

На правах рукописи

Февр -

Февральских Ольга Викторовна

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

2.1.4. Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Гогина Елена Сергеевна**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Павлинова Ирина Игоревна**
доктор технических наук, профессор,
начальник «Центра подготовки
по профстандартам»
АО «МОСВОДОКАНАЛСТРОЙТРЕСТ»

Вильсон Елена Владимировна
кандидат технических наук, доцент,
заместитель генерального директора
по научно-образовательной работе
ООО «НИЦ ЭКОСТЕХ»

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Защита состоится 23 декабря 2024 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. 200

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте https://24237705.samgtu.ru/uploads/redactor/fevralskyikh_diss.pdf

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тупицына Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Rabhani, 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 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 план 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 анаэробными (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.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость исследования, перечислены основные научные и практические результаты, публикации по теме, объем и структура работы.

В первой главе изложен анализ различных конструктивных особенностей биофильтров, принцип работы и перспективы применения рассматриваемых сооружений для глубокой биологической очистки бытовых сточных вод от соединений азота с учетом протекания процессов нитрификации-денитрификации.

Большое внимание уделено обзору современных загрузкиочных материалов, отмечается, что наиболее эффективным материалом для загрузки биофильтров являются полимерные элементы.

Литературный обзор показал, что применение принципов денитрификации-нитрификации на биофильтрах встречается крайне редко и процессы, происходящие при этом, недостаточно изучены. Таким образом, рационально разработать технологические схемы с использованием биофильтров, работающих в режиме денитрификации-нитрификации, которые смогут обеспечить показатели очищенной сточной воды для сброса ее в водные объекты рыбохозяйственного назначения.

Во второй главе описаны исследования характеристик загрузкиочного материала, в ходе которых был осуществлен выбор загрузкиочного материала для дальнейшего проведения эксперимента, и экспериментальные методы исследования, ход и результаты лабораторных и полупроизводственных экспериментов на модельной жидкости и реальной сточной воде.

Прежде всего был осуществлен выбор загрузки для проведения эксперимента. Загрузочный материал располагался в модели классического капельного биофильтра, работающего с рециркуляцией возвратного потока очищенной сточной воды с содержанием нитратов (нитратной воды). Результаты, полученные в ходе исследований различных загрузкиочных материалов, представлены в табл. 1. Иловый индекс определялся путем смыва биомассы напором водопроводной воды с поверхности загрузкиочного материала и дальнейшего отстаивания полученной иловой смеси в цилиндре.

Таблица 1

Результаты исследования загрузкиочных материалов

Загрузка	1	2	3	4
Внешний вид				
Эффективность удаления NH_4^+	25,0 %	60,8 %	43,3 %	70,4 %
Доза биомассы	0,72 г/л	0,23 г/л	0,61 г/л	0,72 г/л
Иловый индекс	78,0 $\text{см}^3/\text{г}$	65,0 $\text{см}^3/\text{г}$	38,0 $\text{см}^3/\text{г}$	44,0 $\text{см}^3/\text{г}$
Толщина слоя биопленки	До 4 мм	До 2 мм	До 1 мм	До 2 мм

На первом этапе исследовалась лабораторная модель по схеме А с двумя зонами биофильтрации, работающая в стандартном режиме и в режиме с рециркуляцией с загрузочными материалами № 2 и 3. Гидравлическая нагрузка составила 2,52 м³/(м³·сут). Технологическая схема, работающая в стандартном режиме, не обеспечивала необходимой степени очистки по БПК₅, а также наблюдалось образование вторичного загрязнения по N-NH₄. В режиме работы установки с рециркуляцией отмечается достаточно высокая эффективность удаления органических загрязнений – 90,9 %, однако максимальная окислительная мощность по азоту аммонийному при этом составляла 39,03 г/(м³·сут), также при эксплуатации лабораторной модели не отмечалось протекания процессов денитрификации. На основе анализа полученных результатов рационально рассмотреть работу пилотных установок со снижением гидравлической нагрузки.

На втором этапе исследовалась лабораторная модель, работающая по схеме Б с четырьмя зонами биофильтрации. В данной пилотной модели первой и третьей зоной биофильтрации являлся реактор, изолированный от поступления кислорода воздуха.

Второй этап также был разбит на подэтапы, в которых исследовались пилотные установки с рециркуляцией возвратной очищенной (нитратной) воды в объеме 100 % и без, с разным соотношением зон денитрификации (аноксидная либо анаэробная зона) и нитрификации (аэробная зона).

На подэтапе 2.1 установки работали в стандартном режиме, наблюдалось образование вторичного загрязнения по соединениям азота. Эффективность удаления соединений азота низкая. На подэтапе 2.2 работали пилотные установки с рециркуляцией нитратной воды в объеме 100 %. Технологические показатели и результаты работы пилотных установок на подэтапе 2.2 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические показатели и результаты работы пилотных установок на подэтапе 2.2

№	Загрузка	Гидравлическая нагрузка, м ³ /(м ³ ·сут)	Соотношение зон, %	Эффективность удаления, %		ОМ, г/(м ³ ·сут)	
				БПК ₅	N-NH ₄	БПК ₅	N-NH ₄
2.1	№ 3	1,23	50 и 50	96,84	97,27	123,73	27,61
2.2-1	№ 2 и 3	1,23	50 и 50	96,64	98,77	101,43	30,57
2.2-2	№ 2 и 3	0,88	50 и 50	97,59	99,45	77,10	22,16
2.3	№ 2	1,64	25 и 75	82,44	77,01	121,9	26,81

Наиболее высокую эффективность показала работа установок № 2.2-1 и 2.2-2, на выходе очищенная вода имела следующие концентрации: по азоту

аммонийному – 0,14 мг/л, по нитритам – 0,024 мг/л, по нитратам – 6,62 мг/л, по БПК₅ – 2,16 мг/л.

Во всех пилотных установках, работающих в режиме с рециркуляцией нитратной воды, на первой ступени происходит снижение основного содержания легкоокисляемых органических веществ, которое также продолжается на второй ступени. Удаление основной массы азота аммонийного проходило на второй ступени.

Полученные данные свидетельствуют о том, что на второй ступени проходил процесс денитрификации. Следует отметить, что условия для прохождения денитрификации-нитрификации на второй ступени достаточно нестандартные и характеризуются низким содержанием БПК₅ (рис. 2). Соотношение БПК₅/N-NH₄ составляет 1,4–1,5.

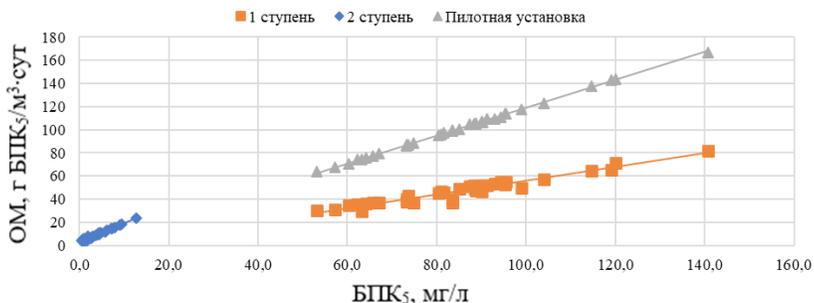


Рисунок 2. Зависимость окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений в пилотной установке № 2.2-1

Одновременное протекание процессов денитрификации-нитрификации связано с тем, что в слое биопленки находятся органические загрязнения, которые используются биомассой как источник питания. Органические загрязнения в биопленке появляются либо в процессе сорбции, либо вследствие отмирания клеток биомассы. Создание оптимальных условий для эффективной работы прикрепленной биомассы достигается не только за счет создания гидравлического режима, но и за счет «поставки» химически связанного кислорода непосредственно в биопленку. Таким образом, происходит одновременное проведение процессов денитрификации (в глубине биопленки) и нитрификации (на поверхности биопленки).

Для анализа процессов денитрификации используются показатели скорости удаления нитрата, на рис. 3 представлено изменение концентрации нитрата в пилотной установке по времени. Скорость удаления нитрата г определена эмпирически с учетом исследований по определению времени контакта сточной воды с загрузочным материалом. Скорость удаления нитрата для установки № 2.2-1 составит 114 г/(м³·ч).

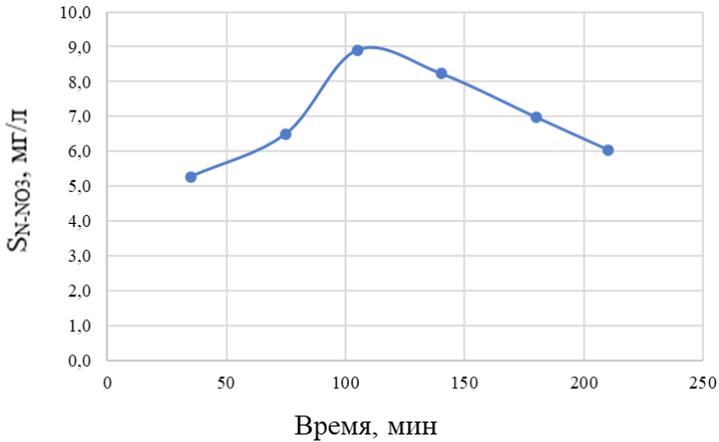


Рисунок 3. Изменение концентрации N-NO₃ в пилотной установке № 2.2-1 в зависимости от времени пребывания

На третьем этапе описан ход проведения и получены результаты исследования, выполненного в полупроизводственных условиях на действующих очистных сооружениях в Московской области (г. Мытищи). Третий этап также разбит на два подэтапа. Этап 3.1 проводился по технологической схеме Б, но уже на реальной сточной воде. Гидравлическая нагрузка составила 0,7 м³/(м³·сут). Этап 3.2 проводился по технологической схеме В с гидравлической нагрузкой 0,6 м³/(м³·сут). Технологические показатели и результаты работы пилотных установок представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технологические показатели и результаты работы пилотных установок третьего этапа

№ этапа	Загрузочный материал	Эффективность удаления БПК ₅ , %	Эффективность удаления N-NH ₄ , %	ОМ, БПК ₅ , г/(м ³ ·сут)	ОМ, N-NH ₄ , г/(м ³ ·сут)
3.1	№ 2 в денитрификаторе, № 3 в нитрификаторе	96,92	99,00	56,96	19,46
3.2	№ 4 в нитрификаторе, № 3 в денитрификаторе	96,41	99,47	46,58	14,72

Основным результатом этого этапа является верификация данных, полученных в лабораторных условиях. Результаты апробации работы установки, работающей на реальной сточной воде, показывают одновременное проведение процессов денитрификации и нитрификации в зонах биофильтрации, что согласуется с результатами лабораторных исследований.

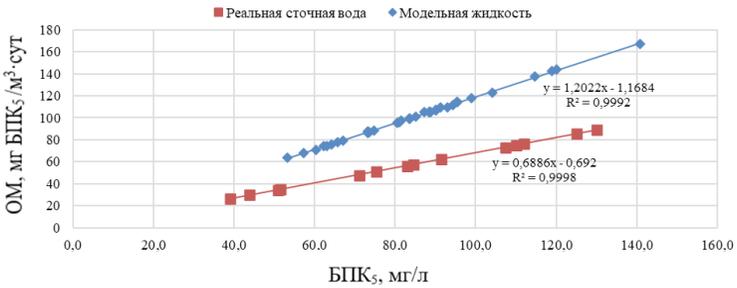


Рисунок 4. Сравнение зависимости окислительной мощности от исходного содержания органических загрязнений для пилотных установок № 2.2-1 и 3.1

Сравнение эффективности снижения азота аммонийного отображено на рис. 5.

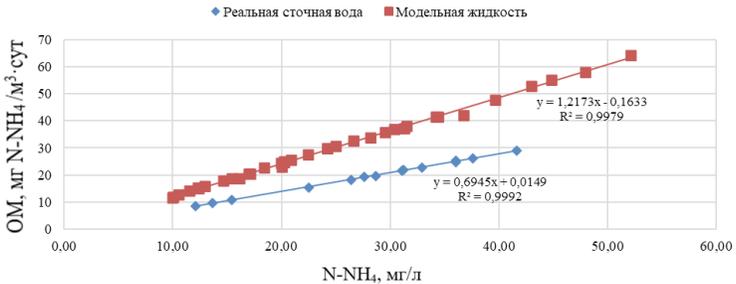


Рисунок 5. Сравнение зависимости окислительной мощности от исходного содержания азота аммонийного для пилотных установок № 2.2-1 и 3.1

Эксперимент на реальной сточной воде показал идентичные результаты с лабораторными исследованиями на искусственно составленной сточной воде. Зависимости (рис. 4, 5) описываются линейной функцией, незначительная разница в эффективности удаления обуславливается разной гидравлической нагрузкой и расходом поступающей сточной воды.

Глубокое удаление соединений азота наблюдается как на технологической схеме с предденитрификацией, так и с постденитрификацией. В то же время промежуточное отстаивание не является обязательным условием для эффективной работы исследуемой технологии.

В третьей главе разработана методика математического моделирования биофильтров для глубокой очистки сточных вод. Расчет биологических фильтров, работающих в режиме денитрификации-нитрификации, состоит из двух частей. Рассчитываются объемы аноксидной и аэробной зон. Расчет аэробной зоны предложен для загрузочных материалов цилиндрической формы. Методика математического моделирования аэробных зон нитрификации в биофильтрах основывается на решении уравнения материального баланса

массы субстрата для относительно неограниченного участка тонкого активного слоя биопленки для загрузочного материала цилиндрической формы (1.1).

$$D_L \left(\frac{\partial^2 L}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial L}{\partial r} \right) - R_L = \frac{\partial L}{\partial t}, \quad (1.1)$$

где:

t – время, час;

r – радиальная координата;

D_L – коэффициент молекулярной диффузии субстрата в биопленке, м²/час;

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

Для расчета скорости реакции R_L при полном отсутствии ингибирующего процесса биоокисления используется уравнение Моно (принимается реакция первого порядка):

$$R_L = \rho = \frac{\rho_T}{K_T + L}, \quad (1.2)$$

где:

ρ_T – скорость окисления, мг/гбв·ч;

K_T – константа полунасыщения, мг $N-NO_3$ /л.

В результате решения уравнения (1.1) получена формула для расчета высоты биофильтра, которая предлагается для использования в процессе проектирования:

$$H = \sqrt{\frac{v}{F_\delta \cdot K_L (1 - A)} \ln \frac{L_0}{L_s}}, \quad (1.3)$$

где:

v – скорость фильтрации, м/час;

F_δ – эффективная площадь контакта очищаемой воды с биопленкой, м²;

L_0 – концентрация загрязнения на входе, мг/л;

L_H – концентрация загрязнения на выходе, мг/л;

K_L – значение коэффициента массопереноса субстрата в жидкой пленке, м/час;

A – параметр, зависящий от величины отношения скорости окисления к константе полунасыщения, коэффициента молекулярной диффузии субстрата в биопленке, толщины биопленки и радиуса загрузки.

На рис. 6 представлена блок-схема расчета зон нитрификации и денитрификации для биофильтра глубокой биологической очистки.

Скорость фильтрации рекомендуется определять в ходе аппроксимации результатов экспериментов с загрузочным материалом степенной функцией.

В зависимости от выбранной технологической схемы полученную высоту по формуле (1.3) следует делить на количество зон нитрификации.

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



Рисунок 6. Блок-схема расчета зон нитрификации и 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, путем увеличения площади поверхности до необходимой гидравлической нагрузки.

Зная время контакта (из экспериментальных данных), необходимое для проведения процесса денитрификации, высоту H_0 , м можно выразить:

$$H_d = \frac{q^\zeta \cdot t_d}{\varepsilon}, \quad (1.4)$$

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:

$$F_0 = k \cdot Q, \quad (1.5)$$

где:

F_0 – 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 $0,4\text{--}0,5 \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$;

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

На основе разработанной математической модели написана компьютерная программа для расчета характеристик биофильтра “BiofilterWTN v1.0”, которая рекомендуется для использования в проектировании технологических схем.

В четвертой главе приведены рекомендации по реконструкции действующих очистных сооружений г. Мытищи и показан экономический расчет по двум сценариям – с использованием биофильтров, работающих в режиме денитрификации-нитрификации, и с применением других реакторов-аэротенков, также работающих в режиме денитрификации-нитрификации.

Произведен поверочный расчет существующих очистных сооружений классическим методом с использованием критериального комплекса, а также проведена проверка произведенного расчета при помощи разработанной автором математической модели. Оба расчета показали идентичные результаты и возможность использования существующих биофильтров для глубокой очистки сточной воды после реконструкции с устройством зон денитрификации и нитрификации. Проведена оценка экономической эффективности реконструкции канализационных очистных сооружений по двум сценариям с учетом капитальных и операционных затрат. Экономический эффект по жизненному циклу при применении схемы с биофильтрами составил 45,6 %.

Также произведен экономический расчет строительства биофильтров при реконструкции канализационных очистных сооружений с. Эльбрус. Рассчитан срок окупаемости строительства биофильтров, работающих в режиме денитрификации-нитрификации, с учетом капитальных и операционных затрат и экономии за счет уменьшения плат за НВОС. Дисконтированный срок окупаемости 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 загрязочной 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 биофильтра – 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, работающего в режиме денитрификации-нитрификации, учитывающая скорость фильтрования, тип загрузочного материала, площадь контакта воды с био пленкой, 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 био пленки, образующейся на био фильтре, 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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 (Yantsen), 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 (Yantsen) // 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. Fevral'skikh (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. Fevral'skikh (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.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.10.2024.
Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 6090.

ООО «Научно-технический центр»
443056 г. Самара, ул. Николая Панова, 50-255
Тел. (846) 336-27-52
E-mail: as_gard@mail.ru