

В печать  
20.10.2023г



На правах рукописи

**Могукало Анастасия Вадимовна**

**КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА ИЗБЫТОЧНОГО  
АКТИВНОГО ИЛА ОТ ПАТОГЕННОЙ  
ОБСЕМЕНЁННОСТИ**

2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны  
водных ресурсов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
**Нездойминов Виктор Иванович**,  
заведующий кафедрой водоснабжения,  
водоотведения и охраны водных  
ресурсов ФГБОУ ВО «Донбасская  
национальная академия строительства и  
архитектуры»

**Официальные оппоненты:**

**Щербаков Владимир Иванович**  
д.т.н., профессор кафедры  
водоснабжения, водоотведения и  
гидротехники ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
технический университет»;

**Вильсон Елена Владимировна**  
к.т.н., доцент, заместитель  
генерального директора ООО «НИЦ  
«ЭКОСТЕХ» по научно-  
образовательной работе.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Южно-Российский  
государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Защита состоится «21» декабря 2023 года в 14<sup>00</sup> часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 02.2.001.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г.о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2., учебный корпус №1, зал заседания ученого совета.

Тел. Факс: +7(856) 343 – 70 – 33, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru

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

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета 02.2.001.01, к.т.н., доцент



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Традиционная биологическая очистка не потеряла свою актуальность и остается основным методом обработки городских сточных вод. В результате сложных биохимических процессов в природу возвращается очищенная вода и образуется органический конгломерат живых микроорганизмов – активный ил. На сегодняшний день во всем мире ежегодно образуется порядка  $80 \cdot 10^9$  тонн органического осадка. В Российской Федерации ежегодно образуется 3,5 млрд. т. избыточного активного ила (ИАИ).

Твердая фаза ила включает значительное количество органических веществ (более 65%), азот, фосфор, калий и другие биогенные элементы. Все это делает активный ил достаточно ценным вторичным ресурсом, который может использоваться в качестве удобрительного материала для технической и биологической рекультивации почв. Использовать ил в качестве удобрительного материала невозможно без предварительной обработки по двум основным причинам: присутствие ионов тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов. Во многих случаях концентрации ионов тяжелых металлов в активном иле соответствуют допустимым нормам за счет исключения сброса производственных сточных вод в городскую канализационную сеть. Нерешенной проблемой является удаление патогенных групп микроорганизмов из активного ила. Повышенная патогенная обсеменённость обусловлена тем, что поступающие сточные воды содержат различные виды патогенных микроорганизмов, выделяемых в процессе жизнедеятельности человека и животных.

Отсутствие технологических решений, направленных на подавление патогенных микроорганизмов активного ила, приводит к складированию его на иловых площадках, расположенных вблизи очистных сооружений. Накопление избыточного активного ила на иловых площадках представляет экологическую опасность из-за выделения дурнопахнущих веществ и вероятности загрязнения грунтовых и поверхностных вод.

На сегодняшний день отсутствуют технологические решения по обработке ИАИ от патогенной обсемененности. Актуальной задачей является разработка и внедрение комплексного метода по снижению болезнетворной обсеменённости ИАИ.

**Степень разработанности темы.** Работа опирается на результаты теоретических и экспериментальных исследований в области обработки органических осадков и сооружений биологической очистки сточных вод ученых: Яковлева С.В., Куликова Н.И., Залетовой Н.А., Кичигина В.И., Нездойминова В.И., Евилевича А.З., Никитиной О.Г., Ксенофонтова Б.С., Дрозда Г.Я., Чернышева В.Н., Кузнецова Е.А., Лысак В.В., Qi Yang, Xiaoli Jing, Xin Fend, Jibao Liu, Ewa Wojciechowska, Nuno Miguel Gabriel Coelho и др.

### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Диссертационная работа выполнена в рамках:

- хозяйственно-договорной тематики подразделения ТЕРС Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» 0820-РП «Строительство объектов канализационных систем пгт. Карло-Марксово» в рамках постановления Правительства ДНР № 26-13 от 5 июня 2020 г. «О реализации мероприятий по повышению эксплуатационных характеристик систем и объектов жилищно-коммунального хозяйства Донецкой Народной Республики в 2020 году»;

- госбюджетной научно-исследовательской темы кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» К-3-01-21 «Разработка комплексных технологических схем очистки городских сточных вод и органических осадков в высокоэффективных биореакторах» (номер государственной регистрации НИР: 0121D000092) 2022 г.;

- госбюджетной научно-исследовательской темы ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» FRRW – 2023–0008 «Повышение технико-экономической эффективности функционирования систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов ДНР» (номер государственной регистрации НИР: 1023022400039-0-2.8.2) 2023 г.

**Целью диссертационной работы** является обоснование и разработка технологии комплексной обработки активного ила для снижения его обсеменённости, включающей процессы аэробной стабилизации и последующее введение щелочного реагента.

#### **Задачи исследования:**

- проанализировать современные технологические решения по удалению патогенной обсеменённости активного ила городских сточных вод, изучить основные достоинства и недостатки существующих способов;

- теоретически обосновать влияние окислительно-восстановительного потенциала и щелочной обработки на гибель патогенных микроорганизмов активного ила;

- на основании биохимических зависимостей обосновать модель аэробной стабилизации активного ила, описывающую биологические процессы распада беззольного вещества ила и образования окисленных форм азота, повышающих окислительно-восстановительный потенциал;

- путем экспериментальных исследований определить параметры аэробной стабилизации активного ила и щелочной обработки для подавления патогенных микроорганизмов;

- разработать рекомендации для проектирования технологии комплексной обработки избыточного активного ила с определением экономических показателей.

**Объект исследования** – сооружения обработки активного ила, образующегося на станциях биологической очистки городских сточных вод.

**Предмет исследования** – влияние аэробной стабилизации и химической обработки активного ила на процессы подавления патогенной обсеменённости.

**Научная новизна полученных результатов:**

- выполнено теоретическое и экспериментальное обоснование снижения патогенной обсеменённости ила в процессе аэробной стабилизации за счет повышения окислительно-восстановительного потенциала и рН среды;

- на основании экспериментальных данных определены стехиометрические коэффициенты биохимической модели ASM 1, описывающие процессы образования окисленных форм азота, влияющих на повышение окислительно-восстановительного потенциала;

- определены дозы щелочного реагента, вводимого после аэробной стабилизации осадка в непроточном режиме, для достижения требований использования ила в качестве удобрительного материала.

**Теоретическая значимость результатов исследований:**

1. Доказано влияние биологического преобразования форм азота в процессе аэробной стабилизации на окислительно-восстановительный потенциал среды.

2. Доказана применимость подходов с биохимическим моделированием ASM 1 для описания процессов аэробной стабилизации избыточного активного ила.

3. Установлено влияние окислительно-восстановительного потенциала на степень снижения патогенной обсеменённости избыточного активного ила очистных сооружений.

**Практическое значение полученных результатов:**

1. На основании выполненных экспериментальных исследований предложен комплексный способ обработки активного ила с целью удаления патогенной обсеменённости ила. Комплексный метод включает аэробную стабилизацию активного ила с последующим введением щелочного реагента. Предложенный метод способствует снижению патогенной обсеменённости до требуемых норм при применении ила в качестве удобрительного материала;

2. Результаты диссертационных исследований внедрены в учебный процесс: лекции по курсу «Малоотходные технологии» для студентов направления подготовки 08.04.01 «Строительство» по программе «Современные методы очистки природных и сточных вод»;

3. Разработаны «Рекомендации для проектирования комплексной обработки активного ила от патогенной обсеменённости», утвержденные на техническом совете «Компания «Вода Донбасса», 2023 г.

**Методология и методы исследования.** Основными методами в работе являются экспериментальные и теоретические исследования. Эксперименты осуществлялись на лабораторном оборудовании. Выполнялись измерения физико-химических и санитарно-бактериологических показателей ила в

процессе биохимической обработки. Применённые теоретические методы включают: математическое описание процесса нитрификации в программной среде «Cell Designer» на основе моделей ASM 1, DataFit.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, а именно, в части: методы обработки илов, осадков и жидких концентратов сточных и природных вод, обезвреживания парогазовых отходов очистки сточных вод, конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов.

**Степень достоверности и апробация полученных результатов.** Основные результаты работы и главные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XI Международная научно-практическая конференция «ТЕХНОВОД-2018» (г. Сочи, Красная Поляна, 11-14 декабря 2018 г.);

- XII Международная научно-практическая конференция «ТЕХНОВОД- 2019» (г. Москва, 22-23 октября 2019 г.);

- Международная очно-заочная конференция «БиоТехВод – 2020» (г. Макеевка, 20-21 февраля 2020 г.);

- 72-я Международная научно-практическая конференция «Перспективные технологии в современном АПК России: традиции и инновации» (г. Рязань, 20 апреля 2021 г.);

- VI Международная очно-заочная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы развития городов» (г. Макеевка, 19 мая 2022 г.);

- XXI Международная конференция «Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий». Секция: Инфраструктура жилищно-коммунального хозяйства (г. Макеевка, 21 апреля 2022 г.);

- XIV Международная научно-практическая конференция «ТЕХНОВОД- 2023» (г. Кисловодск, 18-21 апреля 2023 г.);

- VII Международная очно-заочная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Актуальные проблемы развития городов» (г. Макеевка, 3 марта 2023 г.).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- результаты экспериментальных исследований на лабораторной установке, взятые за основу для оценивания эффективности проведения аэробной стабилизации избыточного активного ила с целью снижения патогенной обсеменённости ила;

- результаты лабораторных исследований обработки стабилизированного ила негашёной известью;

- результаты выбора модели, описывающей биологические процессы распада беззольного вещества ила и образование окисленных форм азота в процессе аэробной стабилизации в биореакторе периодического действия;

- рекомендации по комплексной обработке избыточного активного ила с последующим использованием его в качестве удобрительного материала.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения и пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 123 источника, в том числе 19 иностранных. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, в том числе 100 страниц основного, 24 таблиц, 31 рисунок.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертационного исследования опубликованы автором в соавторстве в 10 печатных научных работах. 6 публикаций в рецензируемых научных изданиях, 4 – публикации по материалам научных конференций.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи научного исследования, определены объект и предмет исследования, представлена научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**Первая глава** посвящена анализу состояния вопроса образования осадков городских сточных вод и их обработки с целью снижения патогенной обсеменённости. Проанализировав существующие способы использования активного ила, установили, что наиболее рациональным является применение его в качестве удобрительного материала. Активный ил обладает высокими удобрительными свойствами ввиду наличия органических веществ, азота, фосфора, калия и других биогенных микроэлементов. Основным сдерживающим фактором применения ила в качестве удобрительного материала является патогенная обсеменённость. Существующие методы снижения патогенной обсеменённости основываются на реагентной и тепловой обработке. Однако данные методы не нашли широкого применения на станциях биологической очистки городских сточных вод из-за сложности применяемого оборудования и высоких энергетических затрат.

**Во второй главе** приведено описание и теоретическое обоснование комплексного биологического и химического методов обработки избыточного активного ила для подавления патогенных микроорганизмов.

В основу гипотезы биологического метода положен механизм воздействия растворенного в воде кислорода и окисленных форм азота на повышение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), приводящего к снижению патогенной обсеменённости активного ила. В большинстве случаев для факультативных и облигатных патогенных микроорганизмов средой обитания и культивирования являются условия с ОВП в диапазоне от  $-300$  до  $+250$  мВ. Попадая в среду с ОВП более  $+300$  мВ, ферменты патогенных микроорганизмов ингибируются, что приводит к их гибели.

Аэробная стабилизация сопровождается распадом органической части активного ила с выделением азота аммонийного, который под действием группы нитрифицирующих микроорганизмов окисляется до нитратов. В процессе поэтапной нитрификации биологическим путем образуется

промежуточное соединение гидроксиламин ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ), которое получить химическим путем затруднительно. Данное соединение является реакционноспособным веществом и при рН 7...8 обладает сильными окислительными свойствами. Гидроксиламин, с помощью фермента гидроксиламинооксидоредуктазы окисляется до нитрита, а затем до нитрата. Преобразования соединений азота в нейтральной среде имеют окислительно-восстановительные потенциалы, представленные на рисунке 1.

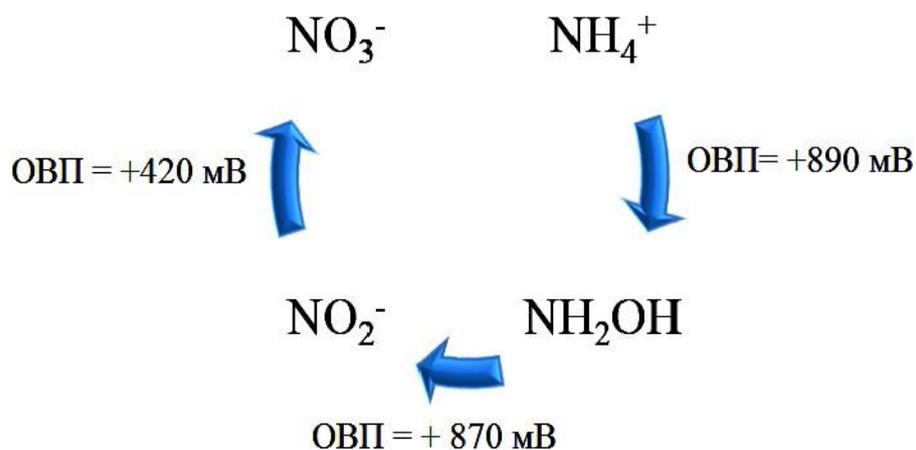


Рисунок 1 – Окислительно-восстановительные потенциалы преобразования соединений азота

Окислительно-восстановительный потенциал окисления азота аммонийного до гидроксиламина ( $\text{NH}_4^+ / \text{NH}_2\text{OH}$ ) составляет + 890 мВ, что значительно больше, чем ОВП молекулярного кислорода ( $\text{O}_2 = +680$  мВ).

При аэробной стабилизации ила увеличение концентрации окисленных форм азота приводит к повышению ОВП иловой смеси, что вызывает гибель патогенных микроорганизмов. Особенности строения ила приводят к диффузионному ограничению проникновения кислорода и окисленных форм азота во внутренние слои флоккулы, где создаются низкие значения ОВП, благоприятные для развития патогенов.

Для повышения эффективности снижения патогенности аэробно стабилизированного осадка целесообразно его подвергать дополнительной обработке щелочным реагентом. Повышение рН влияет на знак заряда поверхности клетки, что приводит к изменению проницаемости клеточной мембраны по отношению к питательному субстрату и нарушению нормального процесса обмена веществ. Щелочная среда ингибирует активность эндо- и экзоферментов, интенсивность и направление биохимических реакций, что приводит, в конечном счете, к гибели патогенных микроорганизмов.

Добавление негашёной извести сопровождается образованием гидроксида кальция, повышением температуры и щелочности ила. Гидроксиды обладают высокой реакционной способностью и приводят к разрушению практически всех клеточных веществ патогенных

микроорганизмов.

**В третьей главе** рассмотрены объекты и методы исследования. Экспериментальные исследования влияния процесса аэробной стабилизации на изменение физико-химических и санитарно-бактериологических показателей проводились с активным илом, отобраным в производственном аэротенке на канализационных очистных сооружениях (КОС) г. Макеевки. Экспериментальная установка, являющаяся имитацией аэробного стабилизатора, работала в непроточном режиме. Температура иловой смеси в установке поддерживалась в интервале 18...20°C. Для равномерного перемешивания активного ила и поддержания его во взвешенном слое интенсивность аэрации составляла 6 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч. Концентрация растворенного кислорода поддерживалась в пределах 4 мг/дм<sup>3</sup>.

Санитарно-бактериологические исследования активного ила включали определение бактериальной группы кишечной палочки (БГКП) и *Salmonella*. Данные показатели являются индикатором патогенности ила для возможности его использования в качестве удобрительного материала в соответствии с ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 «Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений». Определение санитарно-бактериологических показателей активного ила проводилось по стандартным методикам на поверенных и аттестованных приборах в Центральной контрольно-исследовательской и проектно-изыскательской водной лаборатории «Компания «Вода Донбасса». Физико-химические показатели иловой смеси определялись в аккредитованной лаборатории ГОУ ВПО «ДОННАСА» по стандартным методикам.

**Четвертая глава** работы посвящена экспериментальным исследованиям по изучению закономерностей снижения патогенной обсеменённости активного ила при аэробной стабилизации с последующей химической обработкой негашёной известью. Процесс аэробной стабилизации активного ила продолжался в биореакторе периодического действия непрерывно в течение четырех суток. Для получения достоверных результатов снижения патогенной обсеменённости активного ила были проведены три серии экспериментов с различными концентрациями сухого вещества ила – 3,10; 4,80; 6,50 г/дм<sup>3</sup>.

Ежедневно из установки отбирались пробы иловой смеси для определения следующих показателей: концентрация ила по сухому и беззольному веществу, зольность, рН среды, щелочность, концентрации азота аммонийного, нитритного и нитратного (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), ОВП. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение физико-химических показателей иловой смеси в процессе аэробной стабилизации

Продолжительность аэробной стабилизации, сутки	Показатели									
	Концентрация активного ила по сухому веществу, г/дм <sup>3</sup>	Концентрация активного ила по беззольному веществу, г/дм <sup>3</sup>	Азот аммонийный N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Азот нитритов N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Азот нитратов N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Σ(N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	ОВП, мВ	рН	Щёлочность, НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг-экв/дм <sup>3</sup>	Зольность, %
1 серия экспериментов										
Исх.	3,10	2,38	0,31	0,35	4,10	4,76	+90	7,90	5,5	23,2
1	3,00	2,30	0,21	0,26	23,10	23,57	+350	7,20	3,8	23,7
2	2,92	2,20	0,13	0,15	33,50	33,78	+490	6,85	2,4	24,6
3	2,87	2,15	0,09	0,01	40,40	40,50	+480	6,55	1,2	24,9
4	2,83	2,11	0,02	н/о	45,70	45,72	+490	6,45	0,9	25,2
2 серия экспериментов										
Исх.	4,80	3,45	2,20	1,50	5,50	9,20	+180	7,80	6,0	28,0
1	4,69	3,35	1,40	0,90	25,60	27,90	+380	7,10	3,9	28,4
2	4,55	3,23	0,55	0,76	37,51	38,82	+490	6,80	3,0	28,9
3	4,46	3,15	0,51	0,46	48,60	49,57	+500	6,50	2,4	29,2
4	4,38	3,09	0,45	н/о	58,00	58,45	+500	6,30	1,8	29,4
3 серия экспериментов										
Исх.	6,50	4,87	1,6	0,27	7,8	9,67	+150	7,80	4,8	25,0
1	6,35	4,73	1,2	0,07	30,5	31,77	+420	7,05	3,4	25,5
2	6,19	4,55	0,37	0,01	48,4	48,78	+500	6,70	2,6	26,4
3	6,01	4,39	0,23	н/о	62,8	63,03	+510	6,40	1,8	26,9
4	5,95	4,33	0,15	н/о	70,9	71,05	+510	6,25	1,1	27,1

В первой серии экспериментов контроль зольности активного ила показал ее изменение в течение четырех суток стабилизации с 23,2 до 25,2%, потеря сухого вещества составила 8,0%. Распад беззольной части ила составил 10,6%. Во второй серии экспериментов, при исходной концентрации беззольного вещества ила 3,45 г/дм<sup>3</sup>, зольность увеличилась с 28,0 до 29,4%, что соответствовало потере по сухому веществу 9%, и распаду по беззольному веществу 10,4%. В третьей серии экспериментов, при исходной концентрации взвешенных веществ 6,50 г/дм<sup>3</sup> по сухому веществу активного ила, зольность увеличилась с 25,0 до 27,1%, потери сухого вещества составили 8,5%, а распад беззольной части произошел на 11,0%.

В период аэробной стабилизации ила щёлочность во всех сериях экспериментов уменьшалась, при этом значение рН снижалось не менее шести. Снижение щёлочности в биореакторе происходило за счет потребления

её нитрифицирующими микроорганизмами, что приводило к повышению концентрации нитратов. Установлено, что для окисления 1 мг азота аммонийного в среднем требуется 0,08 мг·экв  $\text{HCO}_3^-$ . Рост нитратов и отсутствие нитритов свидетельствует об устойчивом протекании биологической нитрификации при аэробной стабилизации ила.

Наибольшая удельная скорость образования нитратов наблюдалась в первые двое суток стабилизации. Она составила для первой серии экспериментов 0,26 мг  $\text{N}/\Gamma_{\text{безз}} \cdot \text{ч}$ , для второй – 0,19, для третьей – 0,17. С увеличением времени обработки удельная скорость образования нитратов снижалась. При этом стоит отметить, что с увеличением концентрации ила удельная скорость образования нитратов уменьшалась.

Расчетным путем по данным таблицы 1 определена удельная скорость распада беззольной части активного ила для трех серий экспериментов в зависимости от времени обработки, изменение которой представлено на графике (Рисунок 2)

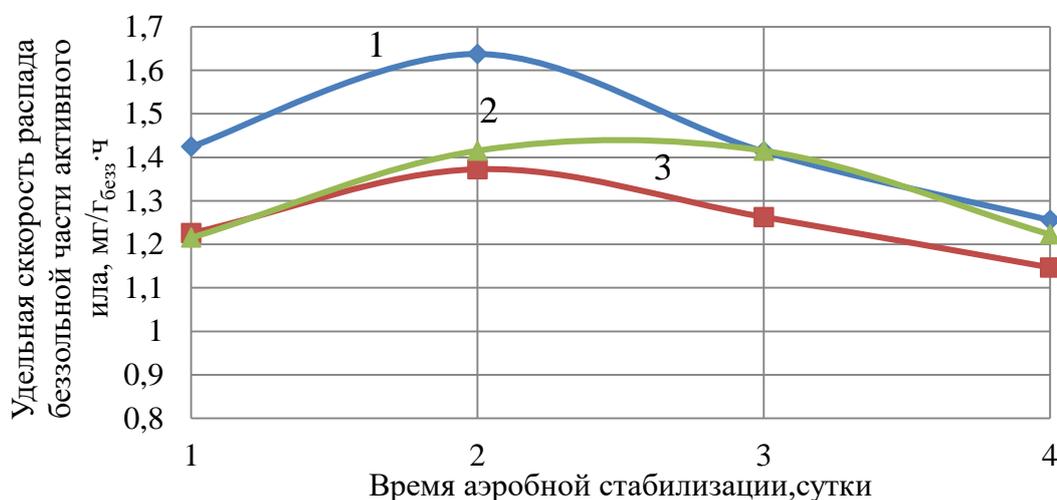


Рисунок 2 – Изменение удельной скорости распада беззольной части активного ила в зависимости от времени аэробной стабилизации при различных исходных концентрациях:

1 – 2,38 г/дм<sup>3</sup>; 2 – 3,45 г/дм<sup>3</sup>; 3 – 4,87 г/дм<sup>3</sup>

Данные свидетельствуют, что при различных концентрациях беззольной части активного ила наибольшая скорость распада происходит на вторые сутки и составляет порядка 1,40...1,60 мг/Γбезз·ч. Процессы распада органической части ила напрямую связаны с выделением восстановленного азота. Полученная величина распада беззольной части ила сопоставлялась с суммарным количеством выделившегося в жидкую фазу минерального азота ( $\text{N-NH}_4^+$ ;  $\text{N-NO}_2^-$  и  $\text{N-NO}_3^-$ ), согласно выражению 1.

$$R_{vss} = \frac{C_N^{in} - C_N^{ef}}{150 \cdot a_i \left(1 - \frac{3}{100}\right)} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $R_{vss}$  – распад органической части активного ила, %;

$C_N^{in}$  – сумма азота до начала эксперимента, мг/дм<sup>3</sup>;

$C_N^{ef}$  – сумма азота после окончания эксперимента, мг/дм<sup>3</sup>;

$a_i$  – концентрация ила по сухому веществу, г/дм<sup>3</sup>;

З – зольность ила, %;

150 – удельное содержание азота в активном иле, мг N/г беззольного вещества.

Сопоставление полученных экспериментальных данных с расчётными данными, определёнными согласно выражению (1), позволило установить, что разница распада в значениях не превышает 2%. Это объясняется тем, что расчеты по формуле (1) не учитывают при аэробном распаде ила концентрации органического азота. К этому следует добавить протекание параллельных процессов денитрификации, при которых нитраты восстанавливаются до газообразного азота ( $N_2$ ) и отдуваются.

Динамика изменения ОВП от времени аэробной стабилизации показала, что значения ОВП иловой смеси достигают максимальной величины +500 мВ на вторые сутки, после чего процесс повышения ОВП стабилизируется (Рисунок 3).

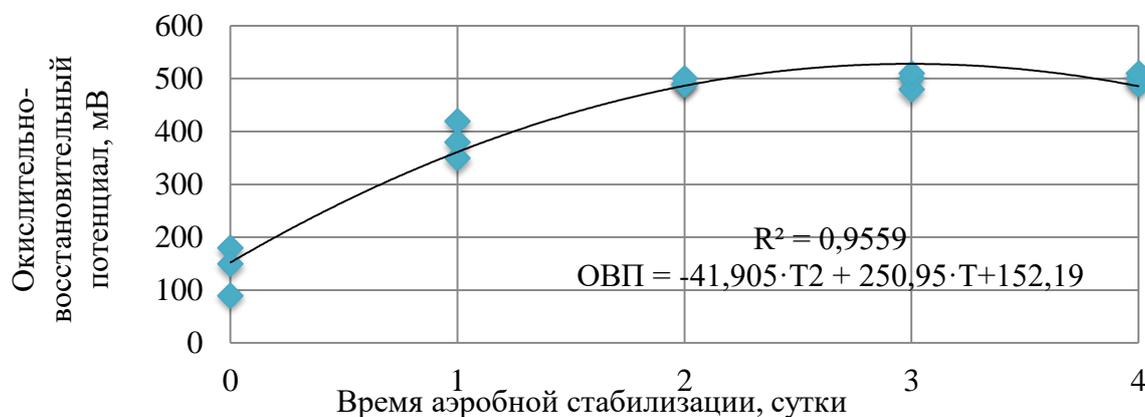


Рисунок 3 – Динамика изменения окислительно-восстановительного потенциала иловой смеси от времени аэробной стабилизации

Параллельно контролировалась динамика изменения ОВП в зависимости от концентрации азота нитратов в иловой смеси. На основании полученных данных построен график (Рисунок 4), отображающий изменение ОВП в зависимости от концентрации азота нитратов.

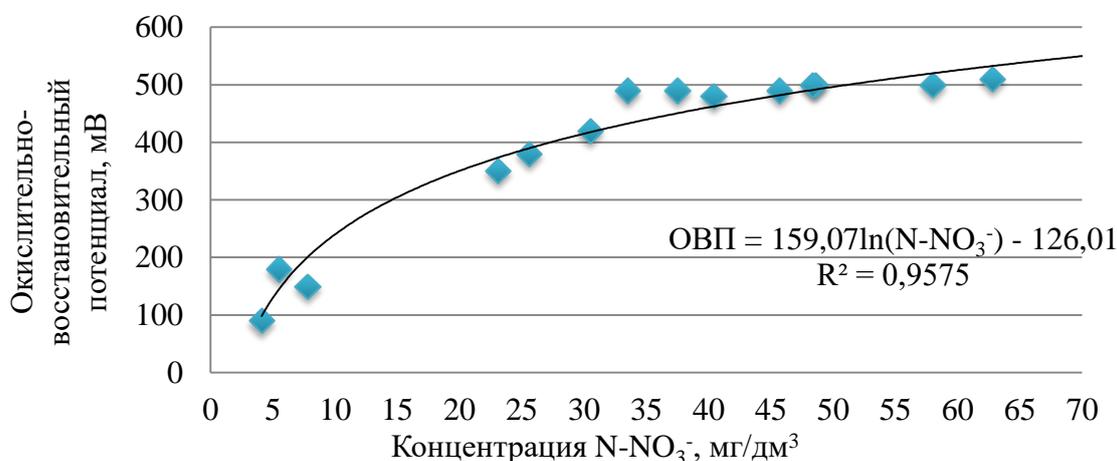


Рисунок 4 – Изменение ОВП в зависимости от концентрации азота нитратов в иловой смеси

При концентрации нитратов  $N-NO_3^-$  более  $35 \text{ мг/дм}^3$ , повышение ОВП достигало максимальной отметки  $+500 \text{ мВ}$ . Дальнейший рост концентрации нитратов до  $70 \text{ мг/дм}^3$  не приводит к увеличению ОВП.

Полученные в процессе экспериментальных исследований данные показали, что распад беззольной части ила приводит к возрастанию концентрации азота нитратов. Накопление нитратов в иловой смеси более чем  $35 \text{ мг/дм}^3$  обеспечивает повышение ОВП до  $+500 \text{ мВ}$ .

В процессе проведения эксперимента параллельно контролировалось изменение патогенной обсеменённости ила в процессе аэробной стабилизации. Экспериментальным путем было установлено влияние времени стабилизации ила и ОВП на снижение бактериальной группы кишечной палочки и *Salmonella*. В таблице 2 приведена оценка эффективности снижения санитарно-бактериологических показателей активного ила в процессе аэробной стабилизации.

Таблица 2 – Эффективность снижения БГКП и *Salmonella* в активном иле в процессе аэробной стабилизации

Время аэробной стабилизации, сутки	БГКП КОЕ/г сухого вещества	Эффективность снижения БГКП Э, %	<i>Salmonella</i> КОЕ/г сухого вещества	Эффективность снижения <i>Salmonella</i> Э, %
1	2	3	4	5
1 серия экспериментов				
0	$1,7 \cdot 10^5$	-	$3,5 \cdot 10^4$	-
1	$1,2 \cdot 10^5$	29,4	$2,3 \cdot 10^4$	34,0
2	$4,6 \cdot 10^4$	72,9	$1,0 \cdot 10^4$	70,2
3	$4,4 \cdot 10^4$	74,1	$0,9 \cdot 10^4$	73,5
4	$4,4 \cdot 10^4$	74,1	$0,9 \cdot 10^4$	73,8
2 серия экспериментов				
0	$5 \cdot 10^5$	-	$5,0 \cdot 10^3$	-
1	$3 \cdot 10^5$	40,0	$3,5 \cdot 10^3$	30,6
1	2	3	4	5
2	$7,5 \cdot 10^4$	85,0	$1,5 \cdot 10^3$	70,0
3	$7,3 \cdot 10^4$	85,4	$1,4 \cdot 10^3$	72,0
4	$7,3 \cdot 10^4$	85,4	$1,2 \cdot 10^3$	76,0
3 серия экспериментов				
0	$2,4 \cdot 10^6$	-	$6,3 \cdot 10^4$	-
1	$1,8 \cdot 10^6$	25,0	$4,4 \cdot 10^4$	30,0
2	$6,5 \cdot 10^5$	73,0	$1,5 \cdot 10^4$	75,5
3	$6,5 \cdot 10^5$	73,0	$1,5 \cdot 10^4$	76,0
4	$6,4 \cdot 10^5$	73,3	$1,4 \cdot 10^4$	76,2

Для визуализации на графике (Рисунок 5) представлены осредненные по трем сериям экспериментов изменения количества БГКП, *Salmonella* и

повышение ОВП в зависимости от времени стабилизации.

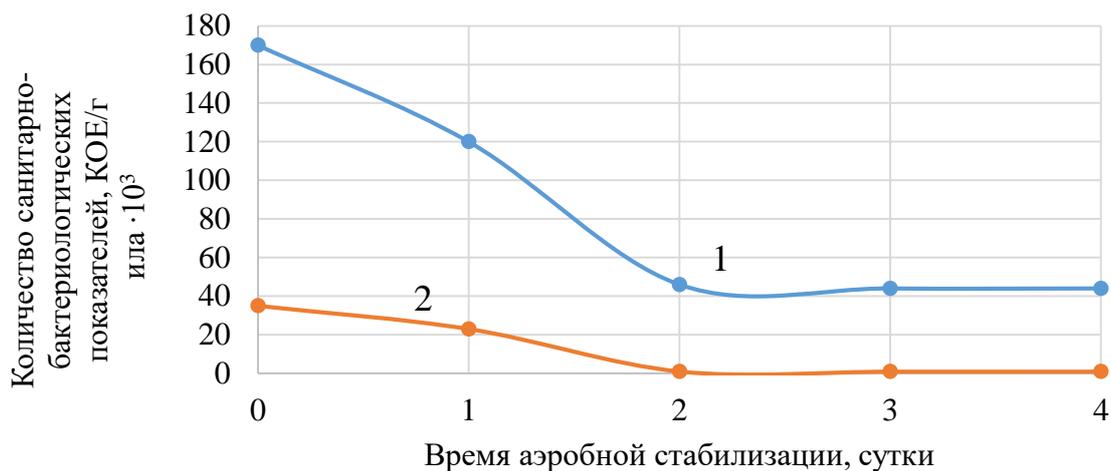


Рисунок 5 – изменение патогенности активного ила от времени аэробной стабилизации: 1 – БГКП; 2 – *Salmonella*

Максимальное снижение БГКП и *Salmonella* в процессе аэробной стабилизации достигнуто на вторые сутки, после чего процесс стабилизировался и дальнейшего снижения обсеменённости патогенами не происходило. Такая тенденция снижения патогенности ила напрямую коррелируется с ростом ОВП среды. При этом эффективность снижения патогенности ила, в среднем, составила для БГКП – 76,0%, *Salmonella* – 71,6%.

Обработка результатов экспериментов по средней эффективности снижения патогенной обсеменённости по показателю БГКП, проводимая с помощью статистического пакета DataFit 9.1, позволила получить аналитический вид регрессионной зависимости

$$Y = a + \frac{b}{T} + k \cdot C_{\text{ВЗВ}} + \left(\frac{d}{T}\right)^2 + e \cdot C_{\text{ВЗВ}}^2 + f \cdot \frac{C_{\text{ВЗВ}}}{T}, \quad (2)$$

где  $Y$  – эффективность снижения патогенной обсеменённости в процессе аэробной стабилизации, % (Э);

$T$  – время аэробной стабилизации, сутки;

$C_{\text{ВЗВ}}$  – концентрация сухого вещества ила, г/дм<sup>3</sup>;

$a, b, k, e, f$  – коэффициенты.

При подстановке вычисленных коэффициентов в программе DataFit 9.1, уравнение имеет вид:

$$\text{Э} = 15 + \frac{73}{T} + 22 \cdot C_{\text{ВЗВ}} + \left(\frac{101}{T}\right)^2 + 2 \cdot C_{\text{ВЗВ}}^2 + 1,17 \cdot \frac{C_{\text{ВЗВ}}}{T}.$$

Коэффициент множественной детерминации составил  $R_2 = 0,99$ , что указывает на высокую сходимость формулы (2) с результатами экспериментальных исследований на лабораторной установке. На рисунке 6

представлена поверхность по зависимости (2) в пределах исследуемых аргументов. На графике отображены координаты советующих экспериментальных данных эффективности снижения патогенной обсеменённости (Э) относительно времени аэробной стабилизации и концентрации ила по сухому веществу.

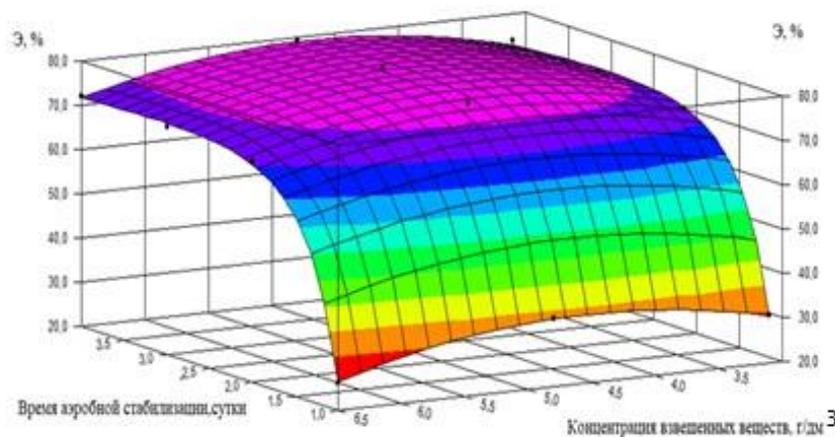


Рисунок 6 –Эффективности снижения БГКП ила от времени аэробной стабилизации и концентрации сухого вещества ила

Таким образом, полной гибели болезнетворных микроорганизмов при аэробной стабилизации достичь сложно из-за ограничения роста ОВП и диффузионных ограничений проникновения растворенного кислорода воздуха и окисленных форм азота во внутрь флоккулы ила.

Не менее важным показателем аэробно стабилизированного осадка является его загниваемость или относительная стабильность. Эта величина определяет промежуток времени, когда в осадке превалируют окислительные процессы над восстановительными. По данному показателю можно косвенно оценивать время подавления роста анаэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов в стабилизированном осадке, включая патогенных бактерий. Предложенная методика базируется на изменении суммарного показателя  $r_{H_2}$  стабилизированного осадка без внесения кислорода в культуральную среду, в течение некоторого времени. В качестве «критического» значения  $r_{H_2}$  принимается величина, равная 16, снижение этого показателя свидетельствует о преобладании восстановительных процессов над окислительными. Относительная стабильность осадка рассчитывалась согласно выражению (3), по аналогии определения стабильности сточных вод

$$S = (1 - 0,794\tau) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $S$  – относительная стабильность, %;

$\tau$  – время снижения  $r_{H_2}$  до «критического» значения, сутки.

Изменение показателя  $r_{H_2}$  жидкой фазы осадка без внесения кислорода представлено на рисунке 7.

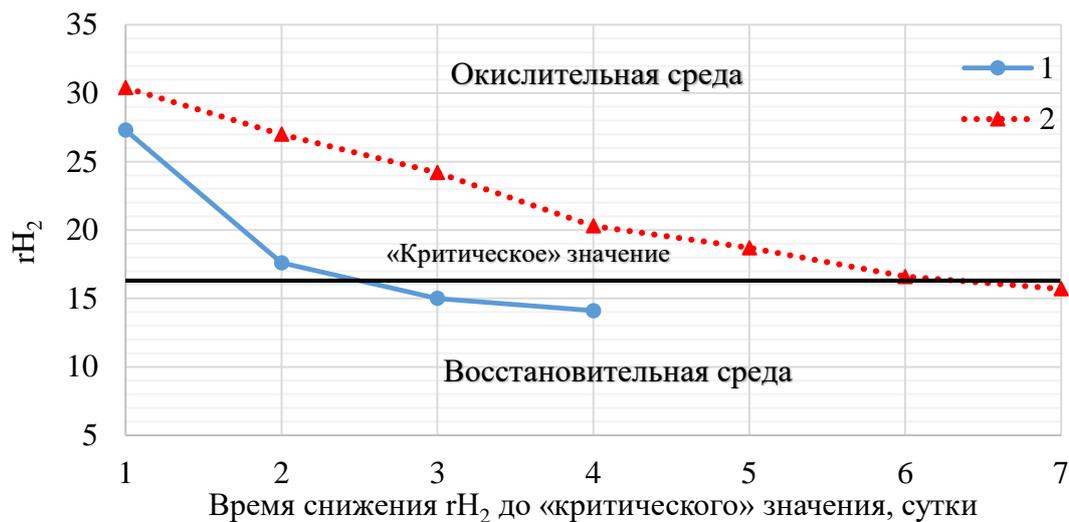


Рисунок 7 – Динамика изменения  $rH_2$  жидкой фазы осадка без внесения кислорода:

1 – после суточной стабилизации; 2 – после двухсуточной стабилизации

Согласно выражению (3) рассчитана относительная стабильность осадка после суточной аэробной обработки, которая равна 50%, после двух суток – увеличилась до 81%. Относительная стабильность осадка 50% означает, что в течение трех суток в осадке поддерживаются окислительные процессы и сдерживается развитие анаэробных микроорганизмов, включая патогенные. Стабильность осадка 81% соответствует семи суткам преобладания окислительных процессов в осадке.

Относительная стабильность осадка возрастает с увеличением времени аэробной стабилизации. Аэробная стабилизация не обеспечивает полного подавления роста патогенных микроорганизмов, что требует дополнительной химической обработки.

Для снижения патогенной обсеменённости стабилизированного осадка до нормируемых значений предлагается дополнительная химическая обработка введением негашёной извести, которая сопровождается образованием гидроксильных групп ( $OH^-$ ) и повышением рН среды. Перед введением негашёной извести в пробы активного ила ил предварительно обезвоживался на лабораторной установке вакуум-фильтрации до влажности 85%.

Для определения минимальной дозы негашёной извести в пробы обезвоженного осадка влажностью 85% вносились разные концентрации извести, которые составляли (5, 10 и 15%) от массы сухого вещества ила. После введения извести производилось перемешивание осадка в течение 10 минут, после чего в них определялся санитарно-бактериологический показатель (БГКП). Для достоверности полученных результатов, исследования проводились троекратно, осреднённые результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Снижение БГКП стабилизированного осадка в течение двух суток при введении извести

Доза СаО, % от массы сухого вещества осадка	Кол-во БГКП КОЕ/г сухого вещества	рН
Стабилизированный осадок Макеевских очистных сооружений		
0	45000	7,8
5	150	8,5
10	н/о	9,0
15	н/о	11,0

Примечание: н/о – не обнаружено.

Исходная величина рН осадка, стабилизированного в течение двух суток, составляла 7,1. Так, при концентрации извести 5% рН увеличилось до 8,5, при концентрации 10% увеличение рН произошло до 9,0.

Установлено, что для полной гибели БГКП в стабилизированном осадке Макеевских очистных сооружений минимальная доза введения негашеной извести составляет 10% от массы сухого вещества ила. Относительная стабильность осадка после обработки негашёной известью достигла 99%.

Для описания микробиологических процессов аэробной стабилизации активного ила в биореакторе периодического действия, была применена модель «Модель Активного Ила №1» (ASM 1). Данная модель описывает процессы очистки сточных вод с активным илом. В Модели ASM 1 включено восемь процессов. Компоненты, участвующие в протекании биохимических процессов модели ASM 1 и скорости реакций на основании кинетики Моно, приведены в таблице 4.

Международной ассоциацией исследования в области загрязнений воды приняты стандартные коэффициенты в модели ASM 1:  $Y_N = 0,67$  г ХПК/г N;  $Y_A = 0,24$  г ХПК/г N;  $\mu_N = 6$  сут<sup>-1</sup>,  $\mu_A = 0,8$  сут<sup>-1</sup>.

Таблица 4 – Процессы и компоненты модели ASM 1

Компоненты Реакции	S <sub>S</sub>	X <sub>S</sub>	X <sub>BH</sub>	X <sub>BA</sub>	X <sub>P</sub>	S <sub>O</sub>	S <sub>NO</sub>	S <sub>NH</sub>	X <sub>ND</sub>	S <sub>ALK</sub>	Скорость
Рост гетеротрофов в аэробных условиях	- 1/Y <sub>H</sub>		1			-(1-Y <sub>H</sub> ) /Y <sub>H</sub>		-0,086		-0,086-0,071	$\mu_H \cdot [S_S / (K_S + S_S)] \cdot [S_O / (K_{OH} + S_O)] \cdot [S_{NH} / (K_{NH} + S_{NH})] \cdot X_{BH}$
Рост гетеротрофов в анаэробных условиях	- 1/Y <sub>H</sub>		1				-(1-Y <sub>H</sub> )/(2,85·Y <sub>H</sub> )	-0,086		-0,086-0,071	$\mu_H \cdot [S_S / (K_S + S_S)] \cdot [K_{OH} / (K_{OH} + S_O)] \cdot [S_{NO} / (K_{NO} + S_{NO})] \cdot [S_{NH} / (K_{NH} + S_{NH})] \cdot \eta_g \cdot X_{BH}$
Рост автотрофов в аэробных условиях				1		-(4,57-Y <sub>A</sub> )/Y <sub>A</sub>	1/Y <sub>A</sub>	-0,086- 1/Y <sub>A</sub>		-(0,086+1/Y <sub>A</sub> ) •0,071+(1/Y <sub>A</sub> ) •0,071	$\mu_A \cdot [S_{NH} / (K_{NH} + S_{NH})] \cdot [S_O / (K_{OA} + S_O)] \cdot X_{BA}$
Отмирание гетеротрофов		1-f <sub>P</sub>	-1		f <sub>P</sub>						b <sub>H</sub> · X <sub>BH</sub>
Отмирание автотрофов		1-f <sub>P</sub>		-1	f <sub>P</sub>						b <sub>A</sub> · X <sub>BA</sub>
Аммонификация								1	0,086- f <sub>P</sub> ·i <sub>XP</sub>	0,071	k <sub>a</sub> · S <sub>ND</sub> · X <sub>BH</sub>
Гидролиз органики	1	-1									$k_H \cdot [(X_S / X_{BH}) / (K_X + X_S / X_{BH})] \cdot ([S_O / (K_{OH} + S_O)] + \eta_h \cdot [K_{OH} / (K_{OH} + S_O)] \cdot [S_{NO} / (K_{NO} + S_{NO})]) \cdot X_{BH}$
Гидролиз орган. азота									-1		$k_H \cdot (X_{ND} / X_S) \cdot [(X_S / X_{BH}) / (K_X + X_S / X_{BH})] \cdot ([S_O / (K_{OH} + S_O)] + \eta_h \cdot [K_{OH} / (K_{OH} + S_O)] \cdot [S_{NO} / (K_{NO} + S_{NO})]) \cdot X_{BH}$
	Биоразлагаемый субстрат (мгХПК/дм <sup>3</sup> )	Медленно биоразлагаемый субстрат (мгХПК/ дм <sup>3</sup> )	Активная гетеротрофная биомасса (мгХПК/ дм <sup>3</sup> )	Активная автотрофная биомасса (мгХПК/ дм <sup>3</sup> )	Инертная фракция от распада биомассы (мгХПК/л)	Кислород (мг/дм <sup>3</sup> )	Азот нитратов и нитритов (мгN/ дм <sup>3</sup> )	Аммонийный азот (мгN/ дм <sup>3</sup> )	Растворенный биоокисляемый органический азот (мгN/ дм <sup>3</sup> )	Щелочность, моль HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> · м <sup>3</sup>	

Адекватность стандартных коэффициентов модели ASM 1 проверялась применительно к процессу аэробной стабилизации активного ила в биореакторе периодического действия. При расчете модели использовались физико-химические показатели иловой смеси которые представлены в таблице 1 (серия экспериментов № 2). Сходимость результатов расчета по модели с экспериментальными показателями, оценивалась по образованию окисленных форм азота ( $N-NO_2^- + N-NO_3^-$ ). Полученные результаты представлены на рисунке 8.

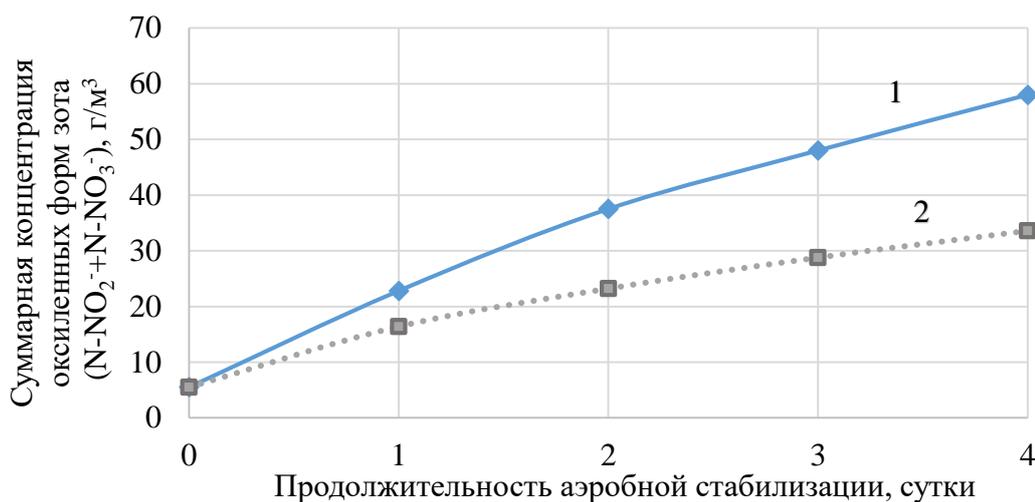


Рисунок 8 – Изменения концентраций окисленных форм азота ( $N-NO_2^- + N-NO_3^-$ ) в зависимости от времени аэробной стабилизации: 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные по модели ASM 1

Данные рисунка 8 свидетельствуют, о том, что полученные экспериментальные значения окисленных форм азота превышают расчетные значения по модели ASM 1. Несовпадение полученных значений указывает на необходимость корректировки стехиометрических коэффициентов удельной скорости роста гетеротрофных микроорганизмов, обеспечивающих распад беззольной части ила и высвобождение восстановленных форм азота с последующим их окислением.

На основании экспериментальных значений окисленных форм азота были определены стехиометрические коэффициенты для расчета роста автотрофных и гетеротрофных микроорганизмов в процессе аэробной стабилизации. Откорректированные коэффициенты модели для аэробной стабилизации представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Кинетические и стехиометрические коэффициенты модели ASM 1 для очистки сточных вод с активным илом и для аэробной стабилизации

Параметры	Индексы	Единицы измерения	Значения для очистки сточных вод с активным илом	Значения для аэробной стабилизации
Максимальный коэффициент прироста биомассы для нитрифицирующих бактерий	$Y_a$	г ХПК/г N	0,24	0,1
Максимальный коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных бактерий	$Y_H$	г ХПК/г N	0,67	0,5
Максимальный прирост гетеротрофов	$\mu_H$	сут <sup>-1</sup>	6,0	0,6
Максимальный коэффициент автотрофов	$\mu_A$	сут <sup>-1</sup>	0,8	0,8

Следует отметить, что основная корректировка заключалась в изменении коэффициента удельного роста гетеротрофов с 6 до 0,6 сут<sup>-1</sup>, а удельная скорость автотрофов осталась неизменной. После корректировки кинетических и стехиометрических коэффициентов в модели ASM 1 результаты теоретического расчета совпадают с экспериментальными.

**В пятой главе описана** реализация способа снижения патогенной обсеменённости избыточного активного ила, на основании которого предложена технологическая схема, включающая в себя аэробную стабилизацию ила с последующим введением негашёной извести. Технологическая схема представлена на рисунке 9.

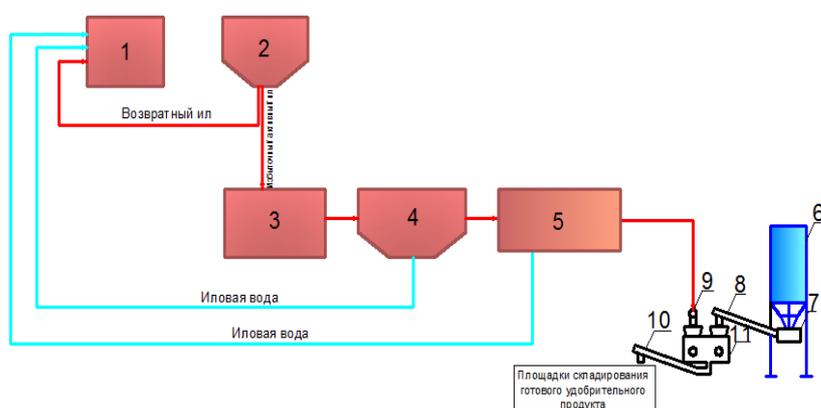


Рисунок 9 – Технологическая схема обработки избыточного активного ила:

- 1 – аэротенк, 2 – вторичный отстойник, 3 – аэробный стабилизатор,
- 4 – илоуплотнитель, 5 – мешковый обезживатель, 6 – бункер извести,
- 7 – дозатор извести, 8 – шнековый конвейер извести,
- 9 – шнековый конвейер обезвоженного активного ила,
- 10 – шнековый конвейер смеси ила с негашёной известью,
- 11 – смеситель ила с известью.

Принципиальная технологическая схема включает следующие этапы обработки: аэробная стабилизация, илоуплотнение, обезвоживание, обработка негашёной известью. Избыточный активный ил из вторичного отстойника направляется в аэробный стабилизатор, где он подвергается аэробной стабилизации не менее двух суток. Стабилизированный осадок подается на илоуплотнитель для уменьшения влажности с 99,7 до 98,5%. Далее уплотненный осадок подается на мешковой обезвоживатель ОНИКС. После обезвоживания осадок направляется на химическую обработку негашёной известью. Используется кальциевая известь, в состав которой входит 85 – 90% CaO и менее 5% оксида магния. Дозировка извести производится в автоматическом режиме при помощи дозатора. В качестве смесителя извести и осадка используется шнековый смеситель, который оборудован двумя параллельными горизонтальными валами, оснащёнными плоскими лопастями. Готовый продукт подается в накопительный бункер для временного хранения. Обработанный удобрительный продукт специальным автотранспортом вывозится для рекультивации неплодородных земельных участков.

На основе расчета основных сооружений и количества обработанного осадка, представлена балансовая схема получения удобрительного материала (Рисунок 10).

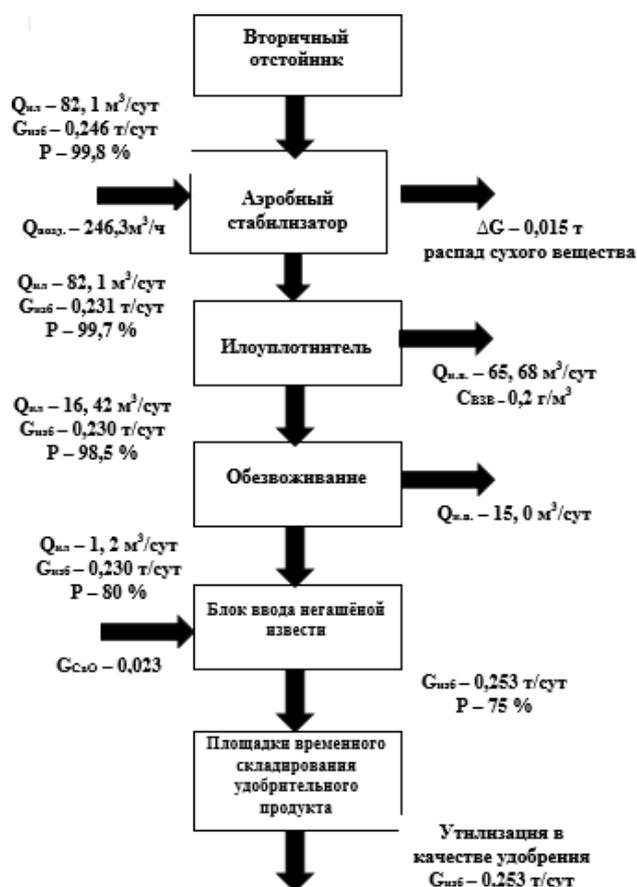


Рисунок 10 – Балансовая схема обработки избыточного активного ила для последующей его утилизации в качестве удобрения

Чистая годовая прибыль при использовании готового удобрительного материала на основе избыточного активного ила составила 2 млн. 760 тыс. рублей в год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ основных направлений использования активного ила; установлено, что наиболее рациональным направлением является применение его в качестве удобрительного материала или рекультиванта неплодородных почв. Одним, из основных сдерживающих факторов выступает наличие патогенных микроорганизмов. Существующие методы снижения патогенной обсеменённости основываются на реагентной и тепловой обработке. Однако данные методы не нашли широкого применения при эксплуатации на станциях биологической очистки из-за сложности применяемого оборудования и высоких энергетических затрат.

2. Теоретически обоснованы аспекты повышения окислительно-восстановительного потенциала в процессе аэробной стабилизации. В процессе аммонификации беззольной части активного ила происходит выделение азота аммонийного, что создает условия для протекания процессов нитрификации, конечным итогом которых является образование нитритов и нитратов, способствующих повышению ОВП. Повышение ОВП среды оказывает губительное действие на анаэробные патогенные микроорганизмы, заселяющие активный ил.

3. На основании экспериментальных исследований установлено, что максимальное увеличение ОВП достигало значения +500 мВ на вторые сутки аэробной стабилизации, после чего особых изменений не наблюдалось. При концентрации нитратов  $N-NO_3^-$  более 35 мг/дм<sup>3</sup>, повышение ОВП достигало максимального значения +500 мВ.

4. Экспериментально установлено, что с целью снижения патогенной обсеменённости ила по показателям БГКП и *Salmonella* требуется не менее двух суток аэробной стабилизации в непроточных условиях. При этом эффективность снижения патогенности ила в среднем составила для БГКП – 76%, *Salmonella* – 71,6%. Такая тенденция снижения патогенности ила напрямую коррелируется с ростом ОВП среды.

5. В процессе экспериментальных исследований была определена относительная стабильность осадка после двух суток аэробной стабилизации, которая составила 81%. Полученные данные свидетельствуют о том, что стабилизированный осадок в течение двух суток не будет подвержен загниванию в течение последующих семи суток за счет протекания окислительных процессов.

6. Впервые адаптирована модель ASM 1 с откорректированными стехиометрическими коэффициентами для расчета роста и отмирания гетеротрофных и автотрофных микроорганизмов в процессе аэробной стабилизации в биореакторе периодического действия, которые составили:  $Y_H$

– 0,5 г ХПК/г N;  $Y_A$  – 0,1 г ХПК/г N;  $\mu_H$  – 0,6 сут<sup>-1</sup>,  $\mu_A$  – 0,8 сут<sup>-1</sup>.

7. Определена минимально необходимая доза негашёной извести, (10% от массы сухого вещества осадка) после стабилизации в биореакторе периодического действия, обеспечивающая гибель патогенных микроорганизмов. Относительная стабильность осадка после обработки негашёной известью достигает 99%.

8. Разработаны рекомендации для проектирования комплексной обработки избыточного активного ила, основанные на аэробной стабилизации с последующей обработкой щелочным реагентом. Полученный удобрительный материал может использоваться под рекультивацию неплодородных почв. Чистая годовая прибыль при реализации удобрительного материала для станций очистки сточных вод производительностью 1000 м<sup>3</sup>/сут составила 2 млн. 760 тыс. рублей в год.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– Публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1) Нездойминов, В.И. Аспекты обеззараживания осадков сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов / В.И. Нездойминов, В.Н. Чернышев, А.В. Могукало, В.Ф. Кижаяев // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность: сб. науч. тр. – 2018. – №5(133). – С. 79-84. *(Рассмотрены методы извлечения ионов тяжелых металлов в целях использования осадков образующихся на очистных станциях, в качестве удобрения).*

2) Нездойминов, В.И. Possibility of using Excessive Active Sludge as Organomineral Fertilizer / В.И. Нездойминов, А.В. Могукало, Т.И. Загоруйко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий: сб. науч. тр. – 2021. – №3(149). – С. 56-61. *(Проведены исследования по определению содержания ионов тяжелых металлов в образующемся избыточном активном иле с очистных сооружений Макеевки).*

3) Нездойминов, В.И. Современные подходы к обеззараживанию избыточного активного ила с последующим его использованием / В.И. Нездойминов, А.В. Могукало, А.В. Жибоедов // Научно-практический журнал «Строитель Донбасса». – 2021. – № 2 (15). – С. 20 – 25. *(Исследованы термический и реагентный методы снижения патогенной обсеменённости избыточного активного ила)*

4) Чернышев, В.Н. Аэробная стабилизация смеси сырого осадка и неуплотненного активного ила с рециркуляцией иловой воды / В.Н. Чернышев, А.В. Могукало, В.В. Ручка // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий: сб. науч. тр. – 2022. – №5(157). – С. 43-50. *(Рассмотрена технологическая схема аэробной стабилизации с*

*рециркулирующей иловой воды, обеспечивающая сокращение продолжительности обработки смеси сырого осадка и активного ила).*

5) Нездойминов, В.И. Влияние окислительно-восстановительного потенциала на снижение патогенной обсеменённости активного ила при аэробной стабилизации / В.И. Нездойминов, А.В. Могукало // Сетевое научное периодическое издание журнал «Современное промышленное и гражданское строительство». – 2022. – Том 18 № 4. – С. 167-175. *(Рассмотрен биологический метод обработки избыточного активного ила, основанный на изменении окислительно-восстановительного потенциала среды).*

6) Нездойминов, В.И. Повышение окислительно-восстановительного потенциала иловой смеси в процессе нитрификации / В.И. Нездойминов, А.В. Могукало // Сетевое научное периодическое издание журнал «Современное промышленное и гражданское строительство». – 2023. – Том 19 №1. – С. 33 – 40. *(Определена эффективность снижения патогенной обсеменённости активного ила по показателям бактериальной группы кишечной палочки и Salmonella).*