе из реактора по химическим показателям была более загрязненной, чем на входе.

Процессы денитрификации-днитрификации протекают стабильно, но недостаточно глубоко (табл. 2.21, 2.22, рис. 2.69).

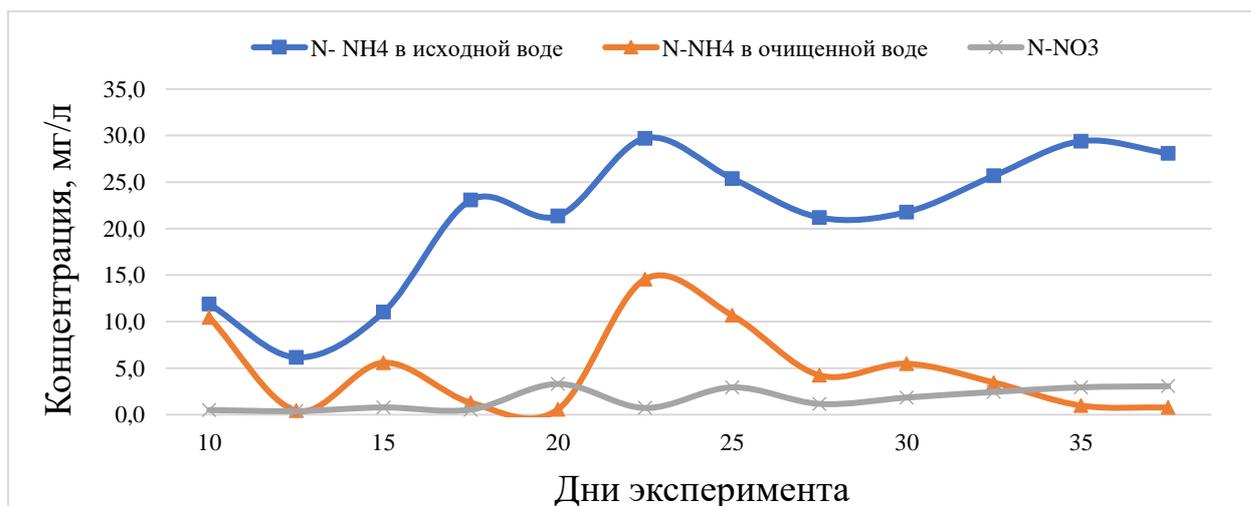


Рисунок 2.69 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 2.3-1

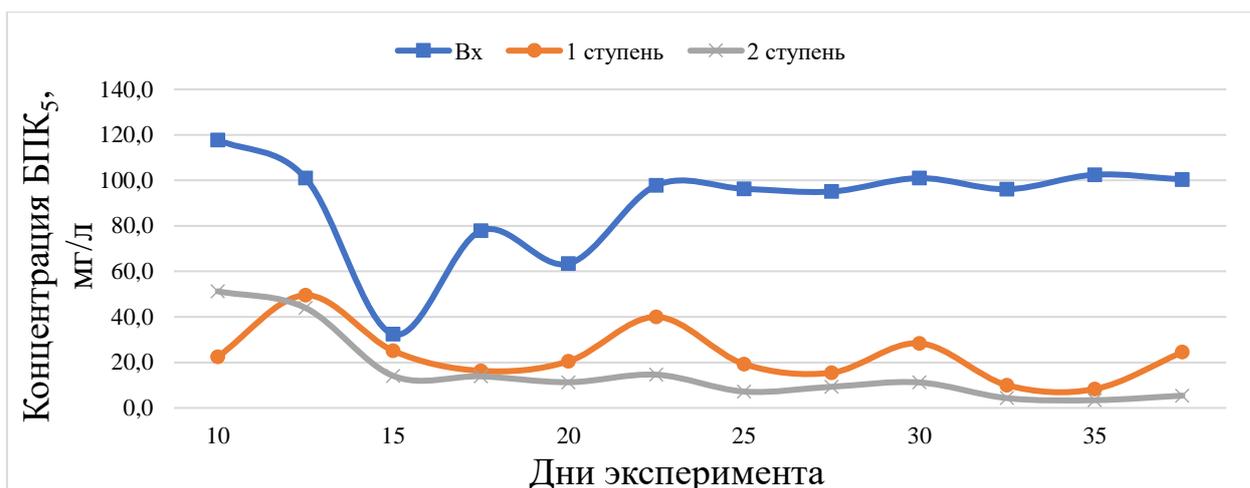


Рисунок 2.70 - Содержание органических загрязнений в пилотной установке № 2.3-1

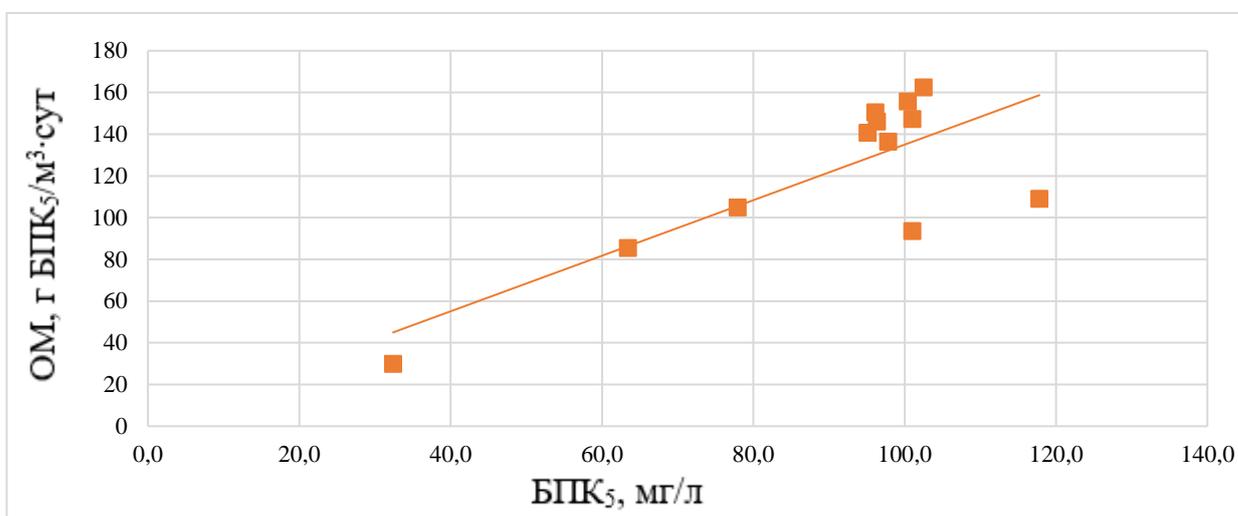


Рисунок 2.71 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 2.3-1

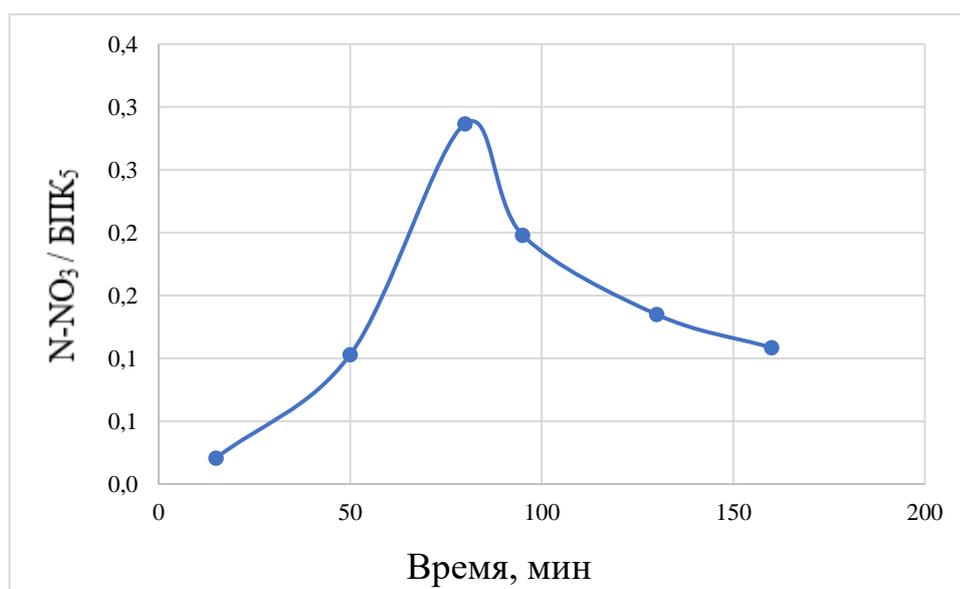


Рисунок 2.72 - Изменение концентрации N-NO₃ в пилотной установке № 2.3-1 в зависимости от времени пребывания

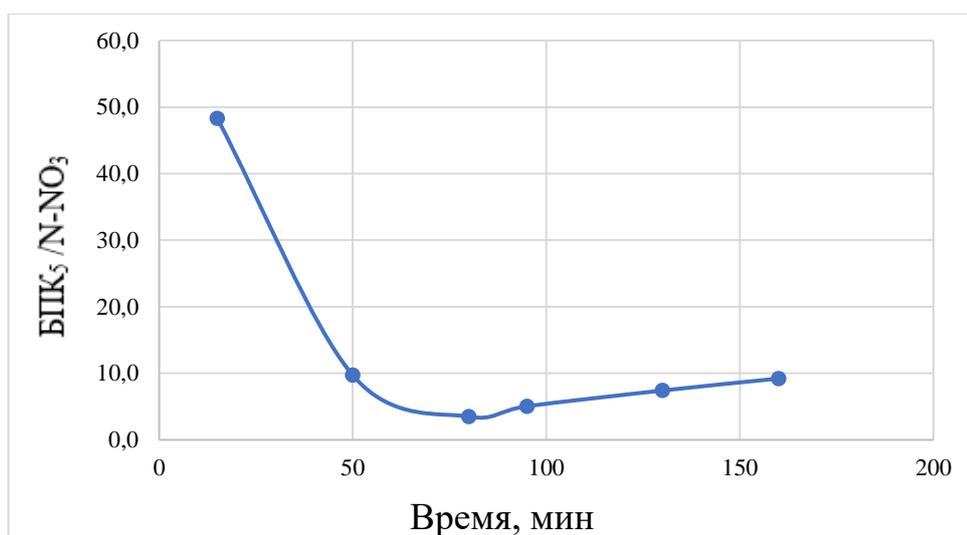


Рисунок 2.73 - Соотношение концентрации N-NO₃ и БПК₅ в пилотной установке № 2.3-1 в зависимости от времени пребывания

Отмечается снижение эффективности удаления загрязнений при уменьшении зоны денитрификации (табл. 2.21, 2.22). Процессы нитрификации и денитрификации протекают недостаточно глубоко (рис. 2.69, 2.70, 2.73), также ниже эффективность удаления органических загрязнений.

Проанализировав работу исследуемых технологических схем с четырьмя зонами биофильтрации, можно отметить одновременное проведение процессов денитрификации-нитрификации. Наиболее высокую эффективность показали установки № 2.2-2 и 2.2-3, на выходе очищенная вода имела следующие характеристики: азот аммонийный – 0,14 мг/л, нитриты – 0,024 мг/л, нитраты – 6,62 мг/л, БПК₅ – 2,16 мг/л.

2.4.3 Исследование работы лабораторной модели при периодическом поступлении сточных вод

Системы канализации малых городов и населенных мест в целом характеризуются крайней неравномерностью образования и поступления сточных вод, поэтому следует рассматривать возможность неравномерного или периодического поступления воды на сооружения. Также велика

вероятность временного прекращения поступления воды на очистные сооружения.

Для очистки сточных вод с периодической подачей используются модульные очистные сооружения [75], биореакторы с загрузочным материалом [3, 16]. Н. А. Залетовой проводились исследования по эффективности удаления аммония солевого после высушивания биопленки [24].

Исходя из вышесказанного, были проведены исследования пилотной установки № 2.2-2 с загрузочными материалами «Пространственная сетка» и «Ячеистый полимер» [97].

В рамках проведения эксперимента была прекращена подача воды в пилотную установку на двое суток. После восстановления подачи воды наблюдалось активное схождение биопленки, в результате которого осталась только биомасса, расположенная в межъячейном пространстве загрузочного материала.

На рис. 2.74 представлено содержание соединений азота в пилотной установке. Анализируя графики, можно сделать вывод, что на пятые сутки «работоспособная» биомасса восстановилась и процесс очистки сточных вод происходил в полном объеме.

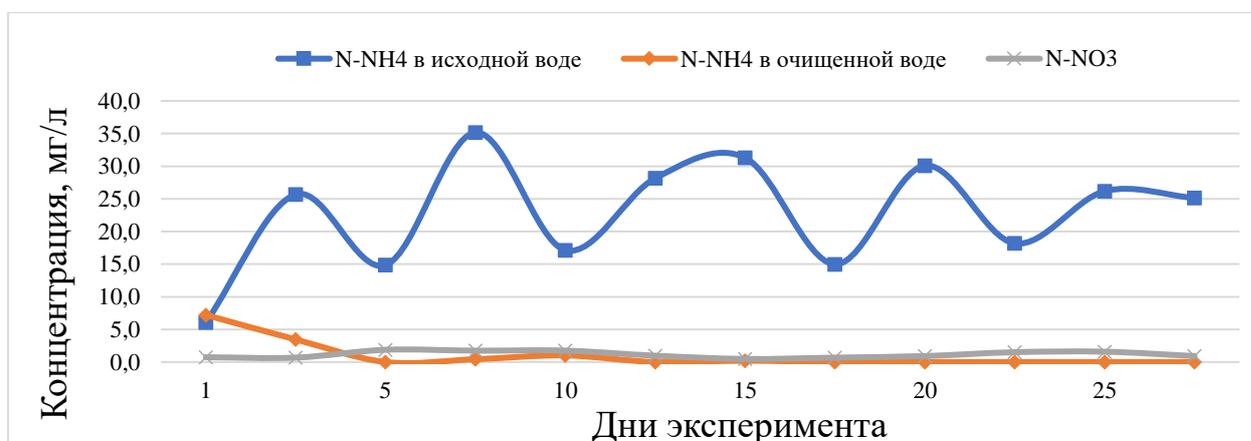


Рисунок 2.74 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 2.2-2 после временного отключения подачи воды

Также стабильно протекал процесс удаления органических загрязнений, результаты представлены на рис. 2.75.

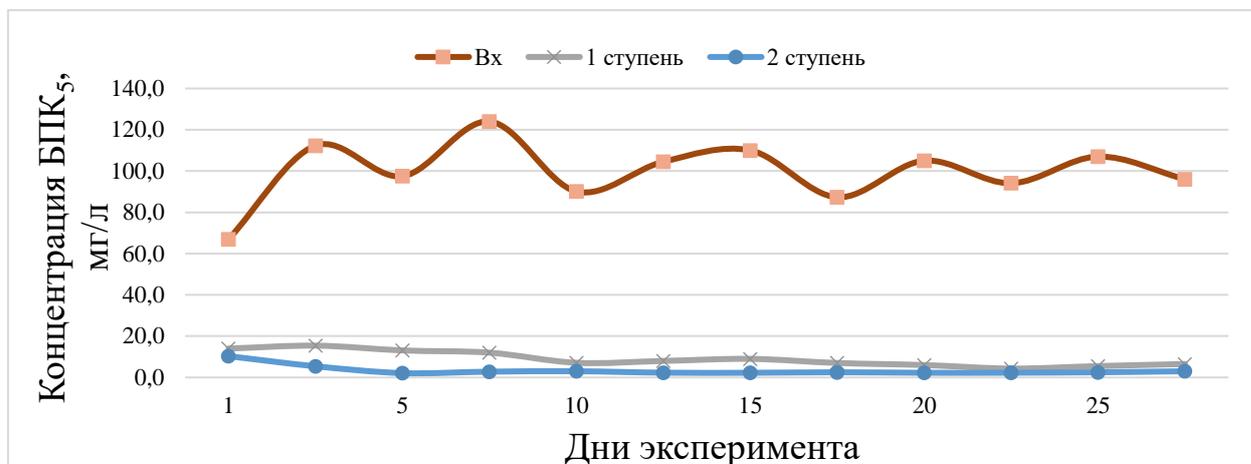


Рисунок 2.75 - Содержание органических загрязнений в пилотной установке № 2.2-2 после временного отключения подачи воды

Следует отметить, что после отключения лабораторной установки инокуляция активным илом не производилась.

2.5 Результаты работы биофильтров, работающих в режиме нитрификации-денитрификации в полупроизводственных условиях

После завершения серии исследований в лаборатории для верификации результатов эксперимента был выполнен эксперимент в реальных условиях (этап 3). Полупроизводственная установка находилась на канализационных очистных сооружениях в Московской области (г. Мытищи). В установку подавалась сточная вода, поступающая в КОС г. Мытищи и прошедшая все ступени механической очистки.

Исследования на реальной воде проводились на двух подэтапах.

Подэтап 3.1

На подэтапе 3.1 исследовалась пилотная установка № 3.1, представленная на рис. 2.44. Верхние зоны биофильтрации были загружены

материалом «Ячеистый полимер», а нижние – «Пространственная сетка». Рециркуляция осуществлялась в объеме 100 %.

Сточная вода подавалась из бака объемом 60 л, куда собиралась после первичного отстойника, расположенного на территории очистных сооружений г. Мытищи.

Инокулирование производилось при помощи иловой смеси, взятой с очистных сооружений г. Мытищи, работающих в режиме полной биологической очистки.

На 15-е сутки работу установки можно оценить как стабильную.

Средние значения химических показателей работы пилотной установки № 3.1 представлены в табл. 2.23. В табл. 2.24 представлены технологические показатели работы установки. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.76–2.81).

Таблица 2.23 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 3.1

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	28,08	56,43	-	-	4,16	83,96	107,61
1	18,94	38,13	0,706	4,16	3,98	42,75	61,32
2	15,73	34,42	0,752	7,67	3,92	29,12	43,09
3	9,66	23,32	0,606	11,32	3,86	9,52	23,56
4	5,08	17,31	0,066	9,53	3,82	6,34	15,43
5	2,76	11,65	0,071	7,40	3,76	4,21	11,56
6	0,28	5,71	0,016	4,66	3,68	2,59	8,07

Таблица 2.24 - Технологические показатели работы пилотной установки № 3.1

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы					
			1	2	3	4	5	6
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	49,08	65,32	88,66	92,45	94,99	96,92
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	32,55	43,98	65,60	81,91	90,17	99,00
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	43,02	59,96	78,11	85,66	89,26	92,50
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	41,21	54,84	74,44	77,62	79,75	81,37
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	9,14	12,35	18,42	23,00	25,32	27,80
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	58,77					
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	19,66					
8	ОМ БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	28,85	38,39	52,11	54,33	55,83	56,96
9	ОМ N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	6,40	8,65	12,89	16,10	17,72	19,46
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	0,7					

Процессы денитрификации-нитрификации протекают стабильно и глубоко (табл. 2.23, 2.24, рис. 2.76).

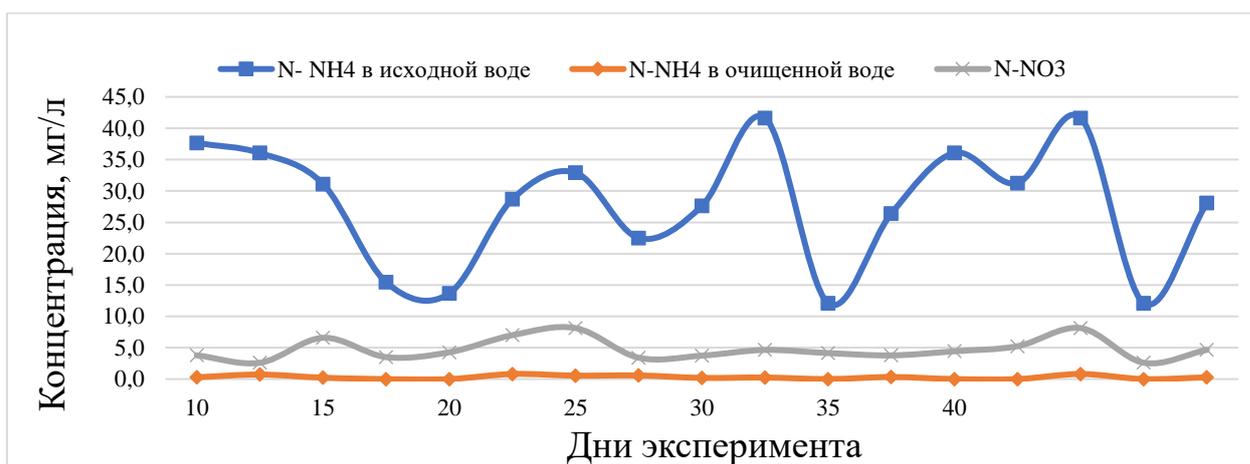


Рисунок 2.76 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 3.1

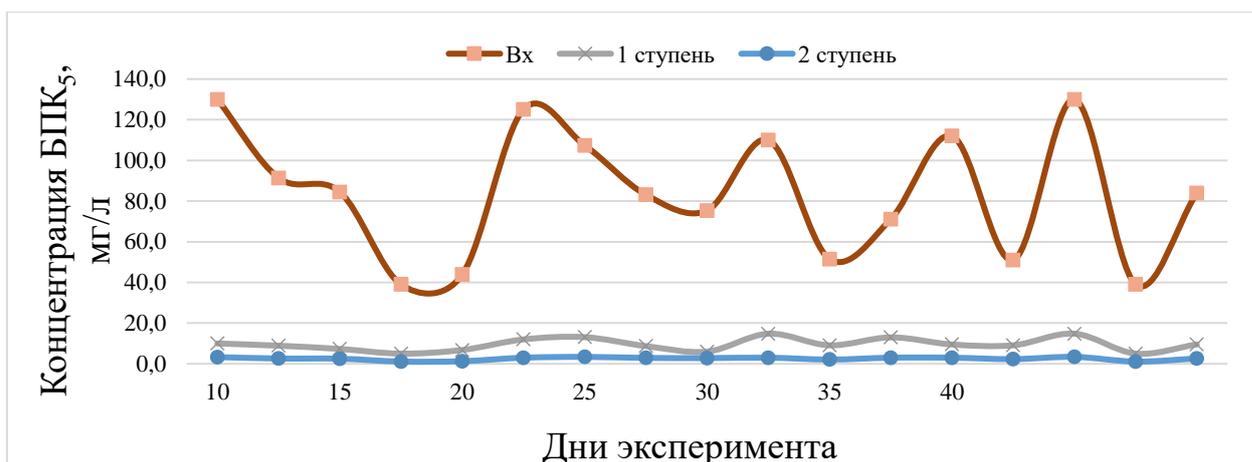


Рисунок 2.77 - Содержание органических загрязнений в пилотной установке № 3.1

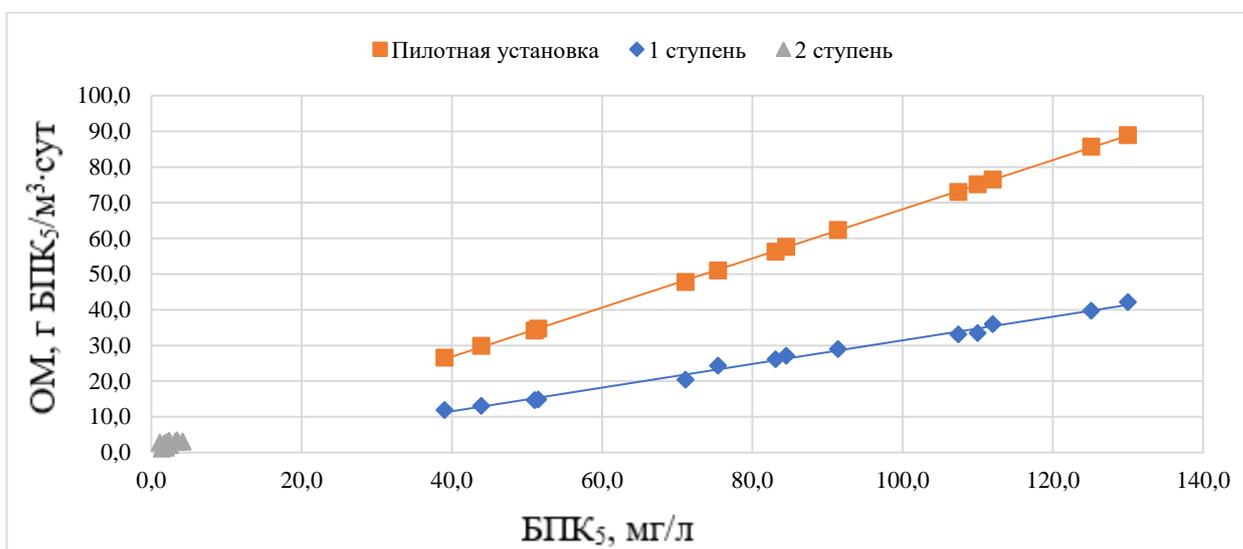


Рисунок 2.78 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 3.1

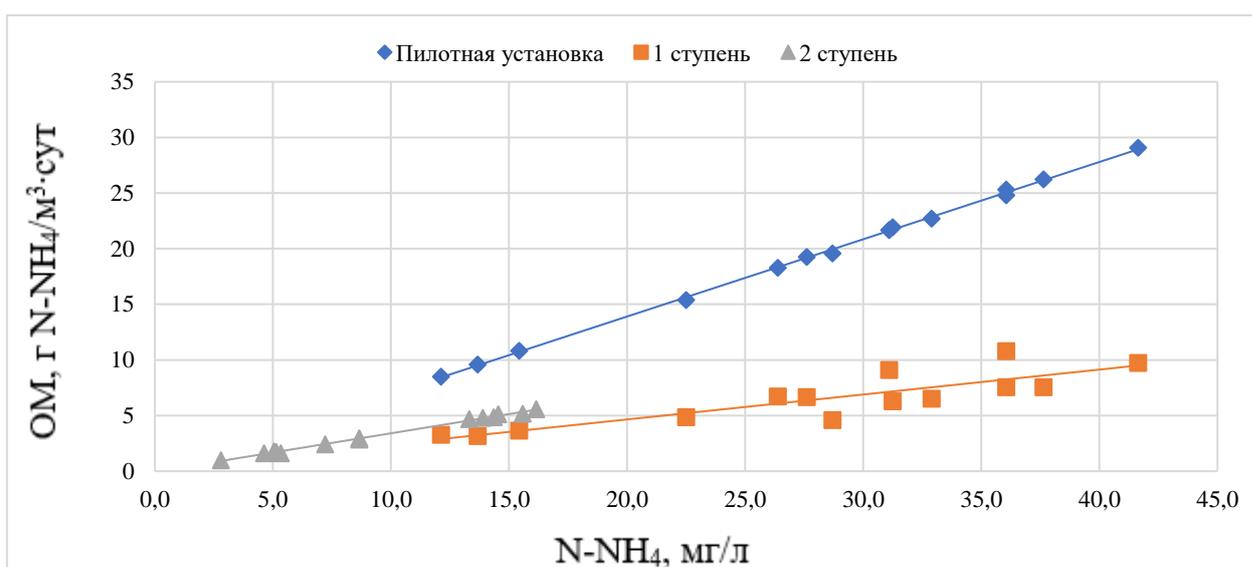


Рисунок 2.79 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного в пилотной установке № 3.1

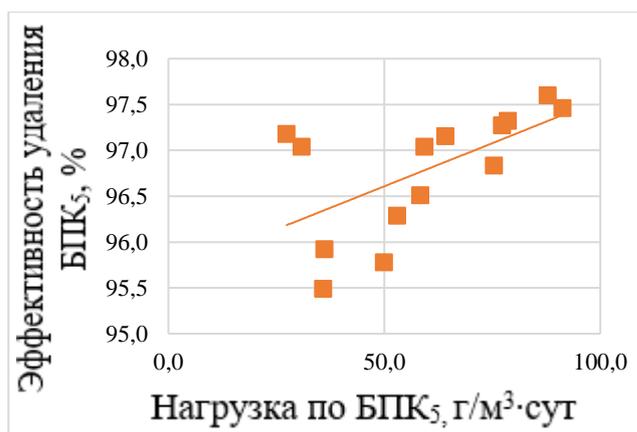


Рисунок 2.80 - Зависимость эффективности снижения БПК₅ от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке

№ 3.1

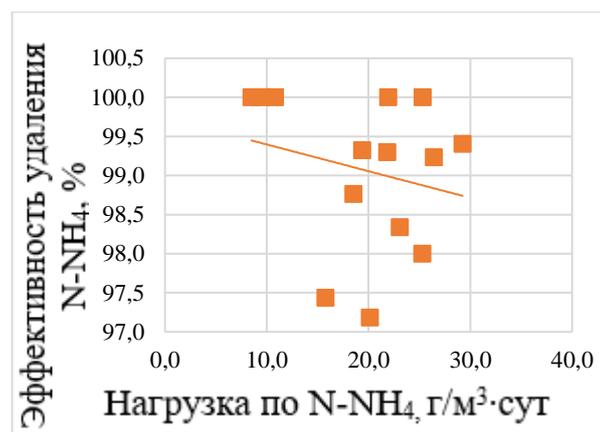


Рисунок 2.81 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH₄

в пилотной установке № 3.1

Для оценки сходимости результатов работы лабораторной модели и полупроизводственной были построены графики окислительной мощности от качественных характеристик поступающей воды. Для сравнения использовалась пилотная установка с идентичным загрузочным материалом – № 2.2-2.

Результаты сравнения окислительной мощности по органическим загрязнениям для пилотных моделей № 2.2-2 и № 3.1 отображены на рис. 2.82.

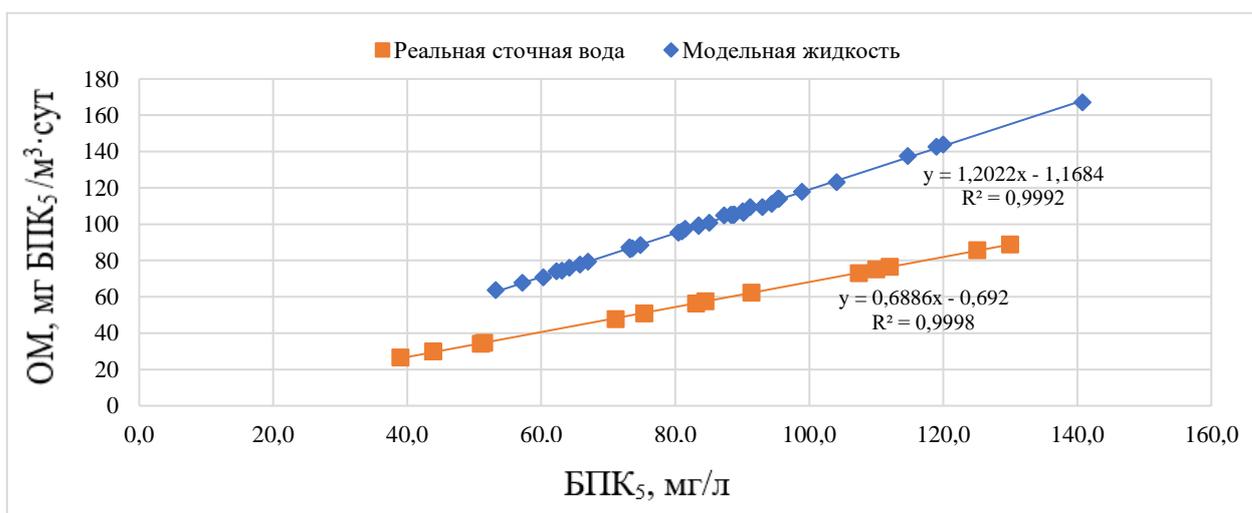


Рисунок 2.82 - Сравнение зависимости окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений для пилотных установок № 2.2-2 и № 3.1

Сравнение по азоту аммонийному отображено на рис. 2.83.

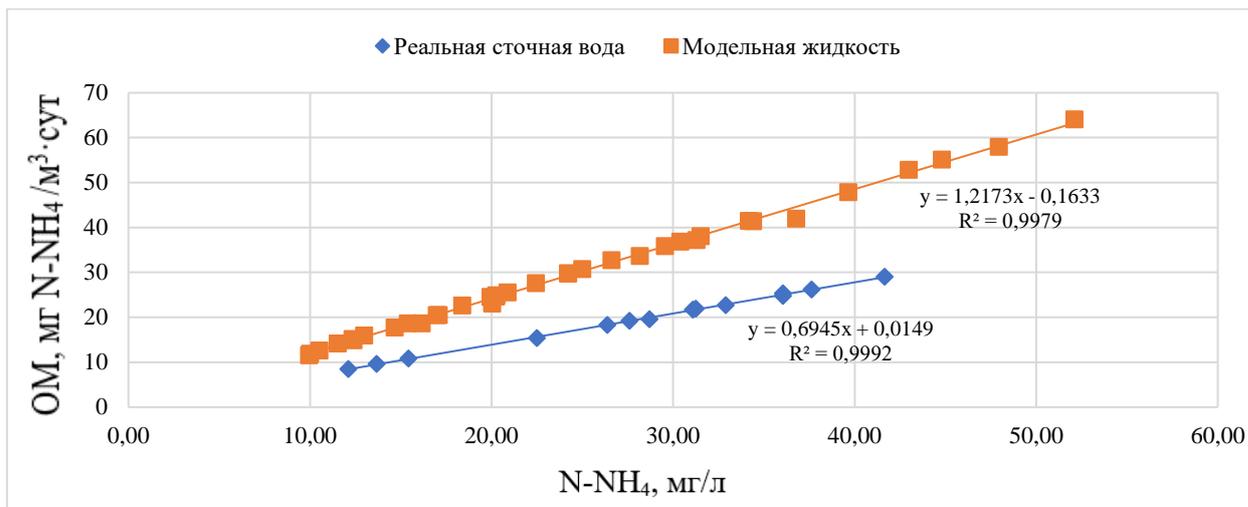


Рисунок 2.83 - Сравнение зависимости окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного для пилотных установок № 2.2-2 и № 3.1

Эксперимент на реальной сточной воде показал идентичные результаты с лабораторными исследованиями на искусственно составленной сточной воде. Зависимости (рис. 2.82, 2.83) описываются линейной функцией, незначительная разница в эффективности удаления обуславливается разной гидравлической нагрузкой и расходом поступающей сточной воды.

Подэтап 3.2

Результаты работы пилотной установки 3.1 показали высокую сходимость с лабораторными исследованиями, было принято решение апробировать на реальной сточной воде модифицированную технологическую схему.



Рисунок 2.84. Полупроизводственная пилотная установка № 3.2.

Вторая полупроизводственная установка 3.2 представлена на рис. 2.85.

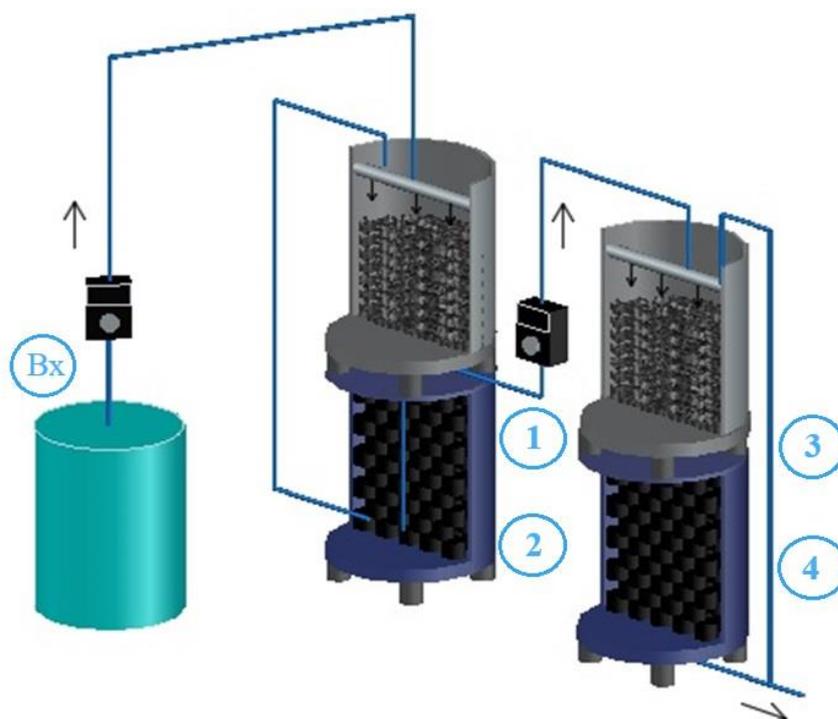


Рисунок 2.85 - Схема нитрификации-денитрификации. Полупроизводственная пилотная установка № 3.2.

Точки отбора проб: Вх – на входе, из бака подаваемой сточной воды; 1 – после первой аэробной зоны; 2 – после первой аноксидной зоны; 3 – после второй аэробной зоны; 4 – после второй аноксидной зоны

Сточная вода собиралась в бак объемом 60 л после первичного отстойника, расположенного на территории очистных сооружений г. Мытищи, далее при помощи насоса-дозатора поступала в распределительную систему и через нее проходила в следующем порядке зоны: аэробная – аноксидная – аэробная – аноксидная. Очищенные сточные воды поступали во вторичный отстойник, расположенный на территории действующих очистных сооружений. Рецикл нитратной воды осуществлялся из аноксидной зоны в аэробную при помощи эрлифтов. В аэробных зонах биофильтрации использовалась загрузка «Трубчатая с полимерной нитью», а в аноксидных – «Пространственная сетка».

Реактор представлял собой цилиндр из пластика объемом 49 л, высота цилиндра составляла 0,51 м, высота загрузочного материала – 0,4 м, диаметр цилиндра – 0,35 м.

Аноксидные условия 2-й и 4-й зоны создавались за счет изолирования кислорода воздуха. Промежуточное отстаивание отсутствовало. Нитратная вода подавалась непосредственно из нижних частей аноксидных зон в аэробные.

Средние значения химических показателей работы пилотной установки № 3.2 представлены в табл. 2.25. В табл. 2.26 представлены технологические показатели работы установки. Посуточные химические показатели приведены на графиках (рис. 2.86–2.91).

Таблица 2.25 - Усредненные химические показатели работы пилотной установки № 3.2

Точки отбора пробы	N-NH ₄	N _{tot}	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄	БПК ₅	Взвешенные вещества
	мг/л						
вход	24,67	51,54	-	-	2,78	80,53	67,96
1	14,44	36,78	1,04	7,81	2,54	39,35	39,03
2	9,00	21,68	0,54	5,42	2,47	18,22	18,38
3	2,54	9,80	0,07	4,54	2,30	5,20	9,69
4	0,13	7,89	0,02	6,75	2,22	2,89	6,58

Таблица 2.26 - Технологические показатели работы пилотной установки № 3.2

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Точка отбора пробы			
			1	2	3	4
1	Эффективность удаления БПК ₅	%	51,14	77,37	93,54	96,41
2	Эффективность удаления N-NH ₄	%	41,47	63,52	89,70	99,47
3	Эффективность удаления взвешенных веществ	%	42,57	72,95	85,74	90,32
4	Количество удаленного БПК ₅	мг/л	41,18	62,31	75,33	77,64
5	Количество удаленного N-NH ₄	мг/л	10,23	15,67	22,13	24,54
6	Нагрузка по БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	48,32			
7	Нагрузка по N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	14,80			
8	ОМ БПК ₅	г/(м ³ ·сут)	24,71	37,39	45,20	46,58
9	ОМ N-NH ₄	г/(м ³ ·сут)	6,14	9,40	13,28	14,72
10	Гидравлическая нагрузка	м ³ /(м ³ ·сут)	0,6			

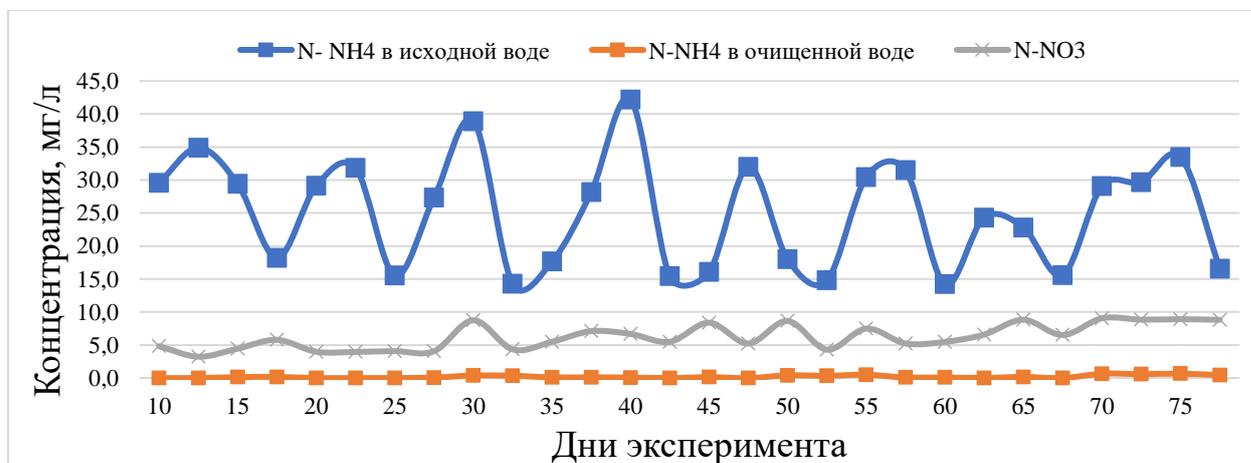


Рисунок 2.86 - Содержание соединений азота в пилотной установке № 3.2

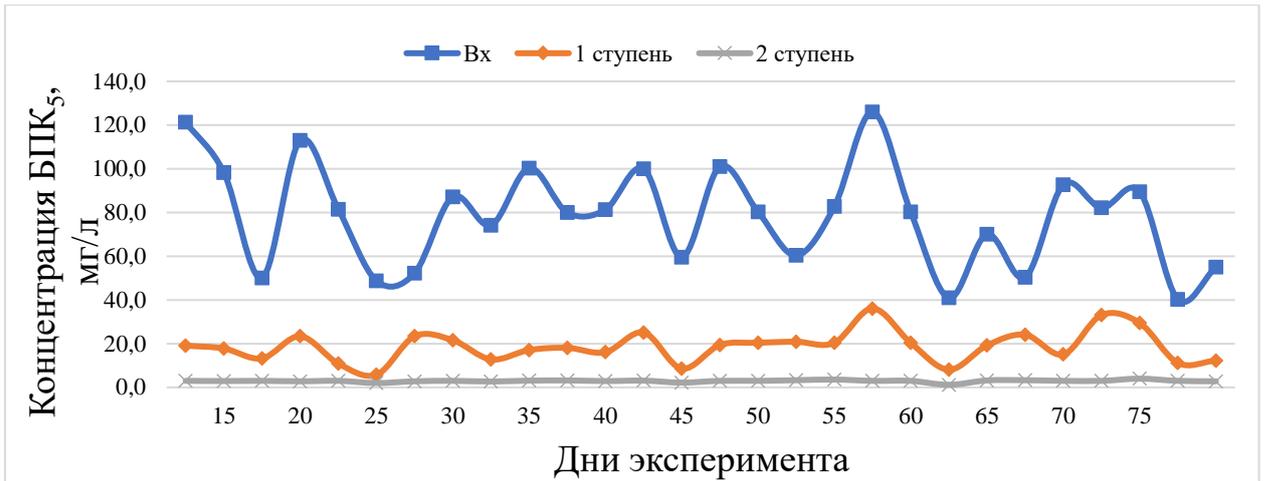


Рисунок 2.87 - Содержание органических загрязнений в пилотной установке № 3.2

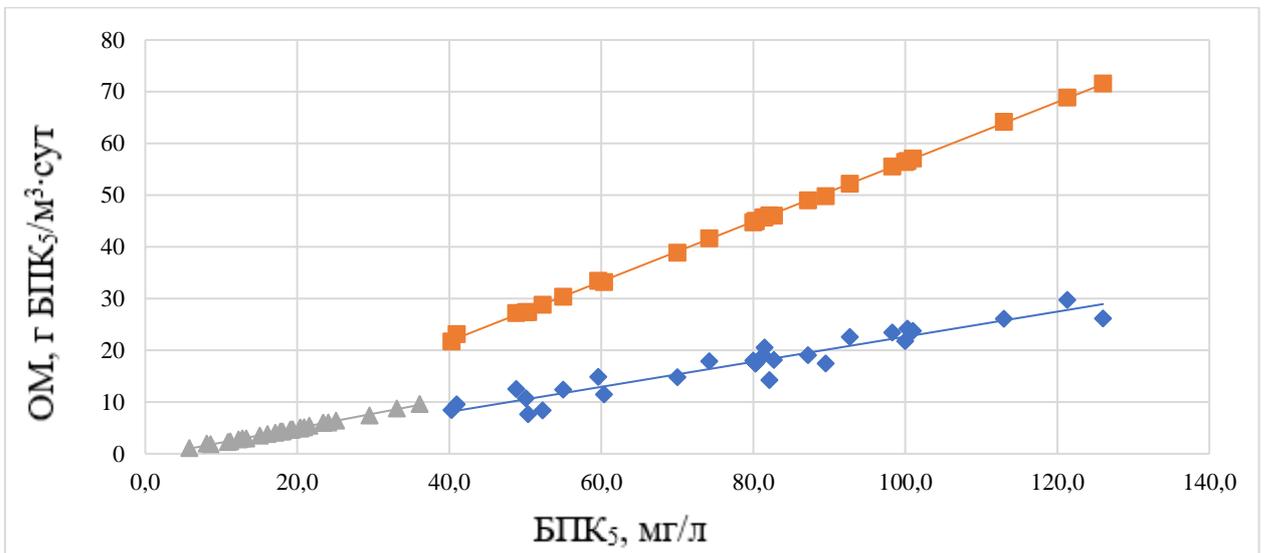


Рисунок 2.88 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 3.2

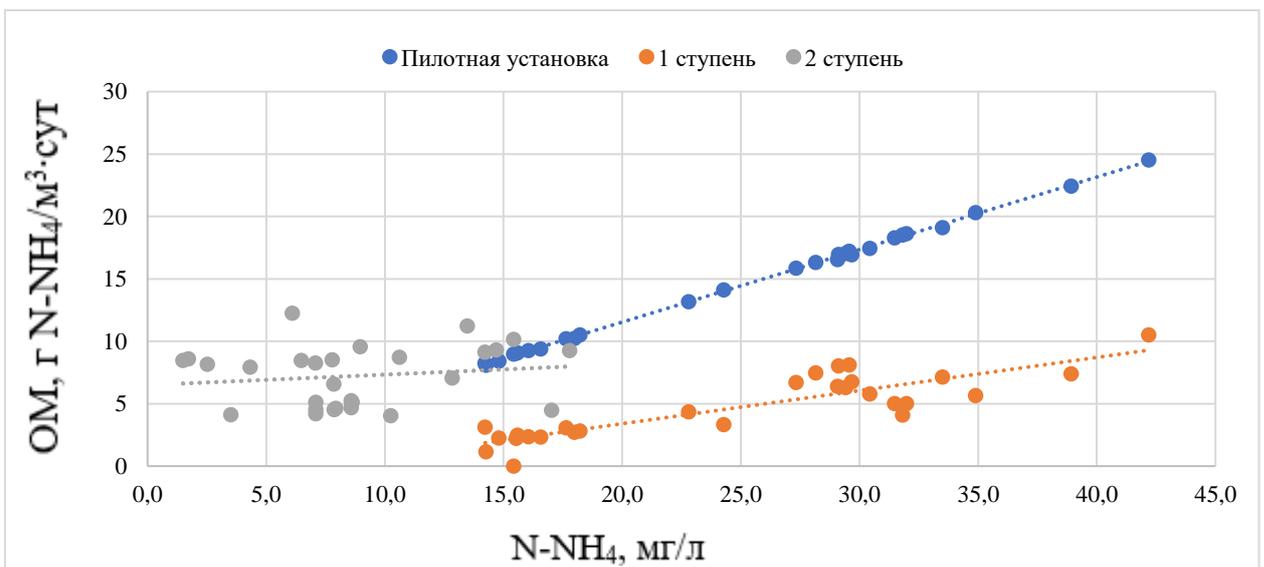


Рисунок 2.89 - Зависимость окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного в пилотной установке № 3.2

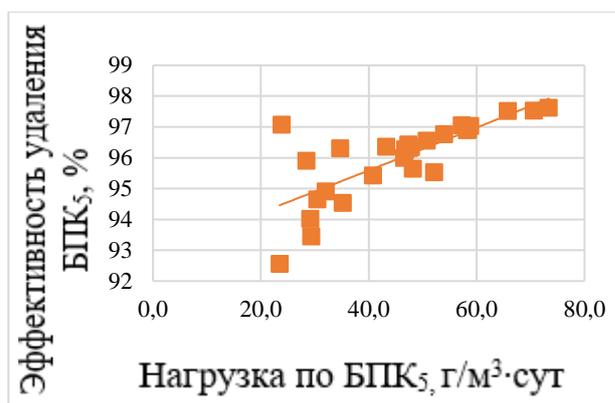


Рисунок 2.90 - Зависимость эффективности снижения БПК₅ от нагрузки по органическим загрязнениям в пилотной установке № 3.1

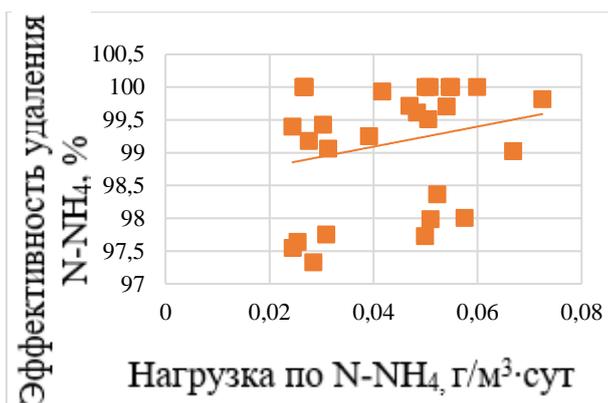


Рисунок 2.91 - Зависимость эффективности снижения азота аммонийного от нагрузки по N-NH₄ в пилотной установке № 3.1

Основным результатом этого этапа является верификация данных, полученных в лабораторных условиях. На всех технологических схемах, работающих в режиме рециркуляции нитратной воды, наблюдается схожая эффективность очистки по соединениям азота. Полученные зависимости коррелируются между собой.

Результаты апробации работы установки, работающей на реальной сточной воде, показывают одновременное проведение процессов денитрификации-нитрификации в зонах биофильтрации, что согласуется с результатами лабораторных исследований.

Глубокое удаление соединений азота наблюдается как в схеме с пре-денитрификацией, так и с пост-денитрификацией.

В то же время промежуточное отстаивание не является обязательным условием для эффективной работы исследуемой технологии.

Выводы по главе 2

1. Применение технологии глубокой очистки сточных вод на биофильтрах с чередующимися аноксидными и аэробными зонами с рециркуляцией нитратной воды позволяет достичь качества очищенной воды до нормативов сброса в водные объекты рыбохозяйственного значения; по азоту аммонийному – до 0,14 мг/л, нитритам – до 0,016 мг/л, нитратам – до 4,66 мг/л, БПК₅ – до 2,16 мг/л при гидравлической нагрузке от 0,6 до 1,23 м³/(м³·сут).
2. Экспериментально доказано, что наличие рециркуляции нитратной воды положительно влияет на структуру биологической пленки – формируется тонкий плотный слой, который, в свою очередь, более эффективен для удаления соединений азота и органических загрязнений.
3. Создание оптимальных условий для эффективной работы прикрепленной биомассы достигается не только за счет создания гидравлического режима, но и за счет «поставки» связанного кислорода непосредственно в биопленку. Таким образом, происходит одновременное проведение процессов денитрификации (в глубине биомассы) и нитрификации (на поверхности биопленки).

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БИОФИЛЬТРОВ

3.1 Обзор существующих методов моделирования и расчета очистки сточной воды на биофильтрах

Теорией расчета биофильтров в нашей стране занимались такие ученые, как С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов, В. П. Саломеев, А. Л. Ивчатов и др.

Кинетика процессов, происходящих в биопленке, и рекомендации детального моделирования описаны М. Хенце и др. [87, 119, 80].

Можно выделить следующие модели:

- расчет биофильтра по окислительной мощности;
- эмпирические модели;
- модель на основании классических законов ферментативной кинетики;
- модели, в основу которых положены уравнения ферментативной кинетики Моно и Михаэлиса-Ментен или их модификации [24].

Как правило, все существующие модели предлагают расчет биофильтров лишь на неполную либо полную биологическую очистку сточных вод.

Особенностью биофильтров является тот факт, что основной интерес к ним, а значит, и проектирование, и расчет приходится на 1960–1970 гг. Так, расчет по окислительной мощности предлагал (через критериальный комплекс) С. В. Яковлев [94], расчет биофильтров с плоскостным загрузочным материалом по критериальному комплексу предложил Ю. В. Воронов [11, 12, 14, 94], А.Л. Ивчатовым предложена математическая модель, в основе которой лежит зависимость эффективности очистки от нагрузок по органическим загрязнениям. А. Л. Ивчатов предлагает матмодель, прежде всего учитывающую температуру сточных вод [25].

Из современных исследований можно выделить анализ различных методов О. В. Мосина в статье «Расчет и проектирование биологических

фильтров» [42]. Автор статьи отмечает, что эффективность работы биофильтров зависит в основном от гидравлической нагрузки и объема воздуха, поступающего в тело биофильтра.

Согласно суждениям В. В. Кирсанова, методика расчета биофильтров основана на стабильных нагрузках загрязняющих веществ. Автор вводит в методику коэффициент равномерности нагрузок по ХПК для учета колебания нагрузок [28].

О. Х. Амиров решает задачу расчета всех сооружений с прикрепленной биомассой на базе дифференциального уравнения процесса очистки. Для расчета объема загрузки биофильтров с объемной загрузкой автор приводит зависимость, учитывающую максимальную допустимую нагрузку на биофильтр, характеристику поступающей сточной воды по БПК и степень необходимой очистки. Модель применяется для всех типов орошаемых биофильтров с объемной загрузкой [2].

Вопросам моделирования процессов, происходящих в биофильтрах, посвящены работы А. Я. Олейника и О. А. Колпаковой [50, 51].

В [49] реализована математическая модель утилизации субстрата микроорганизмами биопленки для сферической и цилиндрической загрузки фильтра с учетом пористости загрузочного материала.

Существующие методики расчета размеров биофильтра учитывают такие факторы, как температура сточной жидкости, гидравлические характеристики, свойства загрузочного материала и другое, наиболее важными факторами представляются гидравлические характеристики биофильтра, прежде всего обусловленные структурой загрузочного материала.

Также следует отметить, что все методики рассчитаны лишь на удаление органических загрязнений, в отличие от других биореакторов биологической очистки. Отсутствие методик расчета биофильтров для их работы в режиме

глубокой очистки делает весьма затруднительным их реконструкцию и новое строительство.

3.2 Математическое моделирование биофильтров

Математическая модель технологической схемы глубокой очистки сточных вод от соединений азота с использованием биологических фильтров предназначена для теоретического исследования применения технологии очистки сточных вод в масштабах городских канализационных сооружений.

Расчет биологических фильтров, работающих в режиме денитрификации-нитрификации, состоит из двух частей: рассчитываются объемы анаэробной и аэробной зон. Расчет аэробной зоны предложен для загрузочного материала цилиндрической формы.

Для моделирования процессов биофильтрации прежде всего следует определить тип образующейся биопленки.

Протекающие в плотных биопленках процессы описываются кинетическими уравнениями [87].

Для начала рассмотрим распределение концентрации загрязнений в биопленке (рис. 3.1).

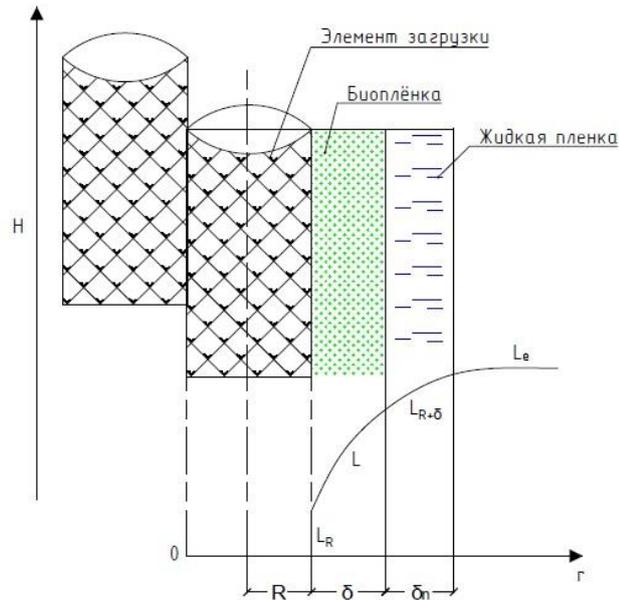


Рисунок 3.1 - Распределение концентрации загрязнений:

R – радиус загрузочного элемента, м; L , L_e – загрязнение в поступающей и очищенной сточной воде, мг/л; δ , δ_n – толщина биопленки, мкм, H – высота биофильтра, м

Для исследуемого загрузочного материала «Пространственная сетка» верно учитывать не пористость, а поверхность соприкосновения загрузочного материала с водой, принимая, что биопленка обрастает равномерно по той длине пути, что проходит каждая капля.

Таким образом, с учетом анализа образовавшейся в ходе эксперимента биопленки математическая модель удаления органических загрязнений и азота аммонийного в биофильтрах будет состоять из уравнений материального баланса.

Нестационарное уравнение материального баланса массы субстрата для относительно неограниченного участка тонкого активного слоя биопленки для загрузочного материала цилиндрической формы:

$$D_L \left(\frac{\partial^2 L}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial L}{\partial r} \right) - R_L = \frac{\partial L}{\partial t}, \quad (3.1)$$

где:

t – время, час;

r – радиальная координата;

D_L – коэффициент молекулярной диффузии субстрата в биопленке, $\text{м}^2/\text{час}$;

R_L – скорость кинетической реакции утилизации субстрата, $\frac{\text{г}}{\text{м}^3 \cdot \text{час}}$.

Модель скорости реакции R_L при полном отсутствии ингибирующего процесса биоокисления описывается известным уравнением Моно:

$$R_L = \rho = \frac{\rho_T}{K_T + L}, \quad \rho_T = \frac{\mu_T X}{Y}. \quad (3.2)$$

Примем, что

$$R_L = K_1 \cdot L, \quad (3.3)$$

где:

$K_1 = \frac{\rho_T}{K_T}$, а $\rho_T = \frac{\mu_T X}{Y}$ (реакция 1-го порядка);

$Y = \frac{dX}{dL}$ – коэффициент трансформации субстрата в биомассу микроорганизмов;

X – концентрация активной биомассы микроорганизмов внутри биопленки;

ρ_T – скорость окисления, $\text{мг}/\text{гбв} \cdot \text{ч}$;

K_T – константа полунасыщения, $\text{мг N-NO}_3/\text{л}$;

μ_T – максимальная удельная скорость роста микроорганизмов, сут^{-1} .

Граничные условия:

1. На поверхности раздела ($r = R + \delta$) поток в биопленку равен притоку к ней через пограничный слой:

$$D_L = \left. \frac{dL}{dr} \right|_{r=R+\delta} = K_L(L_e - L)|_{r=R+\delta}, \quad (3.4)$$

где K_L – коэффициент массопереноса субстрата в жидкой пленке.

2. Поток равен нулю:

$$D_L = \left. \frac{dL}{dr} \right|_{r=R} = 0. \quad (3.5)$$

Решаем уравнение (3.1), считая, что концентрация L не зависит от времени, то есть $\frac{\partial L}{\partial t} = 0$, тогда:

$$D_L \cdot \left(\frac{d^2 L}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dL}{dr} \right) - k_1 L = 0. \quad (3.6)$$

Пусть $\frac{k_1}{D_L} = k$:

$$\left(\frac{d^2 L}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dL}{dr} \right) - k_1 L = 0. \quad (3.7)$$

(3.7) принимает вид:

$$L = C_1 I_0(\sqrt{k} r) + C_2 K_0(\sqrt{k} r), \quad (3.8)$$

где:

C_1, C_2 – произвольные постоянные;

$I_0(\sqrt{k} r), K_0(\sqrt{k} r)$ – модифицированные функции Бесселя нулевого порядка.

Используя граничные условия, найдем C_1 и C_2 , зная $I_0'(x) = I_1(x); K_0'(x) = -K_1(x)$, перейдем к безграничным величинам, обозначив $\bar{k} = k \cdot R^2, \bar{r} = \frac{r}{R}$.

$$\text{Из (3.8)} \left. \frac{dL}{dr} \right|_{r=R} = C_1 \sqrt{k} I_1(\sqrt{k} r) - C_2 \sqrt{k} K_1(\sqrt{k} r) \Big|_{r=R} = 0.$$

Так как $\bar{r} = \frac{r}{R}$, то при $r=R$ $\bar{r}=1$.

Из (3.8):

$$C_1 I_1(\sqrt{k} r) - C_2 K_1(\sqrt{k} r) \Big|_{r=R} = 0,$$

в безразмерных величинах:

$$C_1 I_1(\sqrt{k} \bar{r}) - C_2 K_1(\sqrt{k} \bar{r}) \Big|_{\bar{r}=1} = 0,$$

то есть:

$$C_1 I_1(\sqrt{k}) - C_2 K_1(\sqrt{k}) = 0,$$

отсюда:

$$C_1 = C_2 \frac{K_1(\sqrt{k})}{I_1(\sqrt{k})}.$$

Подставим их в общее решение, получим:

$$L = C_2 \frac{K_1(\sqrt{k})}{I_1(\sqrt{k})} \cdot I_0(\sqrt{k} r) + C_2 K_0(\sqrt{k} \bar{r}).$$

При $(r = R + \delta) \rightarrow \bar{r} = 1 + \bar{\delta}$

$$C_1 \sqrt{\bar{k}} I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) - C_2 K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) = \alpha L_e - \alpha [C_1 I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + C_2 K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right)]$$

$$C_1 \sqrt{\bar{k}} I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) - C_2 K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha C_1 I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha C_2 K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) = \alpha L_e.$$

Подставим C_1 :

$$C_2 \sqrt{\bar{k}} \frac{K_1(\sqrt{\bar{k}})}{I_1(\sqrt{\bar{k}})} \cdot I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + C_2 \sqrt{\bar{k}} K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha C_2 \frac{K_1(\sqrt{\bar{k}})}{I_1(\sqrt{\bar{k}})} \cdot I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha C_2 K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) = \alpha L_e.$$

Умножим на $I_1(\sqrt{\bar{k}})$:

$$C_2 \{ \sqrt{\bar{k}} K_1(\sqrt{\bar{k}}) I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) - \sqrt{\bar{k}} I_1(\sqrt{\bar{k}}) K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha K_1(\sqrt{\bar{k}}) I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) I_1(\sqrt{\bar{k}}) \} = \alpha I_1(\sqrt{\bar{k}}) L_e;$$

$$C_2 \{ \sqrt{\bar{k}} [K_1(\sqrt{\bar{k}}) I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) - I_1(\sqrt{\bar{k}}) K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha [K_1(\sqrt{\bar{k}}) I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) I_1(\sqrt{\bar{k}})]] \} = \alpha I_1(\sqrt{\bar{k}}) L_e;$$

$$C_2 = \frac{\alpha I_1(\sqrt{\bar{k}}) L_e}{\{ \sqrt{\bar{k}} [K_1(\sqrt{\bar{k}}) I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) - I_1(\sqrt{\bar{k}}) K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha [K_1(\sqrt{\bar{k}}) I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) I_1(\sqrt{\bar{k}})]] \}}$$

$$C_1 = C_2 \frac{K_1(\sqrt{\bar{k}})}{I_1(\sqrt{\bar{k}})};$$

$$C_2 = \frac{\alpha I_1(\sqrt{\bar{k}}) L_e}{\{ \sqrt{\bar{k}} [K_1(\sqrt{\bar{k}}) I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) - I_1(\sqrt{\bar{k}}) K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + \alpha [K_1(\sqrt{\bar{k}}) I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) + K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) I_1(\sqrt{\bar{k}})]] \}}.$$

Тогда:

$$\bar{L}(\bar{r}) = \alpha \frac{K_1(\sqrt{\bar{k}}) \cdot I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} \cdot (\bar{r}) + I_1(\sqrt{\bar{k}}) K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} \cdot \bar{r} \right) \right)}{I_1(\sqrt{\bar{k}}) \left[\alpha K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) - \sqrt{\bar{k}} K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) \right) \right] + K_1(\sqrt{\bar{k}}) \left[\alpha I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) - \sqrt{\bar{k}} I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) \right) \right]}; \quad (3.9)$$

$$A = \frac{L_{/R+\delta}}{L_1} = \alpha \frac{K_1(\sqrt{\bar{k}}) \cdot I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} \cdot (\bar{\delta}) + I_1(\sqrt{\bar{k}}) K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} \cdot \bar{\delta} \right) \right)}{I_1(\sqrt{\bar{k}}) \left[\alpha K_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) - \sqrt{\bar{k}} K_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) \right) \right] + K_1(\sqrt{\bar{k}}) \left[\alpha I_0 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) - \sqrt{\bar{k}} I_1 \left(\sqrt{\bar{k}} (1 + \bar{\delta}) \right) \right) \right]}; \quad (3.10)$$

где:

$\bar{L}(\bar{r})$ – получено решением уравнения (3.1) с заданными граничными условиями;

A – значение концентрации на внешней поверхности биопленки.

Для определения высоты фильтра:

$$V \frac{dL_1}{dz} + \frac{F_\delta}{F} K_\alpha (L_1 - L)_{/r=R+\delta} = 0. \quad (3.11)$$

Начальное условие:

$$L_1(0) = L_0 \quad (3.12)$$

– содержание субстрата (концентрация) во входном потоке, поступающем на поверхность фильтра (при $z = 0$).

В (3.11):

v – скорость фильтрации, м/ч;

F – площадь поперечного сечения сооружения;

F_δ – площадь поверхности биопленки на единицу высоты биофильтра;

K_α – коэффициент массопереноса субстрата в жидкой пленке.

В формуле (3.11):

$L_e|_{r=R+\delta} = L_e$ в объеме фильтра;

$L|_{r=R+\delta} = A \cdot L_e$ из формулы (3.10).

Решаем дифференциальное уравнение (3.11) с начальным условием (3.12):

$$\left(\frac{dL_e}{dz} + \frac{F_\delta K_L}{F V} \right) \cdot L_e (1 - A)$$

$$\frac{dL_e}{dz} = - \frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1 - A) \cdot L_e$$

$$\frac{dL_e}{dz} = - \frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1 - A) \cdot dz$$

, интегрируем:

$$\int \frac{dL_e}{L_e} = - \frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1 - A) \int dz$$

$$\ln |L_e| = - \frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1 - A) \cdot z + \ln |C|$$

$$\ln \left| \frac{L_e}{C} \right| = -\frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1 - A) \cdot z$$

$$\frac{L_e}{C} = e^{-\frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1-A) \cdot z}$$

$$L_e = C e^{-\frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1-A) \cdot z}$$

Из начального условия $L_e(0) = L_0$ найдем C :

$$L_0 = e^0, \text{ то есть } C = L_0.$$

В результате получаем:

$$L_e = L_0 e^{-\frac{F_\delta \cdot K_L}{F \cdot v} (1-A) \cdot z}. \quad (3.13)$$

На выходе из биофильтра концентрация $L_e = L_H$, получаем:

$$L_H = L_0 e^{-\frac{F_\delta \cdot K_L}{F \cdot v} (1-A) \cdot H}.$$

Найдем отсюда H :

$$\begin{aligned} e^{-\frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1-A) \cdot H} &= \frac{L_H}{L_0} \\ -\frac{F_\delta K_L}{F V} \cdot (1 - A) \cdot H &= \ln \frac{L_H}{L_0} \\ H &= -\frac{F \cdot v}{F_\delta \cdot K_L (1 - A)} \cdot \ln \frac{L_H}{L_0} \end{aligned}$$

Но так как $\ln \frac{L_H}{L_0} = -\ln \frac{L_0}{L_H}$, то:

$$H = \frac{F \cdot v}{F_\delta \cdot K_L (1 - A)} \cdot \ln \frac{L_0}{L_H}. \quad (3.14)$$

Для определения скорости V в формуле (3.14) для исследуемых загрузок уже были получены зависимости времени пребывания от гидравлической нагрузки, скорости движения сточной воды. Для гидравлической нагрузки, используемой в пилотной установке № 2.2-1, скорость фильтрования в частном случае составит 0,9 м/час.

На практике в ходе выполнения расчетов по проектированию биофильтров с тем или иным типом загрузочного материала, как правило, наибольшие трудности связаны с определением корректного значения величины F_{δ} , которая зависит от геометрии материала, величины смоченной поверхности внутри материала, пористости и ряда других параметров. Для выполнения инженерных расчетов в первом приближении величину F_{δ} можно представить в виде соотношения (3.15).

$$F_{\delta} = \frac{f_s \cdot W}{H}. \quad (3.15)$$

В формуле (3.15):

W – объем биофильтра;

f_s – удельная площадь поверхности загрузочного материала с учетом особенностей иммобилизации биомассы, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Тогда высоту реактора для единичной площади удобно представить в виде (3.16).

$$H = \sqrt{\frac{v}{F_{\delta} \cdot K_L(1-A)} \ln \frac{L_0}{L_H}}. \quad (3.16)$$

В полученную формулу (3.16) для расчета высоты зон нитрификации следует ввести площадь сооружения с учетом удельной площади загрузочного материала, химические показатели поступающей воды по БПК₅ или N-NH₄, а также требуемые значения очищенной воды по этим показателям.

В зависимости от выбранной технологической схемы полученную высоту по формуле (3.16) следует делить на количество зон нитрификации.

Для расчета зон денитрификации следует воспользоваться полученными значениями скорости удаления нитратов и временем пребывания воды в зоне денитрификации.

Прежде всего следует выбрать технологическую схему и загрузочный материал, далее, используя время, необходимое для денитрификации, вычисленное эмпирически (прошедшее от возникновения максимальной

концентрации нитратов до их удаления до нормативов сброса в водные объекты рыбохозяйственного назначения), производим расчет количества загрузочного материала. Время пребывания, как правило, характеризуется высотой сооружения, а площадь поверхности следует вычислить, используя гидравлическую нагрузку, применяемую в эксперименте, путем увеличения площади поверхности до необходимой гидравлической нагрузки.

Зная время контакта (из экспериментальных данных), необходимое для проведения процесса денитрификации, высоту H_d , м можно выразить:

$$H_d = \frac{q^\zeta \cdot t_d}{\varepsilon}, \quad (3.17)$$

где:

t_d – время, ч, необходимое для проведения денитрификации, определенное экспериментально;

q – гидравлическая нагрузка, $\text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$;

ε и ζ – константы, определенные эмпирически.

Площадь поверхности следует определять, также аппроксимируя результаты эксперимента:

$$F_d = k \cdot Q, \quad (3.18)$$

где:

F_d – площадь поверхности зоны денитрификации биофильтра, м^2 ;

k – коэффициент, вычисленный как отношение расхода воды, поступающей в пилотную установку, к гидравлической нагрузке, обеспечивающей эффективную очистку сточных вод, равный 0,4–0,5 $\text{м}^2/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$;

Q – расход сточных вод, $\text{м}^3/\text{сут}$.

Разработанная математическая модель верна для температурных условий, в которых проводился эксперимент. Как правило, биофильтры располагаются в зданиях, тогда применение такой модели обоснованно.

Поскольку основная часть построенных в прошлом веке биофильтров была запроектирована на неполную либо полную биологическую очистку,

учет влияния температуры на окислительные процессы не всегда проводился, ведь влияние в таком случае незначительно. Однако при моделировании биофильтрационного реактора, рассчитанного на глубокую очистку воды, несомненно, следует учитывать эффект влияния температуры на биохимические процессы, проходящие в реакторе. Для адаптации полученной математической модели к другим температурным условиям целесообразно использовать температурную поправку.

Для оценки влияния температуры на скорость биохимических реакций, как правило, используют модифицированное уравнение Аррениуса:

$$K_T = K_{20} \cdot \theta^{T-20}, \quad (3.19)$$

где:

K_{20} – константа скорости биохимических процессов в сточной воде при температуре 20 °С;

θ – температурный коэффициент, определяющийся экспериментально;

T – температура сточной жидкости, °С.

В качестве преимущества предлагаемого подхода к математическому моделированию предлагается рассматривать следующие факторы:

- возможность включения в расчет морфологических характеристик загрузочного материала;
- возможность использования результатов лабораторных исследований по определению времени контакта в биофильтре;
- возможность автоматизации инженерных расчетов с использованием разработанной автором программы, интерфейс которой представлен в приложении А.

В разработанной математической модели ручному расчету не подлежат функции Бесселя, влияющие на определение параметра А. Для облегчения расчета представляется возможным графически представить зависимости параметра А для различных входных параметров либо использовать разработанную автором программу для ЭВМ.

Разработанная программа решает две задачи – прямую (расчет размеров сооружений) и обратную (определение потенциального расхода воды, которая подлежит очистке при заданных объемах сооружения). Руководство пользователя и интерфейс представлены в приложении А.

Алгоритм разработанной программы представлен на рис. 3.2.

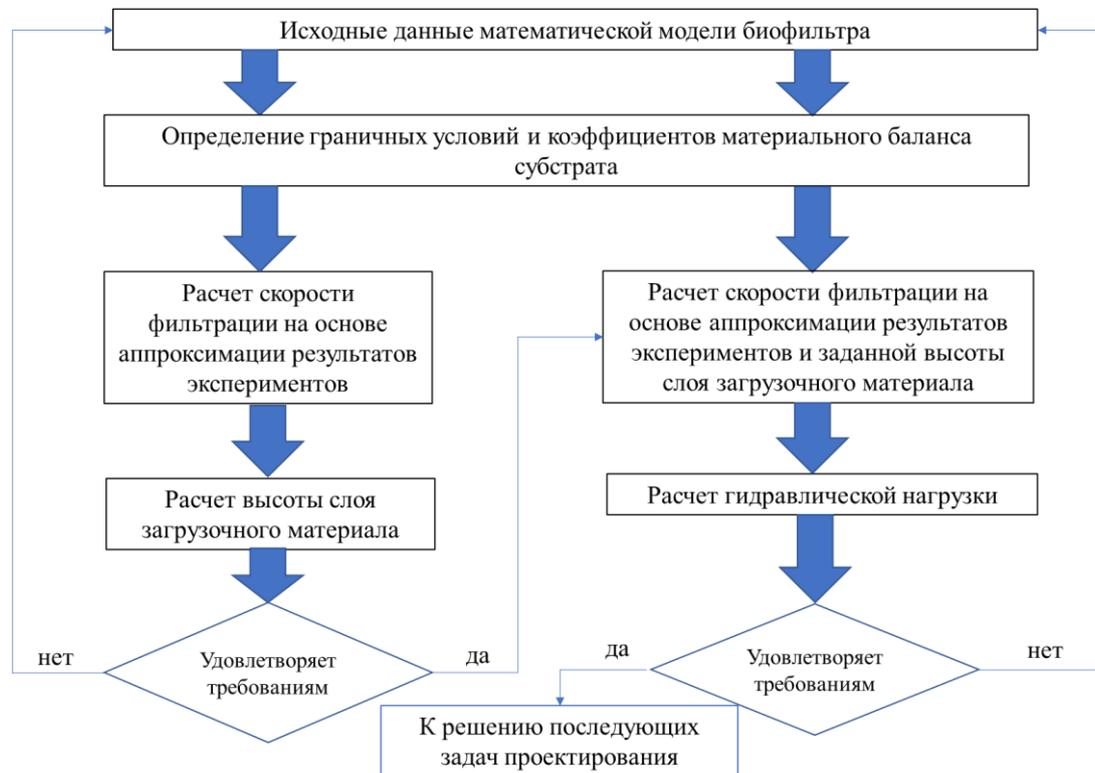


Рисунок 3.2 - Алгоритм разработанной программы для прямой и обратной задачи

3.3 Верификация разработанной математической модели

Предложенная математическая модель состоит из двух частей – расчета размеров зон нитрификации и зон денитрификации. Расчет размеров зон денитрификации полностью основан на эмпирически полученных данных, поэтому для верификации выбран расчет зоны нитрификации по формуле (3.16).

Для верификации математической модели и результатов работы пилотных установок проведен сравнительный расчет, результаты которого

представлены в табл. 3.1. Для расчета взяты значения N-NH₄ на входе и выходе из пилотной установки.

Таблица 3.1- Сравнение экспериментальных и рассчитанных значений

№	L ₀	L _н	q	Fδ	H _э	H _р
	мг/л	мг/л	м ³ /(м ³ ·сут)	м ²	м	м
1.2-1	23,09	12,09	2,52	45	1	1,08
2.2-1	23,08	0,63	1,23	45	2	2,54
3.2	24,67	0,13	0,6	150	1	1,46

В табл. 3.1 H_э – высота зон нитрификации в пилотной установке, а H_р – расчетная.

Результаты расчета высоты зоны нитрификации с использованием разработанной математической модели оказываются близкими к высоте экспериментальной установки. Возможные причины расхождения результатов расчета высоты рабочей зоны сооружения с использованием разработанной математической модели связаны со следующими факторами: в математической модели не учитывается нитрификация, происходящая в аноксидных зонах, для определения пределов применимости разработанной математической модели необходима дополнительная серия экспериментов.

В целом, судя по результатам верификации, разработанная математическая модель позволяет получать надежный результат для использования в проектировании сооружений.

Выводы по главе 3

1. Разработана математическая модель биофильтра, учитывающая скорость фильтрования, тип загрузочного материала, площадь контакта воды с биопленкой, температуру сточных вод и время пребывания очищаемой воды в реакторе.
2. Разработан автоматизированный расчет, который позволяет моделировать биофильтры как для нового строительства, так и для реконструкции существующих сооружений.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА БИОФИЛЬТРАХ

4.1 Рекомендации по реконструкции очистных сооружений

г. Мытищи

В 60–70 гг. прошлого века значительное количество биофильтров строились в Московской области. Город Мытищи расположен по обе стороны от Ярославского шоссе, в городе несколько очистных сооружений. Канализационные очистные сооружения малой производительности располагаются в Московской области, в г. Мытищи, в 3 км от МКАД. Очистные сооружения принимают сточные воды в основном близлежащих дачных поселений.

Построенные очистные сооружения предназначены для очистки бытовых сточных вод, производительность – 2400 м³/сут.

В связи с длительной эксплуатацией (проект не сохранился, но некоторые здания построены еще в 1920 г.) очистные сооружения не обеспечивают эффективной очистки, да и попросту морально устарели.

Очистные сооружения располагаются в здании и включают в себя механическую очистку: решетки, совмещенные с песколовками, первичный вертикальный отстойник, биофильтры и вторичный вертикальный отстойник.

Исходные данные:

- сооружения биофильтров – 2 шт. (1 раб., 1 рез.);
- внутренние габариты биофильтра (Д×Ш×В) – 5800×5800×4600 мм;
- загрузочный материал – гравий;
- высота загрузочного слоя – 2500 мм;
- объем загрузочного материала одного биофильтра – 79 м³;
- расход сточных вод – 2400 м³/сут.

На рис. 4.1 представлена технологическая схема существующих очистных сооружений.

Технологическая схема до реконструкции

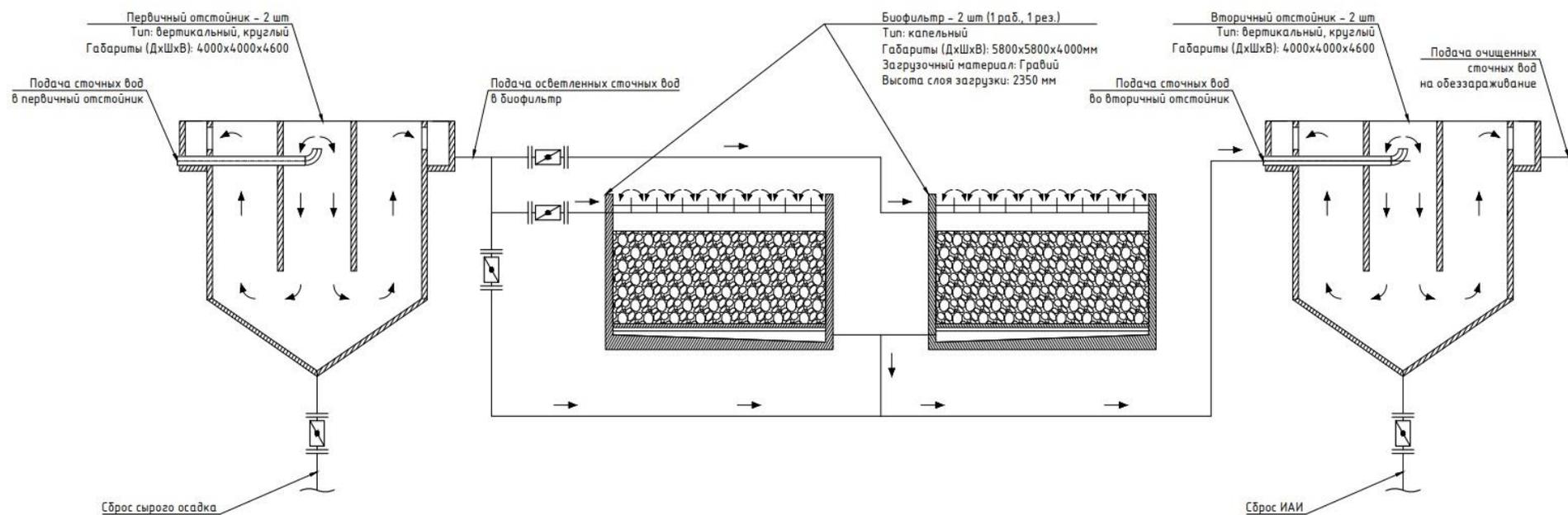


Рисунок 4.1 - Схема существующих очистных сооружений

Традиционные методы расчета биофильтров основаны на использовании критериального комплекса и ориентированы на удаление органических загрязнений. Поскольку существующие сооружения обеспечивают на выходе лишь БПК₅ – 30 мг/л, первой задачей для достижения показателя БПК₅ в сточной воде после биофильтров, удовлетворяющего требованиям нормативов ПДК вредных веществ в водоемах рыбохозяйственного значения, является проведение поверочного расчета существующего биофильтра по новым требованиям.

На основании анализа химических показателей поступающей сточной воды за 3 года следует принять БПК₅ – 138 мгО₂/л. Для обеспечения ПДК для сброса в водные объекты рыбохозяйственного назначения после биологической очистки БПК₅ должен составлять 2,1 мгО₂/л.

Начало поверочного расчета начинается с определения нужного нам критериального комплекса η [14, 20].

Согласно предложенному расчету по критериальному комплексу, показатель БПК₅ после биологической очистки на биофильтрах заканчивается на 10 мгО₂/л. Так как нам требуется показатель в 2,1 мгО₂/л, требуется прибегнуть к аппроксимации функции одной переменной. Для этого требуется использовать метод логарифмической регрессии. Результаты расчета представлены в табл. 4.1. Для нахождения критериального комплекса была выведена формула, по которой в дальнейшем и проводились расчеты:

$$\eta = 6,1114 - 1,2691 \ln L_t \quad (4.1)$$

Средняя ошибка аппроксимации составила 2,2 %.

Таблица 4.1 - Результаты расчета аппроксимации функции одной переменной методом логарифмической регрессии

L _t , мг/л	2,1	5	10	15	20	25	30	35	40
η	5,17	4,07	3,3	2,6	2,25	2	1,75	1,6	1,45

Далее произведем расчет константы скорости биохимического потребления кислорода по формуле (4.2), которая зависит от среднезимней температуры. Так как сооружения размещены в отапливаемом помещении, то среднезимняя температура сточных вод составляет $T = 14 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$K_m = 0,2 \cdot 1,047^{T-20}; \quad (4.2)$$

$$K_m = 0,2 \cdot 1,047^{14-20} = 0,1518.$$

Далее найдем нагрузку по БПК₅ по формуле (4.3):

$$F = \frac{P \cdot H \cdot K_m}{\eta}, \quad \text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}), \quad (4.3)$$

где:

P – пористость существующей загрузки; $P = 30 \text{ } \%$;

H – высота загрузочного слоя, м; $H = 2,35 \text{ м}$.

$$F = \frac{30 \cdot 2,35 \cdot 0,1518}{5,17} = 2,07 \quad \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}).$$

Получив данные по нагрузке по БПК₅, можно определить гидравлическую нагрузку на биофильтр по формуле (4.4):

$$q = \frac{F \cdot S_{уд}}{L_{ен}}, \quad \text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}) \quad (4.4)$$

где:

$S_{уд}$ – удельная поверхность загрузочного слоя, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $S_{уд} = 140 \text{ м}^2/\text{м}^3$;

$L_{ен}$ – концентрация БПК₅ в сточной воде, поступающей на биофильтры;
 $L_{ен} = 138 \text{ мгО}_2/\text{л}$.

$$q = \frac{2,07 \cdot 140}{138} = 2,1 \quad \text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}).$$

Зная гидравлическую нагрузку на биофильтр и объем загрузочного материала, можно определить максимальную производительность биофильтра в сутки по формуле (4.5):

$$Q = q \cdot V, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (4.5)$$

где V – объем загрузочного материала, м^3 ; $V = 79 \text{ м}^3$.

$$Q = 2,1 \cdot 79 = 166,05 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Исходя из полученных результатов поверочного расчета, производительности существующего биофильтра под новые требования очистки недостаточно.

Так как требуемая производительность очистных сооружений составляет 2400 м³/сут, то было предложено рассмотреть два варианта решения поставленной задачи: первый вариант – модернизация существующих биофильтров капельного типа с разделением слоев загрузки на зоны нитрификации-денитрификации; второй вариант – строительство аэротенков, работающих в режиме зоны нитрификации-денитрификации.

Для оценки капитальных затрат и потенциальной возможности реконструкции существующих биофильтров нужно произвести расчет сооружений. Прежде всего определим программу модернизации.

В программу модернизации существующих биофильтров входят следующие задачи:

- 1) полностью удалить гравийную загрузку из биофильтров;
- 2) произвести загрузку биофильтра новым материалом – «Пространственная сетка»;
- 3) увеличить высоту загрузочного слоя до 3 м (в связи с тем, что новый загрузочный материал значительно легче ранее загруженного щебня);
- 4) произвести зональное разделение внутри корпусов биофильтров на зоны денитрификации-нитрификации;
- 5) увеличить время полного цикла работы биофильтров посредством изменения гидравлической схемы (до модернизации поток сточных вод поступал параллельно на оба биофильтра, после модернизации поток сточных вод поступает последовательно на биофильтры, тем самым создавая схему очистки сточных вод денитри-нитри-денитри-

нитри). Отношение зоны нитрификации к общему слою загрузки – 2/3;

Исходные данные для расчета:

- сооружения биофильтров: 2 шт. (оба рабочие, подключение – последовательное, подача сточных вод сверху вниз);
- внутренние габариты биофильтра (Д×Ш×В): 5800×5800×4600 мм;
- площадь поверхности биофильтра: 33,64 м²;
- высота загрузочного слоя: 3000 мм;
- загрузочный материал: «Пространственная сетка» пористостью 90 %, удельной поверхностью загрузочного слоя 250 м²/м³;
- объем загрузочного материала одного биофильтра: 100,92 м³;
- общий объем загрузочного материала: 201,84 м³.

Произведем расчет нагрузки по БПК₅ по формуле (4.6):

$$F = \frac{N \cdot P \cdot H \cdot K_m}{\eta}, \quad \text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}), \quad (4.6)$$

где N – количество биофильтров, подключенных последовательно, шт.; $N = 2$ шт.; $H = 3$ м, $P = 90$ %.

$$F = \frac{2 \cdot 90 \cdot 3 \cdot 0,1518}{5,17} = 15,858 \quad \text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}).$$

Получив данные по нагрузке по БПК₅, можно определить гидравлическую нагрузку на биофильтр по формуле 4.4:

$$S_{\text{уд}} = 250 \text{ м}^2/\text{м}^3; L_{\text{ен}} = 138 \text{ мгО}_2/\text{л}.$$

$$q = \frac{15,858 \cdot 250}{138} = 28,729 \quad \text{м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут}).$$

Зная гидравлическую нагрузку на биофильтр и объем загрузочного материала, можно определить максимальную производительность биофильтра в сутки по формуле (4.5), где V – объем загрузочного материала для двух биофильтров, м³; $V = 201,84$ м³:

$$Q = 28,729 \cdot 201,84 = 2899,396 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Исходя из полученных результатов поверочного расчета, производительности существующих биофильтров после их модернизации под новые требования очистки более чем достаточно.

Для проверки размеров биофильтра воспользуемся математической моделью, представленной в главе 3.

Подставив гидравлическую нагрузку в эмпирические данные для загрузочного материала «Пространственная сетка» в максимальных значениях, получим скорость $v = 1,7$ м/час, удельная площадь по данным производителя $150 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $K_L = 0,02$ м/час, $L_{N-NH_4 \text{ вх}} = 65$ мг/л, $L_{N-NH_4 \text{ оч}} = 0,39$ мг/л, и после расчета значения $A = 0,66$, $f_s = 54 \text{ м}^2$ (с учетом площади имеющегося сооружения и эффективной площади загрузочного материала) получится, что высота слоя загрузочного материала зоны нитрификации составит $H_n = 4,9$ м. Используя данные времени пребывания для описанного загрузочного материала в зоне денитрификации, получим значение высоты этой зоны $H_d = 1$ м.

Для проектирования принимаем максимальный вариант высоты слоя загрузочного материала, то есть 6 м.

Таким образом, действующие очистные сооружения при необходимой реконструкции могут обеспечить требуемое качество очищенной воды. Однако необходимо сравнить и экономические показатели предложенных вариантов.

Для сравнительной экономической оценки двух вариантов необходимо произвести расчет капитальных и эксплуатационных затрат.

Капитальные затраты, рассчитанные в ценах на 2024 г. (с НДС), включают в себя:

По 1-му варианту (табл. 4.2):

Таблица 4.2 - Капитальные затраты, 1-й вариант

Показатель	Стоимость, тыс. руб.
Замена загрузочного материала	2757,30
Строительство промежуточного вторичного отстойника	20 937,60
Подающие насосы на вторую систему биофильтрации, производительностью 1 раб., 1 рез.	579,00
Рециркуляционные насосы (1 раб., 1 рез.)	197,26
Монтаж фитингов и арматуры	1377,34
Итого	25 848,51

По 2-му варианту (табл. 4.3):

Таблица 4.3 - Капитальные затраты, 2-й вариант

Показатель	Стоимость, тыс. руб.
Аэротенк	45 388,80
Воздуходувные станции	9648,00
Итого	55 036,8

Стоимость строительства рассчитана в соответствии с [47].

Для оценки затрат, как правило, учитывают не только капитальные расходы, но и операционные (эксплуатационные) расходы.

В соответствии с [82] был произведен расчет численности работников: при реализации реконструкции по 1-му варианту составит 13 человек, а по 2-му варианту – 15 человек.

Для укрупненной оценки различных вариантов рассмотрим только работников, задействованных непосредственно в оперативном управлении и эксплуатации объектов водоотведения при производительности очистных сооружений 2400 м³/сут для обслуживания сооружений, в том числе их эксплуатации, осуществления профилактического и текущего ремонтов механизмов и оборудования.

Таблица 4.4 - Сравнение эксплуатационных расходов

Показатель	1-й вариант, тыс. руб.	2-й вариант, тыс. руб.
Текущий ремонт и содержание зданий и сооружений	1412,25	3410,3
Амортизация оборудования	774,48	1962,98
Электроэнергия	405,20	1026,91
Зарплата работников	4680,00	5400,00
Реагенты	139,52	0,00
Итого	7411,45	11 800,20

Следует отметить, что в табл. 4.4 приведены не полные эксплуатационные затраты, а лишь разница в вариантах реконструкции, так, например, в эксплуатации не учтены затраты на электроэнергию на обогрев зданий или на эксплуатацию песколовков, так как такие затраты будут одинаковы в двух рассматриваемых сценариях.

Для экономической оценки и принятия решений используют различные инструменты: денежный поток, учет приведенных затрат, оценку стоимости всего жизненного цикла и т. д.

Для предварительной оценки экономической эффективности и в качестве инструмента принятия решений удобно использовать алгоритм расчета по жизненному циклу [18].

$$\text{СЖЦ} = \sum_{t_1}^n \text{КАПИТ} + \sum_{t_2}^n \text{ЭКСПЛ} \quad (4.7)$$

где:

КАПИТ – сумма капитальных затрат;

ЭКСПЛ – сумма эксплуатационных затрат;

n – расчетный период (количество лет);

t_1, t_2 – год начала капитальных или эксплуатационных затрат по денежному потоку.

Для учета затрат во времени следует учитывать ставку дисконтирования, для этого следует воспользоваться [18], срок эксплуатации сооружений примем 25 лет (табл. 4.5).

Таблица 4.5 - Расчет жизненного цикла по двум вариантам

Показатель	1-й вариант, тыс. руб.	2-й вариант, тыс. руб.
КАПИТ	25 848,51	55 036,80
ЭКСПЛ	7411,45	11 800,20
СЖЦ ₁	25 848,51	55 036,80
СЖЦ ₂₅	7411,45	11 800,20

Следовательно, рационально осуществлять реконструкцию действующих очистных сооружений по первому сценарию. Схема после реконструкции представлена на рис. 4.2.

Экономический эффект по жизненному циклу при применении схемы с биофильтрами составил 45,6 %.

Технологическая схема после реконструкции
(разделение биофильтров на зоны денитри- нитрификации)

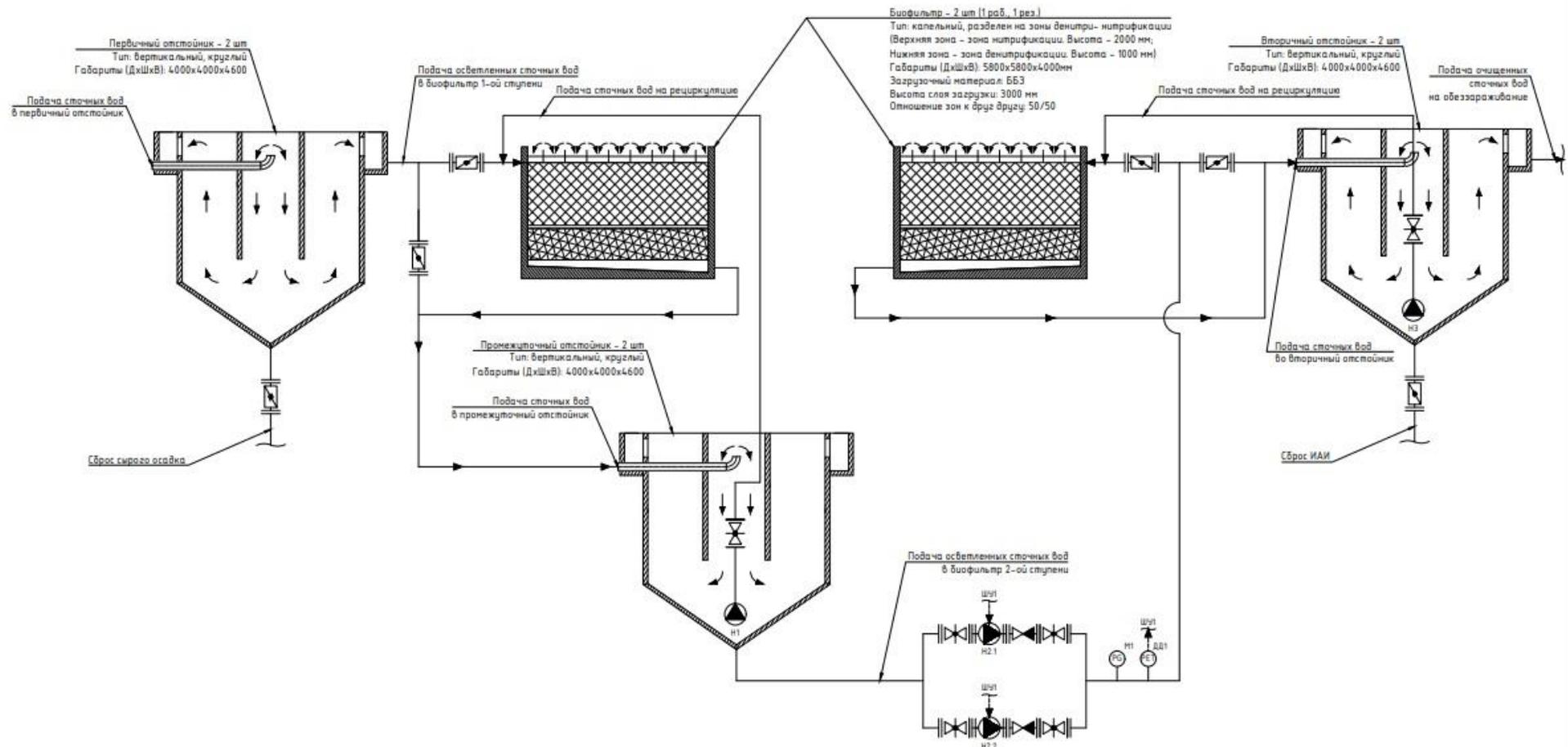


Рисунок 4.2 - Схема очистных сооружений после реконструкции

4.2 Технико-экономический расчет реконструкции канализационных очистных сооружений с Эльбрус

Очистные сооружения принимают сточные воды от части села.

Построенные очистные сооружения предназначены для очистки бытовых сточных вод, производительность – 1200 м³/сут.

Очистные сооружения располагаются в здании и включают в себя только механическую очистку: решетки, совмещенные с песколовками, первичный вертикальный отстойник. Поступления сточных вод на канализационные очистные сооружения отличаются неравномерностью, поэтому рекомендовано применение биофильтров. Задачей предпроектной проработки является определение срока окупаемости реконструкции очистных сооружений.

Исходные данные для расчета:

– сточная вода после механической очистки: БПК_п – 190 мг/л, N-NH₄ – 27 мг/л.

Для определения срока окупаемости целесообразно составить денежный поток с учетом капитальных и эксплуатационных затрат, сравнивая с платой НВОС.

Осуществление платы за загрязнение окружающей среды рассчитывается по [48].

Расчет платы за НВОС за 1 год (табл. 4.6) рассчитывается по формуле:

$$M = M(\text{в пределах НДС}) + M(\text{сверх НДС}). \quad (4.8)$$

$$M(\text{ в пределах НДС}) = \sum_{i=1}^n (M_{нді} \cdot N_{плі} \cdot K_{от} \cdot K_{нд} \cdot K_{во}), \quad (4.9)$$

где:

M_{нді} – платежная база за сбросы загрязнений, тонна (м³);

N_{плі} – ставка платы за сброс;

Кот – дополнительный коэффициент для объектов, находящихся под особой охраной;

Кнд – коэффициент за сброс загрязнений в пределах нормативов допустимых сбросов;

n – количество загрязняющих веществ;

Кво – коэффициент к ставкам платы за сбросы загрязнений, для которых устанавливаются технологические показатели наилучших доступных технологий, равный 0,5.

$$M (\text{сверх НДС}) = \sum_{i=1}^n (M_{ндi} \cdot N_{плi} \cdot K_{от} \cdot K_{пр} \cdot K_{во}), \quad (4.10)$$

где:

$K_{пр}$ – коэффициент к ставкам платы за сбросы загрязняющего вещества, превышающие массу сбросов загрязнений.

Таблица 4.6 - Расчет НВОС для сооружений до и после реконструкции

Показатель	Стоимость, тыс. руб./год
Плата за НВОС (БПК _п) до реконструкции	2627,64
Плата за НВОС (азот аммонийный) до реконструкции	1831,37
Плата за НВОС (БПК _п) после реконструкции	0,42
Плата за НВОС (азот аммонийный) после реконструкции	0,27

Капитальные затраты (табл. 4.7) и эксплуатационные расходы (табл. 4.8) рассчитаны в ценах на 2024 г. (с НДС).

Таблица 4.7 - Капитальные затраты

Показатель	Стоимость, тыс. руб.
Биофильтры	22 482,43
Загрузочный материал	1400, 00
Вторичные отстойники	8584,42
Подающие насосы (1 раб., 1 рез.)	270 ,40
Рециркуляционные насосы (1 раб., 1 рез.)	187,87
Итого	31 066,85

Таблица 4.8 - Эксплуатационные расходы

Показатель	Стоимость, тыс. руб./год
Текущий ремонт и содержание зданий и сооружений	289,01
Амортизация оборудования	385,34
Электроэнергия	170,4
Зарплата работников	1440,0
Реагенты	63,14
Итого	2347,89

Для расчета срока окупаемости составлен денежный поток с учетом описанных затрат, экономии за счет уменьшения плат за НВОС. Дисконтированный срок окупаемости составил 14 лет.

Выводы по главе 4

1. На основании результатов исследований разработан комплекс мероприятий по реконструкции станций очистки сточных вод г. Мытищи производительностью 2400 м³/сут.
2. Проведен сравнительный анализ экономической эффективности двух вариантов реконструкции канализационных очистных сооружений г. Мытищи – с использованием аэротенков и биофильтров с глубокой биологической очисткой сточных вод от соединений азота. Экономический эффект по стоимости жизненного цикла при применении схемы с биофильтрами составил 45,6 %.
3. Проведена оценка экономической эффективности реконструкции канализационных очистных сооружений с. Эльбрус с использованием биофильтров, работающих в режиме денитрификации-нитрификации: срок окупаемости внедренной технологии составил 14 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и теоретически обоснована технология глубокой биологической очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах, работающих в режиме нитрификации и денитрификации с чередующимися аноксидными (анаэробными) и аэробными зонами с рециркуляцией возвратного потока очищенной воды с разными типами загрузочного материала. Применение технологии позволяет достичь качества очищенной воды ниже нормативов сброса в водные объекты рыбохозяйственного значения: по азоту аммонийному – до 0,14 мг/л, нитритам – до 0,016 мг/л, нитратам – до 4,66 мг/л, БПК₅ – до 2,16 мг/л при гидравлической нагрузке от 0,6 до 1,23 м³/(м³·сут).
2. Экспериментально доказано, что наличие рециркуляции возвратного потока очищенной воды положительно влияет на структуру биологической пленки – формируется тонкий плотный слой, который, в свою очередь, более эффективен для удаления соединений азота и органических загрязнений.
3. Разработана математическая модель процесса глубокой очистки сточных вод на биофильтрах с одновременным проведением процессов денитрификации и нитрификации.
4. Разработана методика расчета биофильтра, учитывающая скорость фильтрования, тип загрузочного материала, площадь контакта воды с биопленкой, температуру сточных вод и время пребывания очищаемой воды в реакторе.
5. Определены оптимальные режимы работы и технологические параметры биофильтра для обеспечения глубокой биологической очистки сточных вод.
6. На основании результатов исследований разработан комплекс мероприятий по реконструкции станций очистки сточных вод г. Мытищи производительностью 2400 м³/сут.

7. Проведен сравнительный анализ экономической эффективности двух вариантов реконструкции канализационных очистных сооружений г. Мытищи – с использованием аэротенков и биофильтров с глубокой биологической очисткой сточных вод от соединений азота. Экономический эффект по стоимости жизненного цикла при применении схемы с биофильтрами составил 45,6 %.
8. Проведена оценка экономической эффективности реконструкции канализационных очистных сооружений с. Эльбрус с использованием биофильтров, работающих в режиме денитрификации-нитрификации: срок окупаемости внедренной технологии составил 14 лет.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Исследовать характеристики биопленки, образующейся на биофилтре, работающем в режиме денитрификации-нитрификации, для проектирования вторичных отстойников и сооружений обработки осадка.
2. Для расширения возможностей моделирования разработать систему расчета сооружения заполненных загрузочным материалом различных форм.

Список литературы

1. Авдеенков, П. П. Очистка высококонцентрированных сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : дис. ... канд. техн. наук / Павел Павлович Авдеенков. – Самара, 2023. – 167 с.
2. Амиров, О. Х. Математическая модель процесса биоочистки сточных вод / О. Х. Амиров // Вестник КГУСТА. – 2013. – № 1. – С. 147–152.
3. Андреас, Р. Очистка сточных вод в прибрежных курортных зонах с использованием стандартизированных аэрируемых модульных биофильтрационных установок (SMBF) / Р. Андреас // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2017. – № 10. – С. 60–65.
4. Биоагрузка Агромашинтер. – URL: <https://osetr.org/> (дата обращения: 26.08.2024).
5. Биоагрузка Биремакс. – URL: <https://bire-max.ru/> (дата обращения: 25.08.2024).
6. Биоагрузка. Руфизол. – URL: <https://xn--g1abklhsh.xn--p1ai/produktsiya/retikulirovannyj-penopoliuretan/polinacell/filtry-dlya-vodoemov-akvariumov-i-stochnyh-vod/biozagruzka/> (дата обращения: 26.08.2024).
7. Биологическая загрузка. Техводполимер. – URL: <https://tvpolimer.ru/products/biologicheskaya-zagruzka/> (дата обращения: 26.08.2024).
8. Блажко, С. И. Разработка комбинированной технологии очистки хозяйственно-бытовых сточных вод для малых объектов : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.04 / Сергей Иванович Блажко ; Санкт-Петербургский гос. арх.-строит. ун-т. – СПб., 2009. – 155 с.

9. Блоки биологической загрузки. Средневолжский машиностроительный завод ТВХ. – URL: <https://z-tvh.ru/> (дата обращения: 26.08.2024).
10. Вильсон, Е. В. Оперативно-менеджерская оценка как этап учета рисков работы очистных сооружений канализации в процессе их ретехнологизации / Е. В. Вильсон, К. А. Соловьев // Вестник евразийской науки. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 8.
11. Воронов, Ю. В. Биологические окислители / Ю. В. Воронов, Н. А. Залетова, Г. Ш. Чембулатова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2016. – № 4 (68). – С. 44–47.
12. Воронов, Ю. В. Водоотведение : учеб. издание / Ю. В. Воронов, Е. В. Алексеев, Е. А. Пугачев. – М. : АСВ, 2014. – 416 с.
13. Воронов, Ю. В. К вопросу реконструкции биологических окислителей / Ю. В. Воронов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 8. – С. 288–292.
14. Воронов, Ю. В. Примеры расчетов биологических фильтров и станций биофильтрации : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Воронов, В. П. Саломеев, В. П. Ивчатов. – М. : МИСИ, 1989. – 68 с. : ил.
15. Гогина, Е. С. Интенсификация процессов удаления соединений азота из сточных вод на биофильтрах / Е. С. Гогина, О. В. Янцен, О. А. Ружицкая, В. Дабровски, Р. Жилка, Д. Борушко // Вода и экология: проблемы и решения. – 2016. – № 3 (67). – С. 35–45.
16. Гогина, Е. С. Решение экологических вопросов на объектах с периодической подачей сточных вод / Е. С. Гогина, В. М. Шмалько // Недвижимость: экономика, управление. – 2018. – № 4. – С. 46–50.
17. Гогина, Е. С. Удаление биогенных элементов из сточных вод : монография / Е. С. Гогина. – М. : АСВ, 2010. – 120 с.
18. ГОСТ Р 58785-2019 Качество воды. Оценка стоимости жизненного цикла для эффективной работы систем и сооружений водоснабжения и водоотведения (с Изменением № 1).
19. ГОСТ Р 59024-2020 Вода. Общие требования к отбору проб.

20. Гудков, А. Г. Биологическая очистка сточных вод / А. Г. Гудков. – Вологда : ВоГТУ, 2002. – 127 с.
21. Гумиров, И. С. Биологическая очистка сточных вод методом биофильтрации / И. С. Гумиров, В. В. Голубев // Вестник магистратуры. – 2015. – № 7 (46). – С. 13–14. – EDN UNHEUV.
22. Гусева, А. Ю. Экспериментальные исследования эвтрофирования водоема в системе экологической безопасности региона / А. Ю. Гусева, Н. В. Гусакова, В. В. Петров // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 238–246.
23. Доан Ван Тиен. Глубокая очистка сточных вод на биофильтрах : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Доан Ван Тиен. – М., 2003. – 166 с.
24. Залетова, Н. А. Очистка городских сточных вод от биогенных веществ (соединений азота и фосфора) : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.04 / Нина Николаевна Залетова. – М., 1999. – 50 с.
25. Ивчатов, А. Л. Разработка эффективных методов биологической очистки концентрированных сточных вод : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Александр Леонидович Ивчатов. – М., 1986. – 291 с.
26. Инженерно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов» : утв. Приказом Росстандарта от 12.12.2019 № 2981. – М. : НДТ, 2019. – 417 с.
27. Инженерные решения для очистки сточных вод. Биоагрузка. – URL: <https://2akva.ru/> (дата обращения: 26.08.2024).
28. Кирсанов, В. В. Методика определения параметров высоконагружаемого биофильтра с рециркуляцией и искусственной аэрацией для очистки сточных вод с изменяющейся нагрузкой / В. В. Кирсанов // Научно-практический и учебно-методический журнал. – 2017. – № 9. – С. 14–16.

29. Колесников, В. П. Опыт эксплуатации комбинированных сооружений при очистке сточных вод ст. Кущевская Краснодарского края / В. П. Колесников, Е. В. Вильсон, Л. Ю. Черникова // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2010. – № 7 (31). – С. 62–64.
30. Кульков, В. Н. Кинетика иммобилизованного и свободно плавающего ила в биореакторе при среднепузырчатой регенерации ершовой загрузки / В. Н. Кульков, Е. Ю. Солопанов, В. М. Сосна // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2016. – № 2 (17). – С. 146–153.
31. Кульков, В. Н. Очистка сточных вод в биореакторе с переменным количеством носителей иммобилизованного ила / В. Н. Кульков, Е. Ю. Солопанов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2021. – Т. 11, № 1 (36). – С. 61–68.
32. Кутикова, Л. А. Фауна аэротенков / Л. А. Кутикова. – Л. : Наука, 1984. – 31 с.
33. Лыкова, О. В. Биофильтры, их преимущества и недостатки / О. В. Лыкова, Е. С. Гогина // Вестник МГСУ. – 2009. – № S1. – С. 114–117.
34. Макиша, Н. А. Гидравлическое моделирование и исследование процессов очистки сточных вод на биофильтрах с использованием плоскостной загрузки / Н. А. Макиша, О. В. Янцен // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 11 (94). – С. 171–174.
35. Макиша, Н. А. Интенсификация процессов удаления аммонийного азота из сточных вод с применением плавающего загрузочного материала : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Николай Алексеевич Макиша. – М., 2010. – 196 с.
36. Макиша, Н. А. Исследование процессов биологической очистки сточных вод в системах с активным илом с применением плавающего загрузочного материала / Н. А. Макиша // Вестник МГСУ. – 2010. – № 2. – С. 248–252.

- 37.МВИ № 101-08. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в питьевой, поверхностной природной, сточной, морской воде, в воде бассейнов и технологической воде спектрофотометрическим методом.
- 38.МВИ № 22-09. Методика выполнения измерений бихроматной окисляемости воды (ХПК) в питьевой, поверхностной природной, сточной, морской воде, в воде бассейнов и технологической воде спектрофотометрическим методом.
- 39.МВИ № 25-10. Методика выполнения измерений массовой концентрации общего неорганического фосфора и фосфат-ионов в питьевой, поверхностной природной, сточной, морской воде, в воде бассейнов и технологической воде спектрофотометрическим методом.
- 40.МВИ № 65-10. Методика выполнения измерений массовой концентрации общего азота в питьевой и сточной воде спектрофотометрическим методом.
- 41.МИ 222.0265/1.00258/2014. Методика измерений биохимического потребления кислорода в пробах природных и сточных вод по изменению давления газовой фазы (манометрический метод) с помощью системы БПК ОxiTop (IS 6; IS 12; Control 6; Control 12).
- 42.Мосин, О. В. Расчет и проектирование биологических фильтров / О.В. Мосин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2013. – № 7. – С. 39–45.
- 43.НДП 10.1:2:3.91-06. Методика измерений массовой концентрации нитрит-ионов в пробах питьевых, природных и сточных вод фотометрическим методом с реактивом Грисса.
- 44.Недосеко, И. В. Реконструкция очистных сооружений санатория «Красноусольский» с применением многослойного поликарбоната / И. В. Недосеко, М. В. Окользина // Градостроительство и архитектура. – 2013. – № 3. – С. 51–54.

45. Носители прикрепленного биоценоза. НПФ Этек. – URL: http://etek.ru/product.php#nos_bioc (дата обращения: 26.08.2024).
46. НПО Агростройсервис. Биологическая загрузка. – URL: <https://acs-nnov.ru/kupit-biologicheskuyu-zagruzku-ochistnyh-sooruzhenij.html> (дата обращения: 26.08.2024).
47. НЦС 81-02-19-2024. Сборник № 19. Здания и сооружения городской инфраструктуры.
48. Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду : Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 № 255 (ред. от 17.08.2020) (вместе с «Правилами исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду»).
49. Олейник, А. Я. и др. Моделирование процессов доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод на фильтрах / А. Я. Олейник // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідраліки. – 2006. – Т. 7. – С. 85–97.
50. Олейник, А. Я. К расчету очистки сточных вод на биофильтрах (капельных фильтрах) / А. Я. Олейник, О. А. Колпакова // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. – К. : КНУБА, 2011. – Вип. 16. – С. 86–106.
51. Олейник, А. Я. Теоретическое обоснование очистки сточных вод на капельных биофильтрах / А. Я. Олейник, А. Н. Кравчук, О. А. Колпакова // Доповіді НАН України. – 2012. – № 3. – С. 179–184.
52. Патент № 2051134 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/30, С02F 101/16, С02F 101/30. Устройство для биохимической очистки сточных вод и удаления соединений азота : № 5034107/26 : заявл. 28.02.1992 : опубл. 27.12.1995 / В. П. Колесников, Е. В. Вильсон, В. К. Гордеев-Гавриков [и др.] ; заявитель Ростовский науч.-исслед. ин-т Акад. коммун. хоз-ва им. К. Д. Памфилова. – 5 с. : ил.

53. Патент № 2106315 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/10, С02F 103/32. Биофильтр башенного типа : № 96107511/25 : заявл. 18.04.1996 : опубл. 10.03.1998 / М. Г. Бронштейн. – 6 с. : ил.
54. Патент № 2155164 С2 Российская Федерация, МПК С02F 3/04. Биофильтр : № 98121046/12 : заявл. 23.11.1998 : опубл. 27.08.2000 / Г. В. Викторов, Н. С. Кобелев ; заявитель Курский гос. техн. ун-т. – 6 с. : ил.
55. Патент № 2173670 С2 Российская Федерация, МПК С02F 3/04, С02F 101/30. Башенный биофильтр : № 99122095/12 : заявл. 21.10.1999 : опубл. 20.09.2001 / Г. В. Викторов, Н. С. Кобелев ; заявитель Курский гос. техн. ун-т. – 6 с. : ил.
56. Патент № 2220916 С2 Российская Федерация, МПК С02F 3/10, С02F 101/30, С02F 103/34. Малогабаритный биофильтр башенного типа : № 2001101706/15 : заявл. 17.01.2001 : опубл. 10.01.2004 / М. Г. Бронштейн. – 8 с. : ил.
57. Патент № 2555010 С2 Российская Федерация, МПК С02F 9/00, С02F 3/02, С02F 3/12. Способ и установка для глубокой биохимической очистки сточных вод : № 2012113372/05 : заявл. 06.04.2012 : опубл. 10.07.2015 / А. Ш. Недува. – 6 с. : ил.
58. Патент № 2720150 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/06. Модифицированный погружной вращающийся биофильтр для очистки сточных вод от загрязнений : № 2019137412 : заявл. 21.11.2019 : опубл. 24.04.2020 / М. А. Саид, Н. С. Серпокрылов, В. В. Нелидин ; заявитель Донской гос. техн. ун-т. – 18 с. : ил.
59. Патент на полезную модель № 133121 U1 Российская Федерация, МПК С02F 3/34. Биофильтр : № 2013112784/10 : заявл. 22.03.2013 : опубл. 10.10.2013 / А. А. Петропавловский. – 21 с. : ил.
60. Патент на полезную модель № 152194 U1 Российская Федерация, МПК С02F 3/00. Биологическая загрузка для биореактора : № 2014144740/05 : заявл. 07.11.2014 : опубл. 10.05.2015 / М. М. Пукемо. – 17 с. : ил.

- 61.ПНД Ф 14.1.1-95 (издание 2004 г.). Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. – М. : ФГУ ЦЭКА МПР России, 2004. – 22 с.
- 62.ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений рН в водах потенциометрическим методом (издание 2004 г.). – М. : Федер. центр анализа и оценки техногенного воздействия, 2004. – 16 с.
- 63.ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений биохимической потребности в кислороде после n-дней инкубации (БПК_{полн.}) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах. – М. : Гос. ком. РФ по охране окруж. среды. – 1997. – 36 с.
- 64.ПНД Ф 14.1:2:4.190-03 (издание 2012 г.). Методика измерения бихроматной окисляемости (химического потребления кислорода) в пробах природной, питьевой и сточной вод фотометрическим методом с применением анализатора жидкости Флюорат-02. – М. : ООО «Люмэкс», 2012. – 24 с.
- 65.ПНД Ф 14.1:2:4.254-09 (издание 2017 г.). Методика измерений массовых концентраций взвешенных и прокаленных взвешенных веществ в пробах питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом. – М. : Федер. служба по надзору в сфере природопользования, 2017. – 13 с.
- 66.ПНД Ф 14.1:2:4.4-95. Методика измерений массовой концентрации нитрат-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой. – М. : Федер. центр анализа и оценки техногенного воздействия, 2011. – 13 с.
- 67.ПНД Ф СБ 14.1.92-96. Методическое руководство по гидробиологическому контролю нитчатых микроорганизмов активного ила. – М. : Гос. ком. РФ по охране окруж. среды, 1996. – 51 с.

68. Полимерные биологические загрузки для очистных сооружений. Арматех.
– URL: <http://www.armatech.ru/products/biologicheskiye-zagruzki/> (дата обращения: 25.08.2024).
69. Пукемо, М. М. Совершенствование контактных биореакторов для очистки сточных вод : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Михаил Михайлович Пукемо ; [Место защиты: Национ. исслед. Моск. гос. строит. ун-т]. – М., 2019. – 160 с. : ил.
70. Рахманкулова, З. Ш. Оценка способности нитрифицирующих микроорганизмов к образованию биопленок / З. Ш. Рахманкулова, Т. В. Кирилина, А. С. Сироткин // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 16. – С. 152–154.
71. Ружицкая, О. А. Интенсификация процессов удаления фосфатов из сточных вод : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Ольга Андреевна Ружицкая. – М., 2003. – 178 с.
72. Саид, М. А. Разработка фотовращающегося биофильтра для повышения эффективности очистки в перекрытых узлах очистных сооружений сточных вод / М. А. Саид // Точная наука. – 2018. – № 30. – С. 2–8.
73. Саломеев, В. П. Реконструкция инженерных систем и сооружений водоотведения : монография / В.П. Саломеев. – М. : Изд-во АСВ, 2009. – 192 с.
74. Саломеев, В. П. Совершенствование процессов глубокой очистки сточных вод на станциях биофильтрации / В. П. Саломеев, Ф. Ш. Абдуллаев // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7 (75). – С. 125–130.
75. Сизов, А. А. Методика выбора технологии очистки периодических сбросов сточных вод / А. А. Сизов, Н. С. Серпокрылов, Я. Ю. Каменев // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2012. – № 4. – С. 71–74.
76. Словцов, А. А. Совершенствование процессов биологической очистки сточных вод с помощью прикрепленных биоценозов / А. А. Словцов // Вестник МГСУ. – 2008. – № 3. – С. 80–85.

77. Смирнов, Д. Г. Разработка комплексной технологии очистки сточных вод с минимизацией образования избыточного активного ила и осадка : дис. канд. техн. наук : 05.23.04 / Д. Г. Смирнов ; Моск. гос. строител. ун-т. – М., 2013. – 148 с.
78. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85 (с Изменениями № 1, 2).
79. Таварткиладзе, И. М. Очистные сооружения водоотведения : справ. / И. М. Таварткиладзе и др. – К. : Будівельник, 1988. – 256 с.
80. Таварткиладзе, И. М. Сорбционные процессы в биофильтрах / И. М. Таварткиладзе. – М. : Стройиздат, 1989. – 123 с. : ил. (Охрана окружающей природной среды).
81. Технический справочник по обработке воды : в 2 т. / пер. с фр. – СПб. : Новый журнал, 2007. – 1696 с.
82. Типовые отраслевые нормы численности работников водопроводно-канализационного хозяйства : утв. приказом Минстроя России от 23.03.2020 № 154/пр.
83. ФР 1.31.2008.04397. Методика выполнения измерений массовой концентрации активного ила.
84. ФР 1.31.2008.04398. Методика выполнения измерений дозы ила по объему и расчету илового индекса.
85. ФР 1.31.2008.04399. Методика выполнения измерений зольности сырого осадка, активного ила.
86. Харькина, О. В. Исследование работы азротенков нитри-денитрификации с повышенными дозами активного ила / О. В. Харькина, К. В. Шотина // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 10-1. – С. 42–47.
87. Хенце, М. Очистка сточных вод : учеб. изд. / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван / пер. с англ. – М. : Мир, 2009. – 480 с.
88. Хецуриани, Е. Д. Экологическая безопасность водной среды – залог здорового будущего / Е. Д. Хецуриани, Т. С. Колмакова, М. А. Акименко, Т. Е. Хецуриани // Вестник Волгоградского государственного

- архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2018. – Вып. 54 (73). – С. 156–164.
89. Хоружий, В. П. Доочистка сточных вод на фильтрах с волокнисто-пенополистирольной загрузкой / В. П. Хоружий, Р. А. Николова, Х. И. Ахмад. – К. : Товариство «Знання» України, 2004. – Т. 3. – С. 77–81.
90. Шакиров, Д. Р. Сравнительный анализ биоагрузок разных производителей, используемых для процессов очистки сточных вод / Д. Р. Шакиров // Идеи молодых ученых – агропромышленному комплексу: естественнонаучные и математические дисциплины : материалы студенч. науч. конф. Ин-та ветеринарной медицины, Троицк, 20–24 апреля 2020 г. – Челябинск : Южно-Уральский гос. аграрный ун-т, 2020. – С. 252–256.
91. Шеломков, А. С. Технология одностадийного процесса нитриденитрификации / А. С. Шеломков, Н. В. Захватаева // Водоснабжение и санитарная техника. – 1996. – № 6. – С. 17–18.
92. Шинкарчук, М. В. Доочистка сточных вод методом биофильтрации / М. В. Шинкарчук // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2014. – № 3. – С. 34–36.
93. Шувалов, Р. М. Очистка бытовых сточных вод малых населенных пунктов на коммунальных очистных сооружениях с применением дисковых биофильтров : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Роман Михайлович Шувалов ; Самар. гос. арх.-строит. акад. – Самара, 2010. – 213 с.
94. Яковлев, С. В. Биологические фильтры / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1982. – 121 с. : ил. (Охрана окружающей природной среды).
95. Янцен, О. В. Глубокая очистка сточных вод от соединений азота на биофильтрах / О. В. Янцен // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 9. – С. 64–69.
96. Янцен, О. В. Исследование гидродинамических характеристик биофильтра для плоскостного загрузочного материала / О. В. Янцен // Вестник МГСУ. – 2010. – № 2. – С. 144–148.

97. Янцен, О. В. Перспективные методы очистки сточных вод в туристических зонах / О. В. Янцен, Е. С. Гогина // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2022. – № 2 (38). – С. 72–80.
98. Янцен, О. В. Современные решения по реконструкции малых канализационных очистных сооружений: конструкция и расчет / О. В. Янцен // Водоснабжение и санитарная техника. – 2019. – № 9. – С. 57–61.
99. Abbasi, M. R. A review on modeling and control of olefin polymerization in fluidized-bed reactors / M. R. Abbasi, A. Shamiri, M. A. Hussain // *Reviews in Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 35, No 3. – P. 311–333.
100. Altagroup. Кассета биологической загрузки. – URL: <https://altagroup.ru/products/biofilters/kassetabiozagruzki/> (дата обращения: 26.08.2024).
101. Aoi, Y. In situ identification of microorganisms in biofilm communities / Y. Aoi // *Journal of bioscience and bioengineering*. – 2002. – Vol. 94, No 6. – P. 552–556.
102. Azizi, S. Evaluation of heavy metal removal from wastewater in a modified packed bed biofilm reactor / S. Azizi, I. Kamika, M. Tekere // *PloS one*. – 2016. – Vol. 11, No 5. – URL: Evaluation of Heavy Metal Removal from Wastewater in a Modified Packed Bed Biofilm Reactor | PLOS ONE (дата обращения: 26.08.2024).
103. Boltz, J. P. From biofilm ecology to reactors: a focused review / J. P. Boltz et al. // *Water Science and Technology*. – 2017. – Vol. 75, No 8. – P. 1753–1760.
104. Chaudhary, D. S. Biofilter in water and wastewater treatment / D. S. Chaudhary et al. // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2003. – Vol. 20, No 6. – P. 1054–1065.
105. Chen, S. Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an anaerobic-aerobic moving-bed biofilm reactor system / S. Chen, D. Sun, J. S. Chung // *Waste Management*. – 2008. – Vol. 28, No 2. – P. 339–346.

106. Chung, Y. C. Two-stage biofilter for effective NH₃ removal from waste gases containing high concentrations of H₂S / Y. C. Chung, K. L. Ho, C. P. Tseng // *Journal of the Air & Waste Management Association*. – 2007. – Vol. 57, No 3. – P. 337–347.
107. Cui, B. Achieving partial denitrification-anammox in biofilter for advanced wastewater treatment / B. Cui et al. // *Environment international*. – 2020. – Vol. 138. – URL: Achieving partial denitrification-anammox in biofilter for advanced wastewater treatment – ScienceDirect (дата обращения: 26.08.2024).
108. Dąbrowski, W. Application of Trickling Filter and Vertical Flow Constructed Wetland Bed to Treat Sewage from Craft Brewery / W. Dąbrowski, B. Karolinczak // *Journal of Ecological Engineering*. – 2019. – Vol. 20, No 9. – URL: Application of Trickling Filter and Vertical Flow Constructed Wetland Bed to Treat Sewage from Craft Brewery (icm.edu.pl) (дата обращения: 29.08.2024).
109. Di Iaconi, C. Upgrading small wastewater treatment plants with the sequencing batch biofilter granular reactor technology: techno-economic and environmental assessment / C. Di Iaconi et al. // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 148. – P. 606–615.
110. Gogina, E. Energy-efficient solution for household wastewater treatment using biofilters / E. Gogina, O. Yantsen // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – P. 01021. – URL: Energy-efficient solutions for household wastewater treatment using biofilters | E3S Web of Conferences (e3s-conferences.org) (дата обращения: 29.08.2024).
111. Gogina, E. Research of biofilter feed properties / E. Gogina, O. Yantsen // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2015. – Vol. 10, No 3. – P. 44070–44074.
112. Gogina, E. S. Research of hydrodynamics of biofilter with surface feed / E. S. Gogina, O. V. Yantsen, O. A. Ruzhitskaya // *Applied Mechanics and Materials*. – Trans Tech Publications Ltd, 2014. – Vol. 580. – P. 2354–2357.

113. Gómez-Silván, C. Structure of archaeal communities in membrane-bioreactor and submerged-biofilter wastewater treatment plants / C. Gómez-Silván et al. // *Bioresource Technology*. – 2010. – Vol. 101, No 7. – P. 2096–2105.
114. Gonzalez, G. Biodegradation of phenol in a continuous process: comparative study of stirred tank and fluidized-bed bioreactors / G. Gonzalez et al. // *Bioresource Technology*. – 2001. – Vol. 76, No 3. – P. 245–251.
115. Gonzalez, G. Biodegradation of phenolic industrial wastewater in a fluidized bed bioreactor with immobilized cells of *Pseudomonas putida* / G. Gonzalez et al. // *Bioresource technology*. – 2001. – Vol. 80, No 2. – P. 137–142.
116. Grady, Jr C. P. L. *Biological wastewater treatment* / Jr C. P. L. Grady et al. – CRC press, 2011. – 1022 c.
117. Haribabu, K. Biodegradation of organic content in wastewater in fluidized bed bioreactor using low-density biosupport / K. Haribabu, V. Sivasubramanian // *Desalination and Water Treatment*. – 2016. – Vol. 57, No 10. – P. 4322–4327.
118. Helmer, C. Simultaneous nitrification/denitrification in an aerobic biofilm system / C. Helmer, S. Kunst // *Water Science and Technology*. – 1998. – Vol. 37, No 4–5. – P. 183–187.
119. Henze, M. *Wastewater Treatment – Springer* / M. Henze, P. Harremoes, C. Jansen, E. Arwin. – Berlin ; New York, 2002. – 430 p.
120. Luo W. et al. Novel two-stage vertical flow biofilter system for efficient treatment of decentralized domestic wastewater / W. Luo et al. // *Ecological engineering*. – 2014. – Vol. 64. – P. 415–423.
121. Makisha, N. Advanced Research on Polymer Floating Carrier Application in Activated Sludge Reactors / N. Makisha // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, No 13. – DOI 10.3390/polym14132604. – EDN FKHUAL. – URL: [Polymers | Free Full-Text | Advanced Research on Polymer Floating Carrier Application in Activated Sludge Reactors \(mdpi.com\)](https://www.mdpi.com/2073-8994/14/13/2604) (дата обращения: 29.08.2024).
122. Makisha, N. Laboratory modeling and research of wastewater treatment processes in biofilters with polymer feed / N. Makisha, O. V. Yantsen // *Applied*

- Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications Ltd, 2014. – Vol. 587. – P. 640–643.
123. Matala. – URL: <https://www.matala.com.tw/> (дата обращения: 26.08.2024).
124. Narayanan, C. M. Biological wastewater treatment and bioreactor design: a review / C. M. Narayanan, V. Narayan // Sustainable environment research. – 2019. – Vol. 29, No 1. – P. 1–17. – URL: Biological wastewater treatment and bioreactor design: a review | Sustainable Environment Research (springer.com) (дата обращения: 29.08.2024).
125. Naz, I. Performance evaluation of stone-media pro-type pilot-scale trickling biofilter system for municipal wastewater treatment / I. Naz et al. // Desalination and Water Treatment. – 2016. – Vol. 57, No 34. – P. 15792–15805.
126. Pandey, A. Studies on Synthesis of Lactic Acid from Agricultural and Food Wastes in Downflow Stationary Fixed Film (DSFF) Bioreactors / A. Pandey, C. M. Narayanan // International Journal of Transport Phenomena. – 2017. – Vol. 14, No 4. – URL: Studies on Synthesis of Lactic Acid from Agricultural and Food Wastes in Downflow Stationary Fixed Film (DSFF) Bioreactors. | International Journal of Transport Phenomena | EBSCOhost (дата обращения: 28.08.2024).
127. Peszynska, M. Biofilm growth in porous media: Experiments, computational modeling at the porescale, and upscaling / M. Peszynska, A. Trykozko, G. Iltis, S. Schlueter, D. Wildenschild // Advances in Water Resources. – 2016. – No 95. – P. 288–301.
128. Pochana, K. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND) / K. Pochana, J. Keller // Water Science and Technology. – 1999. – Vol. 39, No 6. – P. 61–68.
129. Rabbani, K. A. Pilot-scale biofilter for the simultaneous removal of hydrogen sulphide and ammonia at a wastewater treatment plant / K. A. Rabbani et al. // Biochemical Engineering Journal. – 2016. – Vol. 107. – P. 1–10. – URL: Pilot-scale biofilter for the simultaneous removal of hydrogen sulphide and ammonia at a wastewater treatment plant – ScienceDirect (дата обращения: 28.08.2024).

130. Rajasimman, M. Aerobic digestion of starch wastewater in a fluidized bed bioreactor with low density biomass support / M. Rajasimman, C. Karthikeyan // *Journal of hazardous materials*. – 2007. – Vol. 143, No 1–2. – P. 82–86.
131. Reungoat, J. Biofiltration of wastewater treatment plant effluent: Effective removal of pharmaceuticals and personal care products and reduction of toxicity / J. Reungoat et al. // *Water research*. – 2011. – Vol. 45, No 9. – P. 2751–2762.
132. Sokół, W. Aerobic treatment of wastewaters in the inverse fluidised bed biofilm reactor / W. Sokół, W. Korpál // *Chemical Engineering Journal*. – 2006. – Vol. 118, No 3. – P. 199–205.
133. Sokół, W. Treatment of refinery wastewater in a three-phase fluidised bed bioreactor with a low density biomass support / W. Sokół // *Biochemical Engineering Journal*. – 2003. – Vol. 15, No 1. – P. 1–10. – URL: Treatment of refinery wastewater in a three-phase fluidised bed bioreactor with a low density biomass support – ScienceDirect (дата обращения: 28.08.2024).
134. Tanmoy, D. S. The use of recycled materials in a biofilter to polish anammox wastewater treatment plant effluent / D. S. Tanmoy, J. C. Bezares-Cruz, G. H. LeFevre // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 296. – P. 134058. – URL: The use of recycled materials in a biofilter to polish anammox wastewater treatment plant effluent – ScienceDirect (дата обращения: 28.08.2024).
135. Trickling filter. Brentwood. – URL: <https://www.brentwoodindustries.com/products/water-wastewater/biological-treatment/trickling-filter-treatment-solutions/> (дата обращения: 26.08.2024).
136. Verma, M. Aerobic biofiltration processes – Advances in wastewater treatment / M. Verma et al. // *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*. – 2006. – Vol. 10, No 4. – P. 264–276.
137. Woldeyes, B. Evaluation of the inverse fluidized bed biological reactor for treating high-strength industrial wastewaters / B. Woldeyes et al. // *Advances in Chemical Engineering and Science*. – 2011. – Vol. 1, No 4. – P. 239. – URL: <https://www.scirp.org/html/8193.html> (дата обращения: 28.08.2024).

138. Yadu, A. Studies on biological degradation of 4-bromophenol using anaerobic, anoxic and aerobic bioreactors / A. Yadu, B. P. Sahariah, J. Anandkumar // *J. Modern Chem. Chem. Technol.* – 2016. – Vol. 7, No 1. – P. 37–41.
139. Zhang, L. Nitrogen removal performance and microbial distribution in pilot- and full-scale integrated fixed-biofilm activated sludge reactors based on nitritation-anammox process / L. Zhang, S. Zhang, Y. Peng, X. Han, Y. Gan // *Bioresource Technology.* – 2015. – No 196. – P. 448–453.
140. Zhu, G. Simultaneous nitrification and denitrification in step feeding biological nitrogen removal process / G. Zhu et al. // *Journal of Environmental Sciences.* – 2007. – Vol. 19, No 9. – P. 1043–1048.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программа для расчета характеристик биофильтра

“BiofilterWTN v1.0”

Общее назначение

Программа “BiofilterWTN v1.0” выполнена в формате приложения Windows Forms (.NET Framework) и предназначена для расчета характеристик биофильтра в ходе проектирования технологической линии очистки воды от азотосодержащих примесей. В основе программы лежат алгоритмы математического моделирования, а также зависимости, полученные по результатам экспериментов. В программе предусмотрено два основных функциональных блока – расчет высоты слоя загрузочного материала биофильтра (на единицу объема сооружения) и расчет гидравлической нагрузки по известной высоте. Программа разработана с использованием возможностей языка объектно-ориентированного программирования C# и снабжена графическим интерфейсом, через который осуществляется ввод исходных данных для расчетов, запуск расчетов и на котором выполняется отображение результата расчета (рис. А.1).

The screenshot shows the BiofilterWTN v1.0 software interface with two main columns of input fields. The left column is titled 'Исходные данные расчета высоты' and the right column is titled 'Исходные данные расчета гидравлической нагрузки'. Both columns have a sub-section for 'Данные для расчета скорости фильтрации, м/мин'. At the bottom, there are two summary boxes: 'Высота, м' and 'Гидравлическая нагрузка, м3/(м3 сутки)'. The values entered in the fields are: Effective contact area (70), Inlet concentration (60), Outlet concentration (0.39), Mass transfer coefficient (0.02), Hydraulic load (1.2), Degree indicator (-0.2), Multiplier (15), Oxidation rate ratio (208.3), Diffusion coefficient (0.00000167), Biofilm thickness (0.0005), and Loading radius (0.07).

Исходные данные расчета высоты		Исходные данные расчета гидравлической нагрузки	
Эффективная площадь контакта, м ²	70	Эффективная площадь контакта, м ²	70
Концентрация на входе, мг/л	60	Концентрация на входе, мг/л	60
Концентрация на выходе, мг/л	0.39	Концентрация на выходе, мг/л	0.39
Коэффициент массопереноса субстрата в жидкой пленке, м/час	0.02	Коэффициент массопереноса субстрата в жидкой пленке, м/час	0.02
Гидравлическая нагрузка, м ³ /(м ³ сутки)	1.2	Высота, м	6.08
Данные для расчета скорости фильтрации, м/мин		Данные для расчета скорости фильтрации, м/мин	
Показатель степени	-0.2	Показатель степени	-0.2
Множитель	15	Множитель	15
Общие исходные данные			
Отношение скорости окисления к константе полунасыщения, 1/час	208.3	Коэффициент молекулярной диффузии субстрата в биопленке, м ² /час	0.00000167
Толщина биопленки, м	0.0005	Радиус загрузки, м	0.07
Высота, м		Гидравлическая нагрузка, м ³ /(м ³ сутки)	

Рисунок А.1 - Графический интерфейс программы “BiofilterWTN v1.0”

Структура графического интерфейса

Графический интерфейс программы выполнен в виде единого окна и включает четыре основных блока:

1. Блок введения исходных данных для расчета высоты, которые включают:
 - эффективную площадь контакта очищаемой воды с биопленкой, м²;
 - концентрацию загрязнения на входе, мг/л;
 - концентрацию загрязнения на выходе, мг/л;
 - значение коэффициента массопереноса субстрата в жидкой пленке, м/час;
 - величину гидравлической нагрузки, м³/(м³·сут);

- данные для расчета скорости фильтрации, определяемые в ходе аппроксимации результатов экспериментов с загрузочным материалом по формуле (2.2)
2. Блок введения исходных данных для расчета гидравлической нагрузки, которые включают:
- эффективную площадь контакта очищаемой воды с биопленкой, m^2 ;
 - концентрацию загрязнения на входе, mg/l ;
 - концентрацию загрязнения на выходе, mg/l ;
 - значение коэффициента массопереноса субстрата в жидкой пленке, $m/час$;
 - высоту единицы объема фильтра, m ;
 - коэффициент и показатель степени интерполяционной зависимости скорости от гидравлической нагрузки.

Раздельное введение этих исходных данных предусмотрено для выполнения сравнительного анализа характеристик двух различных вариантов конструкции в ходе расчета технологической линии.

3. Блок введения общих исходных данных, которые включают:
- величину отношения скорости окисления к константе полунасыщения, $l/час$;
 - коэффициент молекулярной диффузии субстрата в биопленке, $m^2/час$;
 - толщину биопленки, m ;
 - радиус загрузки, m .

Блок запуска расчетов – кнопки для расчета высоты и гидравлической нагрузки по соответствующим исходным данным.

Краткое описание алгоритма

После нажатия пользователем на кнопку запуска расчета создается объект класса исходных данных, в который копируются значения исходных данных, введенные пользователем в графическом интерфейсе. Затем создается объект класса соответствующего решателя (`DirectSolver` или `ReverseSolver`), в который передается объект класса исходных данных, и выполняется расчет. После завершения расчета осуществляется вывод результата в графическом интерфейсе рядом с соответствующей кнопкой запуска расчета.

Руководство пользователя

Работа с программой осуществляется в операционной системе Windows и выполняется по следующему алгоритму:

1. Загрузка программы – запуск файла `BiofilterWTN.exe`
2. Введение исходных данных в соответствующие окна: данные вводятся в формате положительных и отрицательных целых и десятичных дробных чисел, в качестве разделителя целой и дробной части необходимо использовать точку.
3. Запуск расчета высоты или гидравлической нагрузки посредством нажатия соответствующей кнопки в графическом интерфейсе: по результатам расчета рядом с соответствующей кнопкой появится значение рассчитываемой величины (рис. А.2).

BiofilterWTN v1.0

Исходные данные расчета высоты		Исходные данные расчета гидравлической нагрузки	
Эффективная площадь контакта, м ²	70	Эффективная площадь контакта, м ²	70
Концентрация на входе, мг/л	60	Концентрация на входе, мг/л	60
Концентрация на выходе, мг/л	0.39	Концентрация на выходе, мг/л	0.39
Коэффициент массопереноса субстрата в жидкой пленке, м/час	0.02	Коэффициент массопереноса субстрата в жидкой пленке, м/час	0.02
Гидравлическая нагрузка, м ³ /(м ³ сутки)	1.2	Высота, м	6.08
Данные для расчета скорости фильтрации, м/мин		Данные для расчета скорости фильтрации, м/мин	
Показатель степени	-0.2	Показатель степени	-0.2
Множитель	15	Множитель	15
Общие исходные данные			
Отношение скорости окисления к константе полунасыщения, 1/час	208.3		
Коэффициент молекулярной диффузии субстрата в биопленке, м ² /час	0.00000167		
Толщина биопленки, м	0.0005	Радиус загрузки, м	0.07
Высота, м	6.08	Гидравлическая нагрузка, м ³ /(м ³ сутки)	

Рисунок А.2 - Пример результата расчета высоты

4. Завершение работы с программой посредством нажатия на символ X в правом верхнем углу графического интерфейса.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Справки о внедрении результатов диссертационного исследования**

141009, Московская область, г. Мытищи
ул. Водопроводная станция, вл. 4В, стр. 1.
Тел.: +7 (495) 586-31-31
E-mail: vodokanal-mytishy@rambler.ru
Сайт: www.vodokanal-mytishy.ru



Открытое Акционерное Общество
«Водоканал - Мытищи»

Предприятие основано 28 октября 1804 г

Исх. № 1688

От «15» 08 2017г.

СПРАВКА

Дана Янцен Ольге Викторовне в том, что ею проведены испытания на полупроизводственной установке очистки сточных вод на биофильтрах, состоящих из четырех чередующихся зон с различным содержанием кислорода.

Полупроизводственная установка работала с 04.04.2016г. по 05.09.2016г. на сточной воде, поступающей на очистные сооружения ОАО «Водоканал-Мытищи».

Результаты исследований, полученные на указанной установке, соответствуют, по соединениям азота, сбросу очищенной сточной воды в водоемы рыбохозяйственного назначения. Получены результаты исследований, которые могут быть применены при строительстве и реконструкции биофильтров.

Генеральный директор
ОАО «Водоканал-Мытищи»

С. А. Кремешков

**ISHAWASTE**

ПРЕЖДЕ ВСЕГО БАЛАНС

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "ИШАВЕЙСТ"
109428 г. Москва, ул Коновалова, д. 18, оф.7
ИНН 9724035082
КПП 772101001
ОГРН 1217700022330

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы Янцен Ольги Викторовны на соискание ученой степени кандидата технических наук, в частности методические и проектные рекомендации по разработке технологической схемы глубокой очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах, были использованы при подготовке предпроектных решений для «Реконструкция канализационных очистных сооружений в с. Эльбрус Эльбрусского района, КБР», и будут внедрены в последующих работах.



Генеральный директор

Каплун Р.В.

ООО "ИШАВЕЙСТ"
ishawaste.com
ishawaste@yandex.ru
+7 967 261 51 55



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего образования
**«Российский государственный геологоразведочный университет имени
 Серго Орджоникидзе»
 (МГРИ)**

Миклухо-Маклая ул., д. 23, Москва, 117997, тел. (495)433-62-56, E-mail: office@mgri.ru
 ОКПО 02068835, ОГРН 1027739347723, ИНН/КПП 7728028967/772801001

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских разработок

Материалы диссертационной работы Февральских Ольги Викторовны на тему: **«Разработка технологии очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота на биофильтрах»** на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.4. «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» используются:

- в учебном процессе при проведении лекционных и практических занятий по курсам «Химия воды и микробиология систем водоснабжения и водоотведения», «Инженерные системы строительной науки» читаемых для профиля «Водоснабжение и водоотведения» направления подготовки 08.03.01 «Строительство»;

- в курсовом и дипломном проектировании при подготовке студентов по профилю «Водоснабжение и водоотведения» направления подготовки 08.03.01 «Строительство».

Проректор по образовательной
 деятельности



Л.В. Куклина

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Список публикаций автора по теме диссертационного исследования

Статьи, опубликованные в научных журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Февральских (Лыкова), О. В. Биофильтры, их преимущества и недостатки / О. В. Февральских (Лыкова), Е. С. Гогина // Вестник МГСУ. – 2009. – № S1.
2. Февральских (Янцен), О. В. Исследование гидродинамических характеристик биофильтра для плоскостного загрузочного материала / О. В. Февральских (Янцен) // Вестник МГСУ. – 2010. – № 2. – С. 144–148.
3. Макиша, Н. А. Гидравлическое моделирование и исследование процессов очистки сточных вод на биофильтрах с использованием плоскостной загрузки / Н. А. Макиша, О. В. Февральских (Янцен) // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 11 (94). – С. 171–175.
4. Февральских (Янцен), О. В. Глубокая очистка сточных вод от соединений азота на биофильтрах / О. В. Февральских (Янцен) // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 9. – С. 64–69.
5. Февральских (Янцен), О. В. Современные решения по реконструкции малых канализационных очистных сооружений: конструкции и расчет / О. В. Февральских (Янцен) // Водоснабжение и санитарная техника. – 2019. – № 9. – С. 57–61.
6. Февральских (Янцен), О. В. Перспективные методы очистки сточных вод в туристических зонах / О. В. Февральских (Янцен), Е. С. Гогина // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2022. – № 2 (38). – С. 72–80. – DOI 10.21869/2311-1518-2022-38-2-72-80.

7. Февральских (Янцен), О. В. Технология очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах / О. В. Февральских (Янцен), Е. С. Гогина // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 12. – С. 60–64.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах:

8. Gogina, E. Research of biofilter feed properties / E. Gogina, O. Fevral'skikh (Yantsen) // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, No 24. – P. 44070–44074.
9. Gogina, E. Intensification of nitrogen compound removal process from waste waters by biofilters / E. S. Gogina, O. V. Fevral'skikh (Iantcen), O. A. Ruzhickaia, V. Dabrowski, R. Zhilka & D. Boruzhko // Water and Ecology. – 2016. – № 3 (67). – P. 35–45.
10. Zylka, R. Trickling filter for high efficiency treatment of dairy sewage / R. Zylka, W. Dabrowski, E. Gogina, O. Fevral'skikh (Yancen) // Journal of Ecological Engineering. – 2018. – Vol. 19, No 4. – P. 269–275.
11. Bobyleva, T. N., Shamaev A. S., Fevral'skikh (Yantsen) O. V. A Mathematical Model of a Wastewater Treatment Filter Using Biofilms / T. N. Bobyleva, A. S. Shamaev, O. V. Yantsen // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2023. – Vol. 17, No 2. – P. 251–259.

Публикации в прочих изданиях:

12. Makisha, N. Laboratory Modeling and Research of Waste Water Treatment Processes in Biofilters with Polymer Feed / N. Makisha, O. Fevral'skikh (Yantsen) // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 587. – P. 640–643.
13. Февральских (Янцен), О. В. Исследование процессов очистки сточных вод на биофильтрах с использованием аэробных и анаэробных зон / О. В. Февральских (Янцен) // Яковлевские чтения : сб. докл. X науч.-техн.

- конф., посвящ. памяти акад. РАН Сергея Васильевича Яковлева, Москва, 16 марта 2015 г. – М.: АСВ, 2015. – С. 238–241.
14. Февральских (Янцен), О. В. Технологическая схема очистки сточных вод с применением биофильтров с зонами с различным кислородным режимом / О. В. Февральских (Янцен) // Материалы межрегиональной научной конференции X Ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых, Вологда, 23 ноября 2016 г. : в 4 т. / Министерство образования и науки Российской Федерации ; Вологодский государственный университет. – Вологда : Вологодский гос. ун-т, 2016. – С. 241–244.
15. Февральских (Янцен), О. В. Интенсификация процесса очистки сточных вод от аммонийного азота на биофильтрах / О. В. Февральских (Янцен), Е. С. Гогина // Яковлевские чтения : сб. докл. XI науч.-техн. конф., посвящ. памяти акад. РАН Сергея Васильевича Яковлева, Москва, 16 марта 2016 г. – М. : АСВ, 2016. – С. 191–195.
16. Февральских (Янцен), О. В. Очистка сточных вод от аммонийного азота / О. В. Февральских (Янцен), Е. С. Гогина // Энергоэффективные технологии водоснабжения и водоотведения : сб. докл. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 27 апреля 2016 г. / Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – М. : Национ. исслед. Моск. гос. строит. ун-т, 2016. – С. 120–124.
17. Февральских (Янцен), О. В. Современные методы очистки хозяйственно-бытовых сточных вод на биофильтрах / О. В. Февральских (Янцен) // Вода Magazine. – 2017. – № 7 (119). – С. 14–17.
18. Гогина, Е. С. Технологическая схема очистки сточных вод на биофильтрах с четырьмя чередующимися зонами с различным содержанием кислорода / Е. С. Гогина, О. В. Февральских (Янцен), Т. Н. Бобылева // Яковлевские чтения : сб. докл. XII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти акад. РАН С. В. Яковлева, Москва, 15–17 марта

- 2017 г. / Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – М. : Национ. исслед. Моск. гос. строит. ун-т, 2017. – С. 256–261.
19. Гогина, Е. С. Разработка методики гидравлического и математического моделирования процессов глубокой очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах / Е. С. Гогина, О. В. Февральских (Янцен), Т. Н. Бобылева // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 9. – С. 41–47.
20. Gogina, E. Modeling of processes of wastewater treatment from nitrogen compounds in the trickling biofilter / E. Gogina, O. Fevralskikh (Yantsen) // MATEC Web of Conferences, Moscow, November 14–16, 2018. – Moscow : EDP Sciences, 2018. – P. 03041. – URL: Modeling of processes of wastewater treatment from nitrogen compounds in the trickling biofilter (matec-conferences.org) (дата обращения: 28.08.2024).
21. Gogina, E. Energy-efficient solutions for household wastewater treatment using biofilters / E. Gogina, O. Fevralskikh (Yantsen) // E3S Web of Conferences : 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent, April 18–21, 2019. – Tashkent : EDP Sciences, 2019. – P. 01021. – URL: Energy-efficient solutions for household wastewater treatment using biofilters (e3s-conferences.org) (дата обращения: 28.08.2024).
22. Февральских (Янцен), О. В. Реконструкция городских очистных сооружений малой производительности до нормативов НДТ / О. В. Февральских (Янцен), А. П. Сторожев, В. А. Герасимов // Сборник докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня образования факультета водоснабжения и водоотведения МИСИ-МГСУ, Москва, 24–25 октября 2019 г. – М. : Национ. исслед. Моск. гос. строит. ун-т, 2019. – С. 121–129.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024668766

**«Программа для расчета капельного биофильтра,
работающего в режиме нитрификации с загрузочным
материалом цилиндрической формы «BiofilterWTN»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Научно-исследовательский институт
строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук» (RU)**

Авторы: **Февральских Ольга Викторовна (RU), Февральских
Андрей Владимирович (RU), Гогина Елена Сергеевна (RU)**

Заявка № 2024665914

Дата поступления 09 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 августа 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов