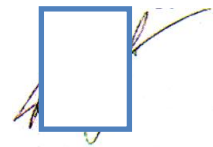


На правах рукописи



АКМЕНТИНА Александра Владимировна

**БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД
В РЕАКТОРЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С ВОСХОДЯЩИМ
ПОТОКОМ**

Специальность 05.23.04 – Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Алексеев Михаил Иванович

Официальные оппоненты: **Залетова Нина Анатольевна**
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет», профессор кафедры
водоотведения и водной экологии

Стрелков Александр Кузьмич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой водоснабжения и водоотведения

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «Вологодский
государственный университет»**

Защита диссертации состоится «27» июня 2017 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/akmentina-aleksandra-vladimirovna>.

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

Пухкал Виктор Алексеевич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Существующая тенденция роста городов и плотности населения требует сокращения объемов и площадей объектов водопроводно-канализационного хозяйства с обеспечением высокого и стабильного качества очистки воды. Таким образом, приоритетным направлением развития современных технологий удаления биогенных элементов является интенсификация биологической очистки сточных вод с одновременным уменьшением экономических и энергетических затрат на ее осуществление. Самый прямой путь повышения удельных показателей эффективности сооружения – повышение концентрации биомассы в биореакторе. Для удержания концентрированной биомассы используется целый ряд современных технологий, таких, как использование мембранных илоразделителей, загрузки для прикрепления биопленки, однако, они существенно удорожают строительство очистных сооружений. Известны альтернативные, более экономичные технологии интенсификации биологической очистки. Одна из них – использование повышенных доз активного ила. В классической схеме «аэротенк – вторичный отстойник» методом направленной селекции можно повысить дозу ила до 6-7 г/л. Однако, эксплуатация сооружений в непрерывно-проточном режиме требует организации пространственной многозонной системы. Замена пространственного распределения технологических зон на временное (реактор циклического действия, SBR-реактор), а также использование гравитационной селекции активного ила на предмет улучшения его седиментационных свойств позволяет существенно сократить площадь и объем, занимаемые биореакторами, совмещающими аэротенк и отстойник, при достижении высоких показателей очищенной воды. Таким образом, выполненная работа направлена на решение актуальной задачи интенсификации процессов очистки сточных вод с минимизацией габаритов сооружений и их стоимости.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в развитие современных методов биологической очистки коммунальных сточных вод внесли исследования ученых ОАО «НИИ ВОДГЕО», ОАО «НИИ КВОВ», ОАО «МосводоканалНИИпроект», АКХ им. Памфилова, ФГБОУ ВО МГСУ, ФГБОУ ВО СПбГАСУ, ФГБОУ ВО СГАСУ и пр. В разное время решениями задачи интенсификации процессов обработки воды занимались такие специалисты, как В.Н. Швецов, Б.Н. Репин, Н.А. Залетова, С.В. Калюжный, М.И. Алексеев, Ю.А. Феофанов, Б.Г. Мишуков, Ю.В. Воронов, А.К. Стрелков, Д.А. Данилович, В.И. Баженов, К.М. Морозова и многие другие.

Целью настоящей работы является разработка технологии интенсификации биологической очистки городских сточных вод путем повышения концентрации активного ила в реакторе циклического действия с восходящим потоком сточной воды.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

– определить условия формирования активного ила, способного эффективно удерживаться в сооружении с восходящим потоком сточной воды;

- получить активный ил с улучшенными седиментационными свойствами для биологической очистки в реакторе циклического действия;
- изучить биохимические и технологические характеристики культивированного активного ила;
- определить эффективность процессов удаления загрязнений в лабораторном и полупромышленном циклических реакторах с восходящим потоком сточной воды;
- определить кинетические параметры активного ила для разработки методики расчетов реакторов циклического действия с восходящим потоком, а также определение зависимости окислительных свойств биомассы активного ила от его размеров;
- разработать рекомендации для проектирования и эксплуатации реакторов циклического действия с восходящим потоком;
- определить технико-экономические показатели биологической очистки городских сточных вод по предлагаемой технологической схеме.

Объектом исследования являлись городские сточные воды Курьяновских очистных сооружений (КОС) г. Москвы.

Предметом исследования является способ интенсификации биологической очистки сточных вод в реакторе циклического действия с восходящим потоком.

Научная новизна

1. Разработана технология аэробной биологической очистки городских сточных вод в реакторе циклического действия с последовательной нитрификацией и восходящим потоком сточной воды, позволяющая достигать качества очистки, соответствующего нормам предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения.

2. Выявлены особенности полученного в условиях гравитационной селекции частично гранулированного активного ила: низкий иловый индекс (40 мл/г), скорость седиментации в 6-7 раз выше, чем у флокулированного активного ила аэротенков, работающих по схеме удаления биогенных элементов УСТ. Применение такого ила позволяет увеличивать дозу активного ила в сооружении до 6-8 г/л и повышать окислительную мощность сооружения в 1,5 – 2 раза.

3. Установлено, что в условиях разработанной технологии культивирование частично гранулированного активного ила происходит за 100 суток при достижении минимальных значений концентраций загрязнений и эффективного удержания биомассы в реакторе. Установлена высокая стабильность и устойчивость работы реактора при нештатных условиях ведения процесса.

4. Определены основные кинетические параметры для разработанной технологии: максимальные скорости нитрификации и денитрификации составляют 2,9 мгN-NH₄/(гАИ·ч) и 2,0 мгN-NO₃/(гАИ·ч) соответственно, константы полунасыщения по кислороду, аммонийному азоту для

нитрификации и азоту нитратов для денитрификации составляют 0,3 мгО₂/л, 0,7 мгN-NH₄⁺/л и 0,2 мгN-NO₃⁻/л соответственно.

5. Разработана методика оценки скоростей нитри-денитрификации в зависимости от размеров гранулированного активного ила.

6. Предложена методика расчета для проектирования реакторов циклического действия с восходящим потоком сточной воды.

7. Обоснована экономическая эффективность применения разработанной технологии по сравнению с другими методами очистки сточных вод.

Теоретическая значимость работы заключается в предлагаемой методике по определению кинетических констант и скоростей процессов биологической очистки городских сточных вод с частично гранулированным активным илом, а также в разработке методик расчета реакторов циклического действия с восходящим потоком и последовательной нитри-денитрификацией.

Практическая ценность

1. Разработан метод культивирования нового вида частично гранулированного активного ила, состоящего из двух слоев – внутренней отмершей части и внешней живой, обладающего пониженным значением илового индекса (до 40 мл/г) и дозой активного ила до 6-8 г/л.

2. Предложена расчетная методика оценки скоростей нитри-денитрификации в зависимости от размеров гранулированного активного ила, которая позволяет использовать ее для прогноза и оптимизации работы реактора.

3. Разработана методика расчета реактора циклического действия с последовательной нитри-денитрификацией и частично гранулированным активным илом для очистки городских сточных вод.

4. Результаты диссертации приняты для использования в проектной практике компании ООО «ВОДАКО». На настоящее время рекомендации для проектирования и методика инженерного расчета использованы при разработке технологической части проекта очистных сооружений пос. Веселая Лопань, Белгородская обл.

Методология и методы исследования. В работе использовались основные положения теории биологической очистки сточных вод и современные тенденции ее развития, современные методики проведения лабораторных и полупромышленных исследований на городских сточных водах, методы математической обработки данных и анализа результатов исследований. В диссертации представлены результаты научно-исследовательских работ, полученные автором лично и в сотрудничестве с научными работниками кафедры водопользования и экологии университета ФГБОУ ВО СПбГАСУ, со специалистами Инженерно-Технологического центра АО «Мосводоканал» и сотрудниками Курьяновских очистных сооружений АО «Мосводоканал».

Положения, выносимые на защиту:

– технология аэробной биологической очистки городских сточных вод в реакторе циклического действия с последовательной нитри-денитрификацией и

восходящим потоком сточной воды, позволяющая достигать качества очистки, соответствующего нормам предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения;

- на основании результатов проведенных экспериментальных исследований установлено, что культивированный частично гранулированный активный ил обладает низким иловым индексом, позволяющим увеличивать дозу активного ила в сооружении до 6-8 г/л и повысить окислительную мощность сооружения в 1,5 – 2 раза;

- показатели времени выхода полупромышленной установки на режим, при котором достигаются минимальные значения концентраций загрязнений и эффективность удержания биомассы в реакторе с установленной высокой стабильностью и устойчивостью реактора с частично гранулированным активным илом при нештатных условиях ведения процесса;

- кинетические константы процессов удаления биогенных элементов в реакторе циклического действия в условиях частично гранулированной биомассы активного ила;

- методика оценки скоростей нитри-денитрификации в зависимости от размеров гранулированного активного ила, позволяющая использовать ее для прогноза и оптимизации работы реактора;

- методика расчета для проектирования реакторов циклического действия с восходящим потоком сточной воды;

- обоснование экономической эффективности применения разработанной технологии по сравнению с другими методами очистки сточных вод.

Область исследования соответствует требованию паспорта научной специальности ВАК 05.23.04 – «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» п. 3 «Методы очистки природных и сточных вод, технологические схемы и конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов».

Достоверность полученных результатов подтверждается значительным объемом и длительностью проведенных лабораторных и полупромышленных экспериментальных исследований на реальных городских сточных водах, сходимостью результатов моделирования с экспериментальными данными, применением стандартизированных методов измерений, обработки и анализов результатов.

Апробация работы и публикации. Материалы диссертационной работы были доложены и опубликованы на 61-64 международной научно-технической конференции молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург (2008-2011гг); на 65-68 научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов, Санкт-Петербург (2008-2011гг); на конгрессе «Вода: экология и технология» - Экватэк-2008; на семинаре молодых ученых и специалистов водного сектора стран СНГ (IWA) «Модернизация сооружений очистки сточных вод» в 2010 г.; на конференции Международной

Водной Ассоциации (IWA) «Водоподготовка и очистка сточных вод населенных мест в XXI веке: Технологии, Проектные решения, Эксплуатация станций» 2010 г, на 1-й Центрально - Азиатской научно-технической конференции IWA «Опыт и молодость в решении водных проблем» Алматы, Казахстан, 22-24 сентября, 2011, на 4-й Восточно-Европейской конференции IWA «Опыт и молодость в решении водных проблем» Санкт-Петербург, Россия, 4-6 октября, 2012, на 5-й Восточно-Европейской конференции IWA «Опыт и молодость в решении водных проблем» Киев, Украина, 26-28 июня, 2013. Результаты работы публиковались в сборниках статей международных конференций Экватэк 2008-2014 гг. и Вейстек 2009-2013 гг.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 16 работах, в том числе 6 статей в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем диссертации. Настоящая работа состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой главе и основных выводов. Диссертация изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 15 таблиц, 49 формул, 62 рисунка, 1 приложение и список использованной литературы, состоящий из 142 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи научных исследований, сформулирована научная новизна и практическая ценность, указаны основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен аналитический литературный обзор современных методов интенсификации процессов биологической очистки сточной воды, таких, как мембранное илоразделение, применение загрузочного материала с прикрепленной биопленкой, технология очистки коммунальных сточных вод с использованием высоких концентраций активного ила (4,5-6,5 г/л), обеспечиваемых методом направленной селекции, гранулированного активного ила. Определены основные достоинства и недостатки представленных технологий. На основе проведенного анализа были сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты исследований биологической очистки коммунальных сточных вод, проведена оценка условий и возможности формирования гранулированных активных илов в лабораторном масштабе, а также определены технологические параметры и особенности процесса очистки коммунальных сточных вод г. Москвы с применением частично гранулированных активных илов.

В третьей главе изложены результаты исследований биологической очистки в реакторе циклического действия с восходящим потоком и последовательной нитри-денитрификацией в полупромышленных условиях, а также оценена стабильность процесса биологической очистки сточных вод при моделировании аварийных ситуаций: 1) при увеличении нагрузки по органическим веществам; 2) при функционировании установки в условиях кислородного дефицита.

В четвертой главе представлены расчет кинетических параметров очистки сточной воды в реакторе циклического действия, а также предложена методика прогнозирования скорости удаления загрязнений в зависимости от величины поверхности и диаметра гранул активного ила.

В пятой главе определены границы применения разработанной технологии, предложена методика расчета для проектирования сооружений, функционирующих по разработанной технологии в реакторе циклического действия с частичной нитри-денитрификацией и с восходящим потоком в условиях частично гранулированного активного ила, даны рекомендации по эксплуатации реакторов с применением предложенной технологии, а также рекомендации по технологическому контролю производства и обслуживанию сооружений; представлен технико-экономический расчет эффективности применения разработанной технологии.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработана технология аэробной биологической очистки городских сточных вод в реакторе циклического действия с последовательной нитри-денитрификацией и восходящим потоком сточной воды, позволяющая достигать качества очистки, соответствующего нормам предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Исследования были проведены в лабораторном реакторе циклического действия (объем 17 л, высота 1,1 м, диаметр 0,14 м). Реактор был оснащен мешалкой (20 об/мин), аэратором и датчиком кислорода. Схема и общий вид лабораторной установки представлены на рисунке 1. За сутки в реактор подавалось 51-68 л сточных вод, гидравлическое время пребывания составляло за цикл 6-8 ч, время одного цикла – 3-4 ч. Исследования проводили при температуре 19-23°C, pH 7-8, концентрации растворенного кислорода во время аэробной стадии 1-2,5 мг/л. Отвод очищенной воды проводился каждый цикл, отвод избыточного активного ила из реактора проводился в конце цикла для поддержания возраста ила не более 25 сут.

Один цикл работы лабораторного реактора состоял из следующих технологических стадий: 1) подача сточной воды восходящим потоком в анаэробных условиях через нижнюю часть реактора (заполнение половины объема реактора), при котором скорость осаждения гранулированного активного ила была больше скорости восходящего потока жидкости в вертикальном направлении. На данной стадии происходило выделение фосфатов в раствор в анаэробных условиях, а также замена жидкой фазы с кислородом и нитратами на исходную воду без кислорода; 2) аноксидное перемешивание иловой смеси (не на всех этапах эксперимента), денитрификация; 3) аэрация, окисление органических веществ, нитрификация, поглощение фосфатов; 4) отстаивание иловой смеси; 5) опорожнение (половина объема реактора); 6) «холостой ход» и отвод избыточного активного ила.

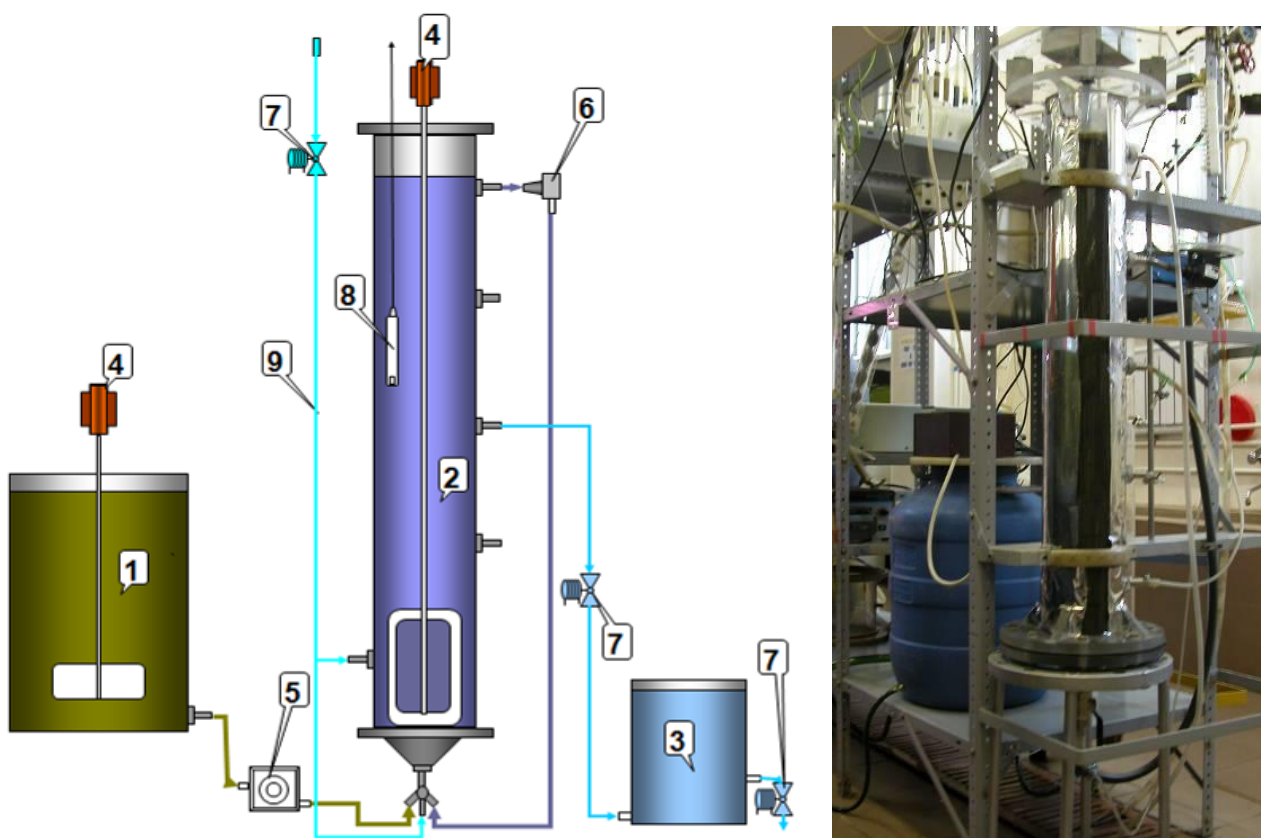


Рисунок 1 – Схема и общий вид лабораторной установки

1 – емкость со сточной водой; 2 – реактор; 3 – накопительная емкость;
4 – электромеханическая мешалка; 5 – перистальтический насос; 6 – центробежный насос;
7 – электромагнитный клапан; 8 –кислородный датчик; 9 – воздух

Накопительная емкость выполняла роль «контрольного» сооружения – в ней оценивали качество очищенной воды после слива из реактора в конце технологического цикла, а также вынос биомассы для определения возраста активного ила. Технологический процесс был полностью автоматизирован. Контроль работы установки осуществлялся на основе стандартных методов анализа. Показатели состава городской сточной воды, подаваемой на очистку в лабораторный реактор, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели поступающей воды

Показатель	БПК ₅	ХПК	Взвешенные вещества	N-NH ₄	P-PO ₄
Значение, мг/л	90-100	230-250	160-180	22-26	1,5-1,7

В начале эксперимента реактор был заполнен смесью осветленной сточной воды и возвратного активного ила из аэротенка Курьяновских очистных сооружений (КОС) с дозой активного ила 3-4 г/л и иловым индексом 110-120 мл/г. В течение эксплуатации реактора циклического действия (продолжительность 180 сут.) было исследовано влияние различных факторов на процесс биологической очистки и культивирование концентрированной биомассы: продолжительность стадий технологического цикла, концентрации растворенного кислорода в течение аэробной стадии, наличие анаксидной стадии (таблица 2).

Таблица 2 – Этапы исследований влияния технологических параметров на процесс очистки сточной воды

Этап	Концентрация кислорода во время аэробной стадии, мг/л	Продолжительность стадий, мин				
		Анаэробная	Аноксидная	Аэробная	Отстаивание	Общее время цикла, час*
1	1-1,5	60	-	120	10	4
2	1,5-2	60	-	120	10	4
3	1,5-2	60	-	120	5	4
4	2-2,5	60	60	120	5	4
5	2-2,5	40	40	90	5	3

*в таблице не представлено время слива очищенной воды – 5 мин и оставшееся время простоя (холостого хода) для всех этапов.

Основной целью эксплуатации реактора циклического действия по этапам №1-5 являлось: 1) достижение минимальных значений концентраций БПК₅, ХПК, форм азота, фосфора-фосфатов; 2) эффективное удержание биомассы в реакторе, т.е. повышенные дозы активного ила, минимально возможный иловый индекс и вынос взвешенных веществ. Исследования показали, что заданным условиям соответствует режим с параметрами, представленными в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры проведения процесса, обеспечивающие эффективную очистку и эффективное удержание активного ила в реакторе

Показатель	Значение
Время цикла, час	3
Гидравлическое время пребывания, час	6
Концентрация растворенного кислорода при аэробной стадии, мг/л	1,5-2,5
Время отстаивания, мин	5-10
Возраст активного ила, сутки	14-25
БПК ₅ выход, мг/л	1,8-3,3
ХПК выход, мг/л	30-45
Взвешенные вещества выход, мг/л	15-45*
N-NH ₄ выход, мг/л	0,2-0,4
N-NO ₂ выход, мг/л	0,02-0,04
N-NO ₃ выход, мг/л	7-9
P-PO ₄ выход, мг/л	0,2-0,4

*в период селекции активного ила, продолжавшегося в течение первых 30 суток с момента запуска реактора, данный показатель находился на уровне 200-300 мг/л.

При эксплуатации реактора на этапах №1-3 (без аноксидной стадии) в течение 130 суток наличия плотных, сферических гранул в биомассе обнаружено не было, соответственно денитрификации во внутренних слоях гранул в присутствии кислорода в течение аэробной стадии не происходило – концентрация азота нитратов в очищенной воде была более 15 мг/л. Удаление нитратов во время анаэробной стадии также не происходило, т.к. органическое вещество потреблялось на выделение фосфатов, а нитраты вытеснялись межфлокульной водой. При этом, эксплуатация реактора при пониженных концентрациях кислорода отличалась нестабильным процессом нитрификации до концентраций аммонийного азота в очищенной воде 4-6 мг/л. Отсутствие

гранул ила было связано с кислородным режимом – для срезающих усилий необходима была более интенсивная аэрация, которая при симультанной нитри-денитрификации приводила бы к насыщению кислородом иловой смеси и неэффективному удалению азота нитратов. Для обеспечения качества очищенной воды по азоту нитратов, на этапах №4-5 было произведено включение анаэробной стадии в цикл работы реактора перед аэробной стадией (в литературе такой прием очистки воды с применением восходящего потока сточных вод описан не был).

Биологическое удаление фосфора на всех этапах проведения эксперимента было реализовано за счет подачи сточной воды через слой активного ила, в результате чего, поступающая вода вытесняла межиковую воду с нитратами и растворенным кислородом вверх. При этом делалось возможным функционирование на анаэробной стадии фосфат-аккумулирующих организмов (ФАО).

2. Выявлены особенности полученного в условиях гравитационной селекции частично гранулированного активного ила: низкий иловый индекс (40 мл/г), скорость седиментации в 6-7 раз выше, чем у флокулированного активного ила аэротенков, работающих по схеме удаления биогенных элементов УСТ. Применение такого ила позволяет увеличивать дозу активного ила в сооружении до 6-8 г/л и повышать окислительную мощность сооружения в 1,5 – 2 раза.

В результате эксплуатации реактора к 180 сут. доза активного ила возросла с 4 г/л до 8-10 г/л. Величина илового индекса последовательно снижалась в течение всего времени эксперимента с начальных значений 100-110 мл/г до 40-50 мл/г (рисунок 2).

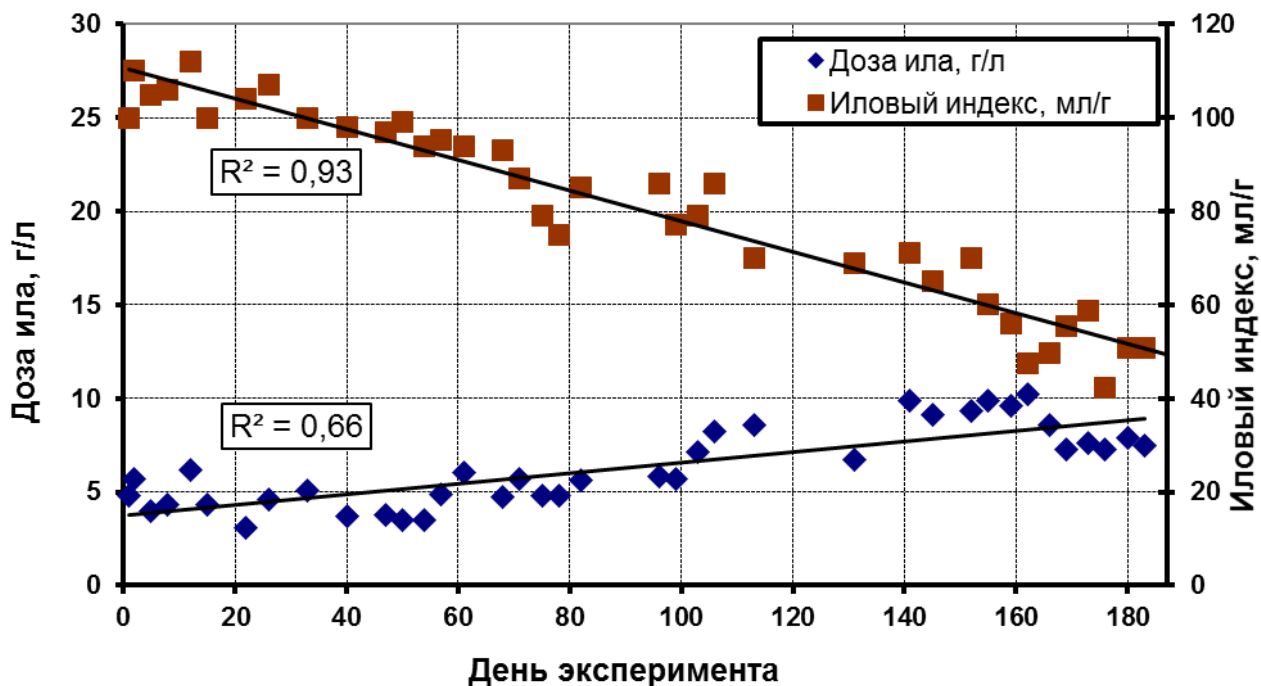


Рисунок 2 – Динамика дозы ила и илового индекса

Скорость осаждения активного ила увеличилась с 2 м/ч в начале проведения лабораторных исследований до 12 м/ч (для отдельных гранул до 20-

25 м/ч) к моменту формирования гранул – т.е. в 6-7 раз выше, чем у активного ила из аэротенков московских очистных сооружений, работающих по технологической схеме удаления биогенных элементов Кейптаунского университета (University of Cape Town - UCT) и в 2 раза ниже, чем у гранулированного ила, полученного при опытах на синтетической сточной воде иностранными исследователями (25 м/ч).

Исследование морфологических свойств активного ила в течение всего времени проведения экспериментов показало, что в лабораторном реакторе циклического действия в условиях коммунальных сточных вод под воздействием гравитационной селекции произошло формирование частично гранулированного аэробного активного ила с диаметром гранул до 1 мм (рисунок 3). Начиная со 160-го дня проведения лабораторных исследований были визуальны зафиксированы полноценные гранулы активного ила диаметром до 1,5 мм, отличавшиеся от основной массы ила ровными краями и округлой формой (рисунок 3 А, Б, В). Далее наблюдалось замедление роста диаметров гранул от 1,3 до 1,5 мм, что можно объяснить наличием внутри их ядра мертвой массы (рисунок 3 Г) и активным выделением газообразных продуктов, приводящих к уменьшению прочности гранулы и ее последующему разрушению. Такой тип гранул отличается от ранее описанных для реакторов с симультанной нитри-денитрификацией, в которых гранулы имели выраженные слои и не имели мертвой биомассы в сердцевине.

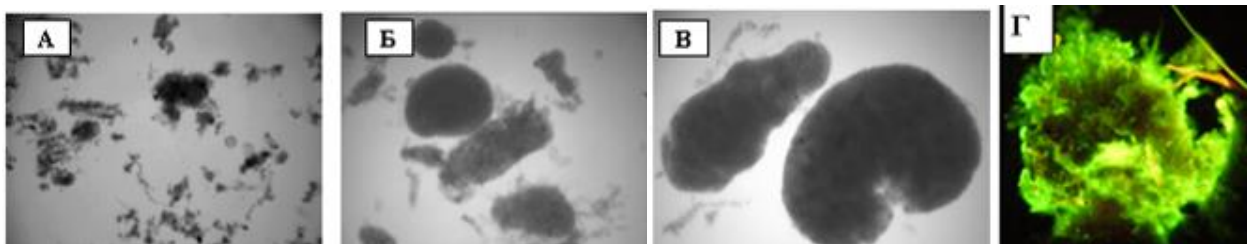


Рисунок 3 – Изменение формы флоккул активного ила

А – начало эксперимента (увеличение $\times 150$); Б – 180 день эксперимента (увеличение $\times 150$); В – 180 день эксперимента (увеличение $\times 300$); Г - гранула активного ила, окрашенная красителем LIVE/DEAD на 180 день эксперимента ($\times 300$) - светлая область гранулы – «живые» бактерии, темная - «мертвые»

В отличие от исследований зарубежных ученых, проведенных на синтетической сточной воде, в которых достигалась доля гранул в иле до 80%, полученные в данной работе в лабораторных исследованиях гранулы на городских сточных водах занимали к концу эксперимента до 20% по объему от общего количества активного ила.

В условиях сформированной частично гранулированной биомассы происходило эффективное удаление загрязнений из сточной воды (таблица 3). Реализованный в конструкции биореактора технологический прием с восходящим потоком позволил обеспечить эффективное функционирование ФАО в присутствии нитрата до концентраций 0,2-0,4 мг/л на выходе. В условиях применения гравитационной селекции, направленной на улучшение седиментационных свойств, и увеличения дозы активного ила, окислительная

мощность реактора увеличилась по ХПК с 240-450 гХПК/(м³·сут) до 750-950 гХПК/(м³·сут), а по аммонийному азоту с 70-80 гN-NH₄/(м³·сут) до 110-120 гN-NH₄/(м³·сут) (рисунок 4).

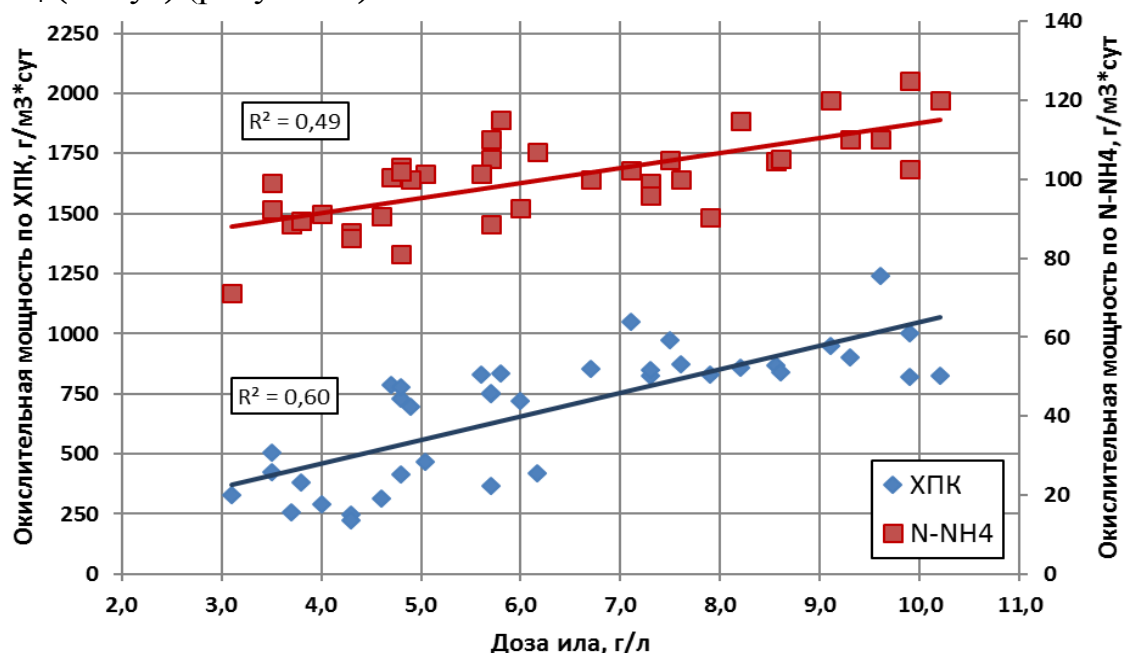


Рисунок 4 – Зависимость окислительной мощности по ХПК и N-NH₄ от дозы активного ила

Проведенные лабораторные исследования показали, что при очистке городских сточных вод в реакторе циклического действия происходит формирование быстрооседающего частично гранулированного активного ила, позволяющего повышать дозу ила в системе в 2-3 раза и эффективно проводить биологическую очистку сточных вод. На основе полученных результатов в лабораторных условиях была осуществлена их проверка на полупромышленной установке.

3. Установлено, что в условиях разработанной технологии культивирование частично гранулированного активного ила происходит за 100 суток при достижении минимальных значений концентраций загрязнений и эффективного удержания биомассы в реакторе. Установлена высокая стабильность и устойчивость работы реактора при нештатных условиях ведения процесса.

Исследования были проведены на полупромышленном реакторе циклического действия (объем 100 л, высота 1,7 м, диаметр 0,27 м) с восходящим потоком на сточной воде КОС. Схема и принцип работы реактора был аналогичен лабораторному. Технологическая схема полупромышленной установки представлена на рисунке 5. Продолжительность технологических стадий одного цикла работы реактора составляла: анаэробной – 60 мин., аноксидной – 60 мин., аэробной – 90 мин., отстаивания – 10 мин., время опорожнения (половина объема реактора) составляло 20 мин. За сутки в реактор подавалось 240 л сточных вод, среднее время пребывания составило 8 ч, время цикла – 4 часа. Средняя температура составила 20-23°C, pH – 7-8. Концентрация растворенного кислорода в течение аэробной стадии составляла 1,5-2,5 мг/л. Продолжительность экспериментов составляла 140 суток.

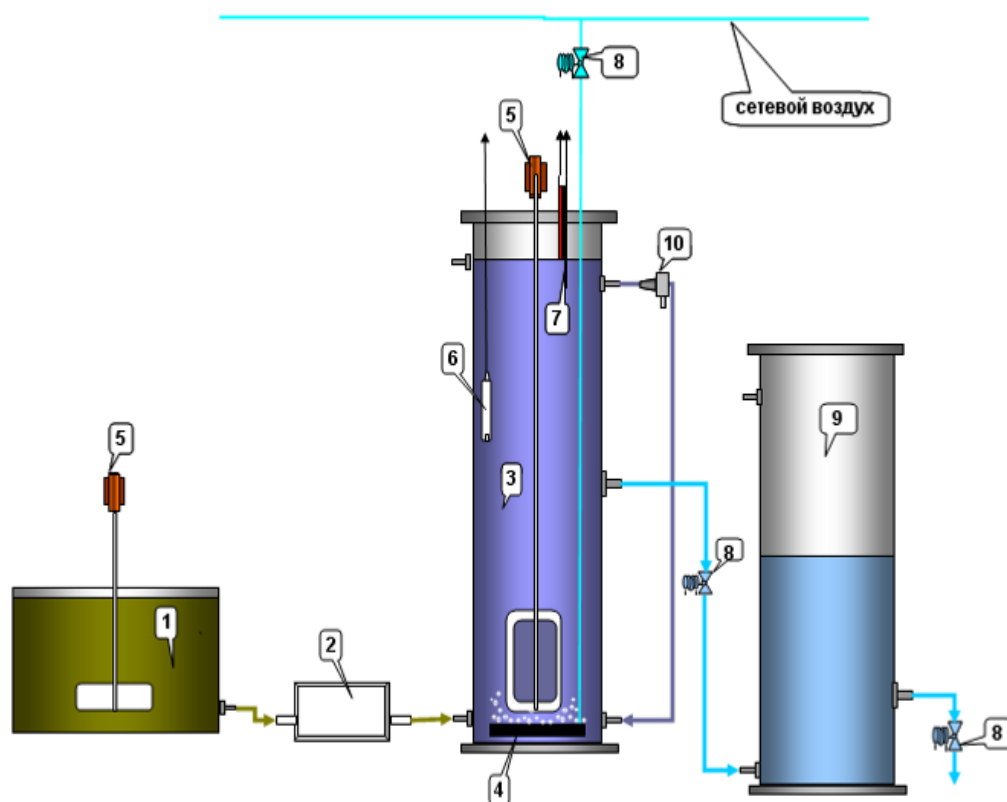


Рисунок 5 – Технологическая схема установки

1 – приемный резервуар; 2 – насос; 3 – реактор; 4 – аэратор; 5 – магнитная мешалка; 6 – кислородный датчик; 7 – датчик уровня; 8 – электромагнитный клапан; 9 – накопительная емкость; 10 – циркуляционный насос

Показатели состава поступающей и очищенной воды за все время проведения экспериментов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели поступающей и очищенной воды

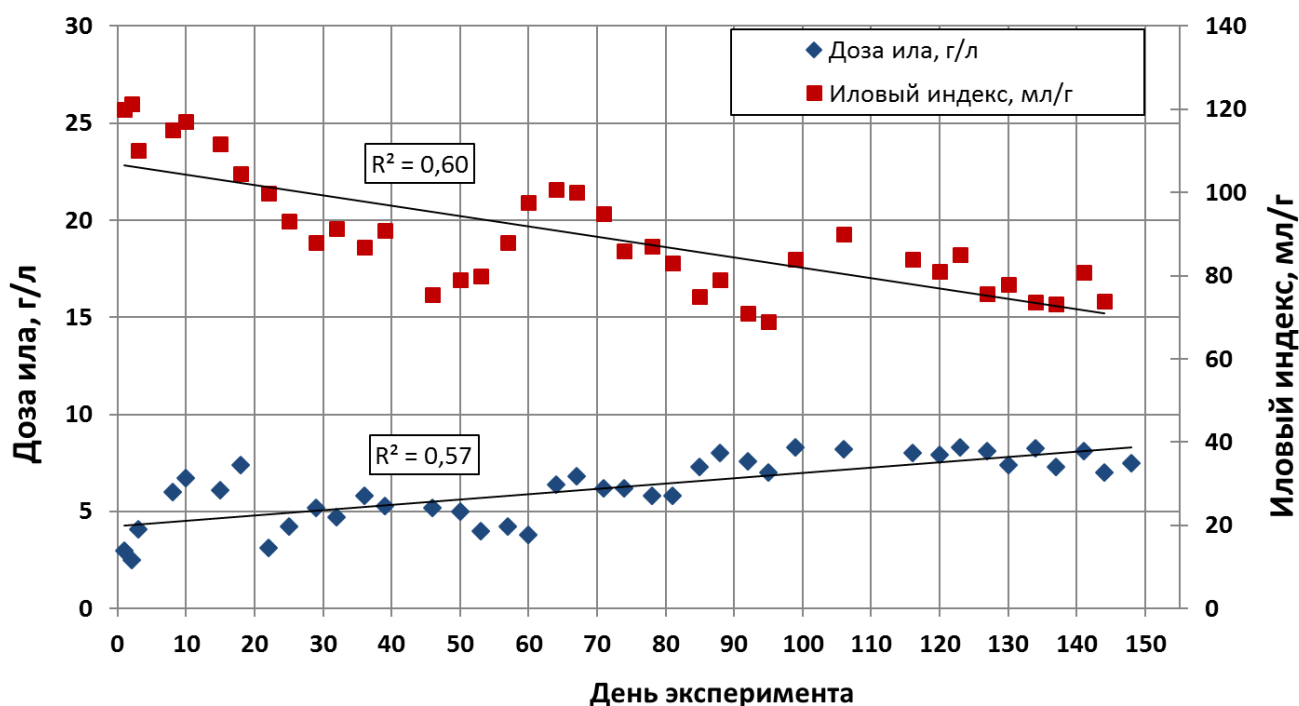
Показатель	Поступающая вода, мг/л	Очищенная вода, мг/л		
		Режим последовательной нитри-денитрификации (Этап №1) 100 сут.	Режим с увеличенной нагрузкой по ХПК (Этап №2) 20 сут.	Режим с кислородным дефицитом (Этап №3) 20 сут.
БПК ₅	60-90 (150-180)*	2-3,5	2,5-5	15-40
ХПК	150-200 (300-350)*	40-55	40-60	80-120
Взвешенные вещества	100-150	20-50**	20-50	25-61
N-NH ₄	18-26	0,2-0,4	0,5-1,5	12-16
N-NO ₂	-	0,02-0,04	0,1-0,3	0,2-2
N-NO ₃	-	7,2-9,1	6-9,1	6-8
P-PO ₄	1,4-2,3	0,2-0,35	0,1-0,2	1-1,5

* в скобках указано значение параметра в условиях увеличенной нагрузки по ХПК (этап №2).

**в период селекции активного ила данный показатель находился на уровне 100-200 мг/л.

В начале эксперимента полупромышленный реактор был заполнен осветленной сточной водой и активным илом из аэротенков КОС с дозой 3 г/л и

иловым индексом 120 мл/г. За время эксплуатации полупромышленного реактора, как и в случае лабораторных опытов, был получен быстрооседающий активный ил, характеризующийся повышенной скоростью осаждения - с начала запуска скорость осаждения активного ила увеличивалась с 1 до 11 м/ч. При эксплуатации отмечалось стабильное снижение илового индекса: со 120 мл/г до 75 мл/г; доза ила увеличилась с 3-5 г/л до 7-8 г/л (рисунок 6).



К 100-му дню проведения эксперимента был визуально зафиксирован укрупненный быстрооседающий частично гранулированный (на 20% от сухого вещества биомассы) активный ил (рисунок 7).

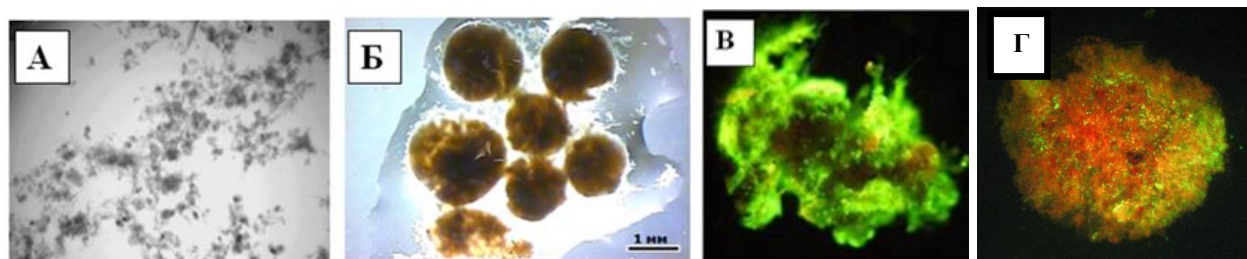


Рисунок 7 – Гранулированный активный ил, культивированный в полупромышленном реакторе

А – начало эксперимента (увеличение $\times 100$); Б – 100 день эксперимента (увеличение $\times 150$); В, Г - Микрофотография гранулы активного ила, окрашенной красителем LIVE/DEAD на 100 день эксперимента ($\times 300$) - зеленая область биомассы – «живые» бактерии, красная - «мертвые»

После формирования гранулированной биомассы в реакторе было отмечено стабильное эффективное протекание всех целевых процессов – удаления органических и взвешенных веществ, нитри-денитрификации и биологического удаления фосфора (таблица 4).

Для оценки стабильности процесса биологической очистки воды частично гранулированным илом были проведены эксперименты с увеличенной нагрузкой по ХПК: в емкость с поступающей сточной водой добавляли раствор ацетата натрия (43,12 г/л $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Продолжительность эксперимента составила 20 суток. Концентрация ХПК в поступающей воде была увеличена до 300-350 мг/л. Концентрации загрязнений в очищенной воде составляли: N-NH_4 в течение 4-х суток до 1,5 мг/л, далее не превышала 0,5 мг/л, ХПК – не более 60 мг/л, БПК₅ – не более 5 мг/л. Таким образом, при резком повышении органических загрязнений в поступающей воде, частично гранулированный активный ил адаптируется через 4 суток.

Режим с дефицитом кислорода моделировали путем отключения подачи воздуха в реактор в течение 3-х суток. Полученные данные о реакции дыхательной активности гранулированного активного ила при отключении подачи воздуха показали, что культивируемая биомасса устойчива к полному дефициту кислорода – гетеротрофная и нитрификационная активность биомассы снизилась не более 30% от первоначальных значений. Это явление носит обратимый характер, так как после возобновления подачи воздуха через 7 суток дыхательная активность достигла первоначальных значений.

Таким образом, проведенные эксперименты в полупромышленном масштабе подтвердили устойчивость процесса биологической очистки городских сточных вод по разработанной технологии с помощью частично гранулированной биомассы, а также выявили высокую стабильность работы системы в нештатных условиях ведения процесса.

4. Определены основные кинетические параметры для разработанной технологии: максимальные скорости нитрификации и денитрификации составляют 2,9 мгN-NH₄/(гАИ·ч) и 2,0 мгN-NO₃/(гАИ·ч) соответственно, константы полунасыщения по кислороду, аммонийному азоту для нитрификации и азоту нитратов для денитрификации составляют 0,3 мгO₂/л, 0,7 мгN-NH₄⁺/л и 0,2 мгN-NO₃⁻/л соответственно.

Для частично гранулированной биомассы с использованием зависимости Михаэлиса-Ментен (формулы 1, 2) были рассчитаны максимальные скорости нитрификации и денитрификации, которые составили значения $\rho_{\max N} = 2,9 \text{ мгN-NH}_4/(\text{гАИ} \cdot \text{ч})$ и $\rho_{\max D} = 2,0 \text{ мгN-NO}_3/(\text{гАИ} \cdot \text{ч})$ соответственно.

$$\rho_N = \rho_{\max N} \cdot \exp[\chi(T - 20)] \cdot \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{S,O_2}} \cdot \frac{S_{N-NH_4}}{S_{N-NH_4} + K_{S,NH_4}}, \quad (1)$$

$$\rho_D = \rho_{\max D} \cdot \exp[\chi(T - 20)] \cdot \frac{S_{N-NO_3}}{S_{N-NO_3} + K_{S,NO_3}}, \quad (2)$$

где ρ_N – скорость нитрификации, мгN-NH₄/(гАИ·ч); T – температура поступающих на очистку сточных вод, °C; χ – температурная константа, °C⁻¹; S_{O_2} – концентрация растворенного кислорода, мг/л; K_{S,O_2} – константа полунасыщения по кислороду, мгO₂/л; S_{N-NH_4} – концентрация аммонийного азота, мг/л; K_{S,NH_4} – константа полунасыщения по аммонийному азоту, мгN-NH₄⁺/л; ρ_D – скорость денитрификации, мгN-NO₃/(гАИ·ч); S_{N-NO_3} –

концентрация нитратного азота, мг/л; K_{S,NO_3} – константа полунасыщения по нитратному азоту, мгN- NO_3^- /л.

Константа полунасыщения по кислороду была определена методом двойных обратных величин в координатах Лайнуивера-Берка и составила $K_{S,O_2} = 0,3$ мг O_2 /л (рисунок 8).

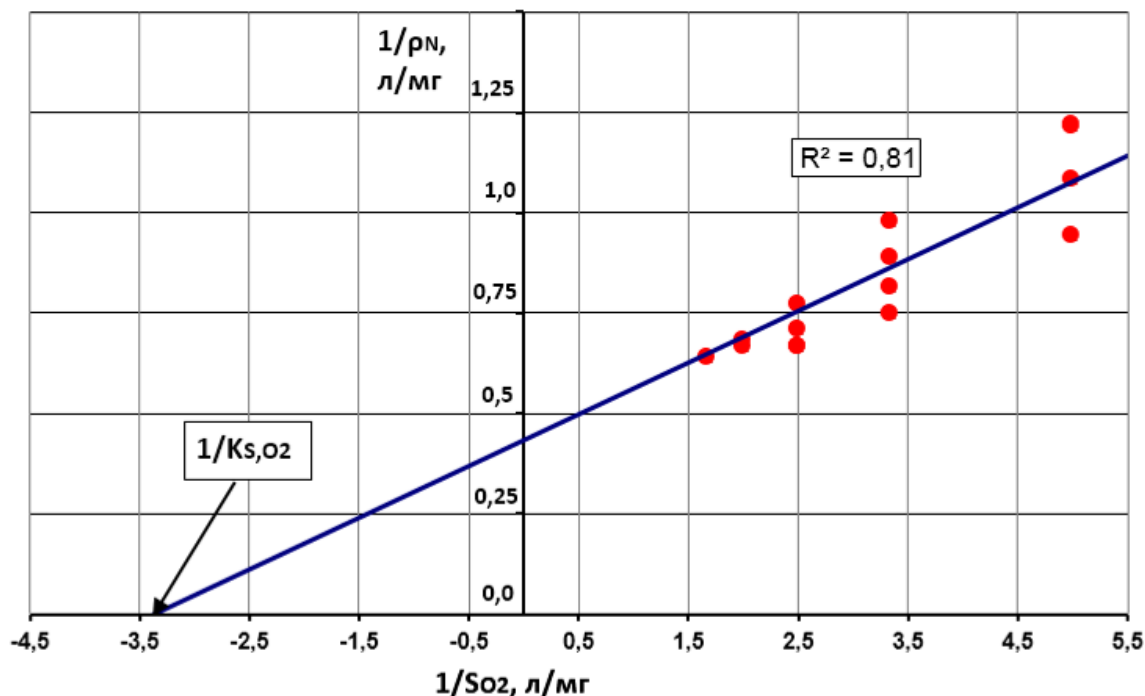


Рисунок 8 – Определение константы полунасыщения по кислороду

Константы полунасыщения по аммонийному азоту для нитрификации и нитратному азоту для денитрификации были определены методом интегрированного уравнения Михаэлиса-Ментена в координатах Фостера-Ниманна (рисунок 9, 10) и составили следующие значения: $K_{S,NH_4} = 0,7$ мгN- NH_4^+ /л, $K_{S,NO_3} = 0,2$ мгN- NO_3^- /л.

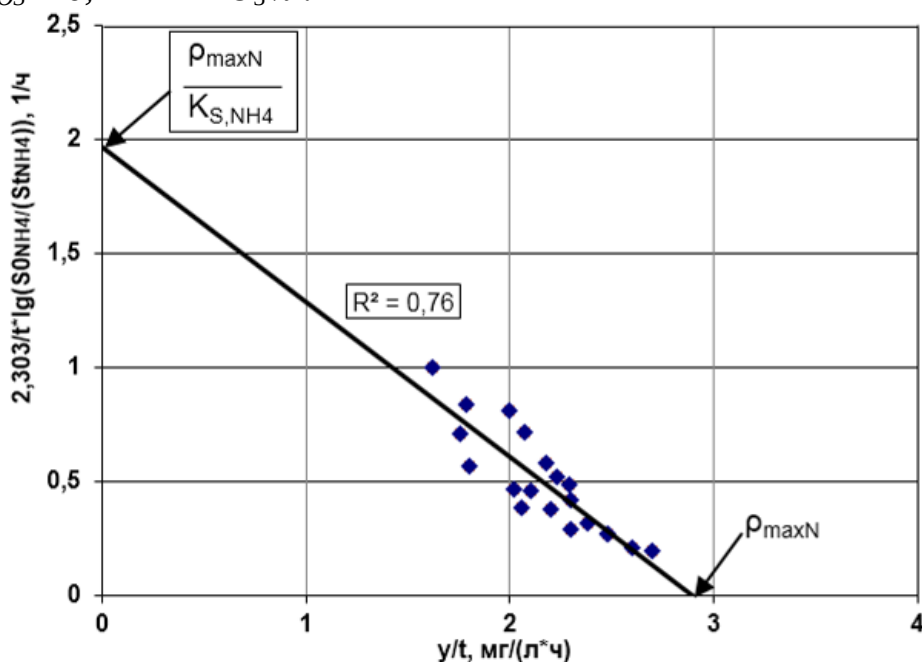


Рисунок 9 – Определение константы полунасыщения по аммонийному азоту

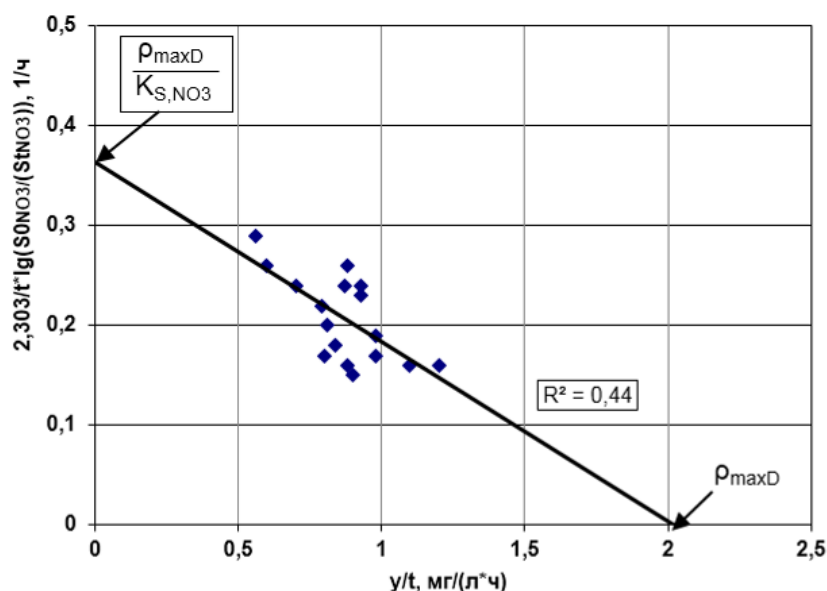


Рисунок 10 – Определение константы полунасыщения по нитратному азоту

5. Разработана методика оценки скоростей нитри-денитрификации в зависимости от размеров гранулированного активного ила, позволяющая использовать ее для прогноза и оптимизации работы реактора.

В работе предложена методика расчета скоростей удаления аммонийного азота и азота нитратов с поверхности гранул, позволяющая оценивать эффективность биологической очистки в реакторе. При расчете был определен лимитирующий субстрат процесса (кислород), а также была дана оценка глубины его проникновения в биопленку (51-184 мкм), что показало, что гранула проницаема лишь частично и, следовательно, порядок реакции равен $\frac{1}{2}$. Скорости удаления аммонийного и нитратного азота с поверхности гранул определяются следующим образом:

$$\rho_{N,D}^{cym} = \frac{\sqrt{2 \cdot D \cdot k_{ovf} \cdot S_{вых} \cdot \omega}}{x_{ил.см.}}, \quad (3)$$

где $\rho_{N,D}^{cym}$ – удельные скорости удаления аммонийного и нитратного азота с поверхности гранул, кг/(гАИ·сут); D – коэффициент диффузии субстрата в гранулу, м²/сут (по справочным данным коэффициент диффузии для N-NH₄⁺ и N-NO₃⁻ принят равным $1,7 \cdot 10^{-4}$ м²/сут и $0,4 \cdot 10^{-4}$ м²/сут соответственно); k_{ovf} – константа скорости удаления субстрата, г субстрата/(м³·сут); $S_{вых}$ – конечная концентрация субстрата, кг/м³; $x_{ил.см.}$ – доза активного ила, г/м³; ω – удельная площадь поверхности гранул в реакторе, м²/м³.

Далее определялась удельная площадь поверхности гранул путем выявления среднего диаметра гранул с использованием программного комплекса «DIAMORF». Значения удельной поверхности составили 85-160 м²/м³. В результате значения удельной скорости удаления субстрата с поверхности биопленки за все время проведения экспериментов составили: 21-55 мгN-NH₄⁺/(гАИ·сут) и 7-27 мгN-NO₃⁻/(гАИ·сут), что сравнимо с экспериментальными значениями 20-60 мгN-NH₄⁺/(гАИ·сут) и 7-35 мгN-NO₃⁻/(гАИ·сут), полученными в ходе лабораторных исследований. Предложенная методика позволяет прогнозировать эффективность нитри-денитрификации в

реакторах циклического действия в условиях частично гранулированной биомассы.

6. Предложена методика расчета для проектирования реакторов циклического действия с восходящим потоком сточной воды.

Для технологического проектирования биореактора циклического действия необходимо определить продолжительность общего цикла и каждой стадии, гидравлическое время пребывания в биореакторе.

Время анаэробной стадии (заполнения), $t_{\text{заполн}}$, ч, определяется периодом выхода фосфатов из клетки, принимается равным не менее 40 мин (0,67 ч).

Время аноксидной стадии, $t_{\text{анокс}}$, ч, рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{анокс}} = \frac{S_{N-NH_4\text{вх}} - S_{N-NH_4\text{вых}} - S_{N-NO_3\text{вых}} - C_{N-NH_4-\text{прирост}}}{\rho_D \cdot x_{\text{ил.см.}}}, \quad (4)$$

где $S_{N-NH_4\text{вх}}$ – концентрация аммонийного азота на входе в реактор, мг/л; $S_{N-NH_4\text{вых}}$ – концентрация аммонийного азота на выходе из реактора, мг/л; $S_{N-NO_3\text{вых}}$ – концентрация нитратного азота на выходе из реактора, мг/л; $C_{N-NH_4-\text{прирост}}$, мг/л, – азот на прирост, мг/л; ρ_D – скорость денитрификации, мг/(гАИ·ч) – определяется по кинетике процесса с использованием констант, полученных экспериментально (формула 2), $x_{\text{ил.см.}}$ – концентрация иловой смеси, г/л.

Время аэробной стадии, $t_{\text{аэроб}}$, ч, определяется скоростью нитрификации. Продолжительность аэробной стадии определяется по формуле:

$$t_{\text{аэроб}} = \frac{S_{N-NH_4\text{вх}} - S_{N-NH_4\text{вых}} - C_{N-NH_4-\text{прирост}}}{\rho_N \cdot x_{\text{ил.см.}}}, \quad (5)$$

где ρ_N – скорость нитрификации, мг/(гАИ·ч) – определяется по кинетике процесса с использованием констант, полученных экспериментально (формула 1).

Время стадии отстаивания, $t_{\text{отст}}$, ч, определяется с учетом скорости осаждения гранулированного ила:

$$t_{\text{отст}} = \frac{H_{\text{отв}}}{v_{\text{осажд}}}, \quad (6)$$

где $H_{\text{отв}}$ – уровень (высота) отведения очищенной воды из реактора, м; $v_{\text{осажд}}$ – скорость осаждения активного ила, м/ч. Для частично гранулированного быстрооседающего активного ила с концентрацией 4-7 г/л и иловым индексом 40-80 мл/г скорость осаждения лежит в диапазонах 8-25 м/ч.

Время отведения очищенной воды, $t_{\text{отвед}}$, ч, определяется с учетом конструкции реактора и отводящих коммуникаций (плавающие водосливы с гибкой водоотводящей трубой).

Общее времени обработки сточной воды в течение одного цикла, $t_{\text{обр}}$, ч:

$$t_{\text{обр}} = t_{\text{заполн}} + t_{\text{анокс}} + t_{\text{аэроб}} + t_{\text{отст}} + t_{\text{отвед}} \quad (7)$$

7. Обоснована экономическая эффективность применения разработанной технологии по сравнению с другими методами очистки сточных вод.

Технико-экономический расчет проводился на основе разработанной методики для локальных очистных сооружений биологической очистки

городских сточных вод производительностью 1000 м³/сутки (N-NH₄ = 25 мг/л, БПК_{полн} = 120 мг/л, взвешенные вещества = 120 мг/л). Расчет показал, что разработанная технология очистки в реакторе циклического действия с восходящим потоком в условиях частично гранулированного активного ила позволяет сократить общую площадь, занимаемую очистными сооружениями в 2,2 раза, а объем сооружений - в 2,4 раза (таблица 5). Под данную производительность была проведена технико-экономическая оценка по затратам жизненного цикла (LCC – Life cycle cost) путем сравнения нескольких схем: 1) разработанной технологии в реакторе циклического действия с аноксидной стадией, восходящим потоком и с использованием частично гранулированного ила концентрацией 6 г/л; 2) традиционной технологией удаления биогенных элементов в аэротенке непрерывно-проточного действия с дозой активного ила 3 г/л, работающей по технологии УСТ.

Таблица 5 – Результаты расчета сооружений технико-экономическая оценка по затратам жизненного цикла

Параметр	Удаление биогенных элементов в аэротенке с дозой ила 3 г/л	Удаление биогенных элементов в биореакторе с дозой ила 6 г/л
Расчет объемов и площадей сооружений		
Время пребывания в аэротенке/реакторе, час	9,1	6
Объем реактора, м ³	380	240
Глубина реактора, м	4	4
Площадь реактора, м ²	95	60
Количество аэротенков/реакторов, шт.	2	8
Объем аэротенка/реактора, м ³	190	30
Высота вторичного отстойника, м	3	-
Объем вторичного отстойника, м ³	160	-
Площадь вторичного отстойника, м ²	52	-
Время пребывания во вторичном отстойнике, час	3,7	-
Общее время пребывания, час	12,8	8
Общий объем, м ³	540	240
Общая площадь, м ²	147	60
Расчет годовых затрат		
Расчетный период, год	10	
Процентная ставка, %	10	
Годовой темп инфляции, %	7,3	
Коэффициент дисконтирования	2,89	
Капитальные затраты на аэротенк/реактор, тыс. руб.	5700	4710
Капитальные затраты на вторичные отстойники, тыс. руб.	2400	-
Эксплуатационные затраты, тыс.руб/год	1650,5	1419,2
Расчет затрат жизненного цикла		
Капитальные затраты, тыс.руб.	8100	4710
Эксплуатационные затраты, тыс.руб.	4770	4101
ИТОГО затраты жизненного цикла сооружений, тыс.руб.	12810	8811

Сравнительный анализ показал, что затраты жизненного цикла сооружений с разработанной технологией с частично гранулированным активным илом в 1,4 раза меньше затрат традиционной технологии биологической очистки с использованием вторичных отстойников для производительности 1000 м³/сут. Экономический эффект составляет 4 млн. рублей по ценам 2014 г.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана технология аэробной биологической очистки городских сточных вод в реакторе циклического действия с последовательной нитри-денитрификацией и восходящим потоком сточной воды, позволяющая повышать окислительную мощность сооружения в 1,5 – 2 раза.

2. При использовании реактора циклического действия сточная вода очищена до значений, соответствующих нормам предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения. Показана высокая стабильность и устойчивость работы при нештатных условиях ведения процесса.

3. В условиях гравитационной селекции был культивирован частично гранулированный активный ил, обладающий низким иловым индексом (40 мл/г). Скорость седиментации полученного ила в 6-7 раз выше, чем у флокулированного активного ила аэротенков, работающих по схеме удаления биогенных элементов УСТ. Применение такого ила позволяет увеличивать дозу активного ила в сооружении до 6-8 г/л.

4. Описан новый тип частично гранулированного ила, состоящий из двух слоев – внутренней отмершей части и внешней живой.

5. Определены основные кинетические параметры: максимальные скорости нитрификации и денитрификации составляют 2,9 мгN-NH₄/(гАИ·ч) и 2,0 мгN-NO₃/(гАИ·ч) соответственно, константы полунасыщения по кислороду, аммонийному азоту для нитрификации и азоту нитратов для денитрификации составляют 0,3 мгO₂/л, 0,7 мгN-NH₄⁺/л и 0,2 мгN-NO₃⁻/л соответственно.

6. Предложена методика оценки скоростей нитри-денитрификации в зависимости от размеров гранулированного активного ила, которая позволяет использовать ее для прогноза и оптимизации работы реактора.

7. Разработана методика расчета реактора циклического действия с последовательной нитри-денитрификацией и частично гранулированным активным илом для очистки городских сточных вод.

8. Выполнено технико-экономическое сравнение разработанной технологии с технологией удаления биогенных элементов в аэротенке проточного действия на производительность 1000 м³/сут. Затраты жизненного цикла сооружений с разработанной технологией с частично гранулированным активным илом в 1,4 раза меньше затрат традиционной технологии биологической очистки с использованием вторичных отстойников. Экономический эффект составляет 4 млн. рублей по ценам 2014 г.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. **Акментина А.В.** Гранулирование активного ила в процессе очистки городских сточных вод в реакторе периодического действия [Текст] / М.И. Алексеев, О.В. Мойжес, Ю.А. Николаев, А.В. Акментина // Вестник гражданских инженеров. – 2008. - №1 (14). – С. 56–59 (0,25 п.л./0,1 п.л.).

2. **Акментина А.В.** Определение кинетики процесса биологической очистки городских сточных вод с применением гранулированного активного ила [Текст] / М.И. Алексеев, О.В. Харькина, Ю.А. Николаев, А.В. Акментина // Вестник гражданских инженеров. – 2011. - №2 (27), – С. 135–139 (0,32 п.л./0,1 п.л.).

3. **Акментина А.В.** Биологическая очистка городских сточных вод и возвратных потоков с применением гранулированных илов [Текст] / Ю.А. Николаев, Е.А. Казакова, В.А. Грачев, М.В. Кевбрина, А.Г. Дорофеев, В.Г. Асеева, А.В. Акментина // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – №10. – С.60–67 (0,5 п.л./0,1 п.л.).

4. **Акментина А.В.** Исследование работы реактора циклического действия при биологической очистке городских сточных вод [Текст] / М.И. Алексеев, А.В. Акментина // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – №1 (48), – С.161– 164 (0,25 п.л./0,13 п.л.).

5. **Акментина А.В.** Интенсификация биологической очистки сточных вод в реакторе циклического действия [Текст] / А.В. Акментина // Вестник гражданских инженеров. – 2016 - №3 (56), - С.156 – 159 (0,25 п.л.).

6. **Акментина А.В.** Рекомендации по расчету реакторов циклического действия с восходящим потоком сточной воды и последовательной нитриденитрификацией [Текст] / А.В. Акментина // Вестник гражданских инженеров. – 2016 - №5 (58), - С.110 – 114 (0,31 п.л.).

Публикации в других изданиях:

7. **Акментина А.В.** Удаление азота и фосфора из сточной воды в реакторе периодического действия с восходящим потоком сточной воды [Текст] / Д.А. Данилович, М.Н. Козлов, Ю.А. Николаев, В.А. Грачев, А.В. Акментина // Московское государственное унитарное предприятие. Сборник статей и публикаций Московского водоканала. – М., – 2008. – С. 201-213 (0,81 п.л./0,16 п.л.).

8. **Акментина А.В.** Использование быстрооседающих активных илов – перспективное направление очистки городских сточных вод от азота и фосфора [Текст] / О.В. Мойжес, Ю.А. Николаев, К.В. Шотина, А.В. Акментина // Проекты развития инфраструктуры города. Сборник научных трудов. Выпуск 8. – 2008. – С. 106–111 (0,36 п.л./0,09 п.л.).

9. **Акментина А.В.** Влияние технологических режимов работы реактора периодического действия на формирование и свойства гранулированного активного ила [Текст] / М.И. Алексеев, А.В. Акментина, О.В. Мойжес, Ю.А. Николаев // Сб. докладов 66-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Санкт-Петербургский госуд. архит.-строит. ун-т. – в 5 ч. Ч II. – СПб., 2009. – С 3–7 (0,31 п.л./0,08 п.л.).

10. **Акментина А.В.** Экспериментальные испытания технологии очистки сточных вод с гранулированным активным илом на московских очистных сооружениях [Текст] / А.В. Акментина // Сб. докладов 67-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. Санкт-Петербургский госуд. архит.-строит. ун-т. – в 5 ч. Ч I. – СПб., 2010. – С. 3–7 (0,31 п.л.).

11. **Акментина А.В.** Изучение технологических свойств сферической биопленки в процессах биологической очистки городских сточных вод [Текст] / М.И. Алексеев, А.В. Акментина. // Сб. материалов 63-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов «Актуальные проблемы современного строительства». Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – в 3 ч. Ч. III. – СПб., 2010. С. 9-10 (0,13 п.л./0,07 п.л.).

12. **Акментина А.В.** Использование гранулированного активного ила для очистки коммунальных сточных вод [Текст] / А.В. Акментина // Водоочистка. – 2012. – № 4. – С.15–19 (0,32 п.л.).

13. **Акментина А.В.** Результаты полупромышленных испытаний реактора периодического действия с использованием гранулированных илов [Текст] / Ю.А. Николаев, М.Н. Козлов, О.В. Мойжес, А.В. Акментина, Ю.Г. Порачев // Вода: технологии, материалы, оборудование, экология: науч.-техн. журн. для специалистов М-ва жил.-коммун. хоз-ва. — 2012. - № 2. — С. 23-24 (0,13 п.л./0,03 п.л.).

14. **Акментина А.В.** Живая биомасса на поверхности детрита [Текст] / А.В. Акментина, Ю.А. Николаев // Вода magazine. - 2013. - № 8 (72). - С. 46-48 (0,19 п.л./0,1 п.л.).

15. **Акментина А. В.** Гранулированные илы в очистке городских сточных вод [Текст] / С.В. Храменков, М.Н. Козлов, Ю.А. Николаев, А.В. Акментина, В.А. Грачев, А.Г. Дорофеев // Вода: научно-технический журнал для специалистов Министерства жилищно-коммунального хозяйства/ Министерство жилищно-коммунального хозяйства РБ, УП «Редакция журнала «Вода». - Минск, 2013. - № 2. - С. 2-4 (0,19 п.л./0,03 п.л.).

16. **Акментина А.В.** Исследования энергоэффективных технологий биологической очистки воды [Текст] / М.Н. Козлов, А.Г. Дорофеев, Е.А. Казакова, А.В. Акментина, В.Г. Асеева, Н.Г. Монахова, С.И. Мойжес // Чистый город. – 2013. – № 3. – С. 21-28 (0,5 п.л./0,07 п.л.).

Подписано в печать 2017 г.
Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз.