

На правах рукописи

Базарова Анастасия Олеговна

**БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД
МАСЛОЭКСТРАКЦИОННЫХ ЗАВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
АЭРОБНЫХ ТЕРМОФИЛЬНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ**

2.1.4. – Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара

2023

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

Научный руководитель:

Стрелков Александр Кузьмич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Баженов Виктор Иванович
доктор технических наук, профессор
исполнительный директор ЗАО «Водоснабжение и водоотведение»; руководитель секции ЭТС РАВВ «Энергоэффективность сооружений и систем водоснабжения и водоотведения».

Катраева Инна Валентиновна
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», доцент
кафедра «Водоснабжение, водоотведение, инженерная экология и химия»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»;
(ФГБОУ ВО «УГНТУ»)

Защита состоится «7» июля 2023 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте <http://samgtu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Тупицына Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Сточные воды маслоэкстракционных заводов характеризуются значительными концентрациями загрязнений и высокой температурой, что создает трудности при применении существующих методов физико-химической и биологической очистки, которые в большинстве случаев не обеспечивают выполнение нормативов, установленных для сброса в сети городской канализации. Поэтому требуется разработка новых эффективных технологий очистки данной категории сточных вод. Применение аэробных термофильных процессов для биологической очистки сточных вод является новым направлением и практически не изучено. В связи с этим исследование процессов биологической очистки сточных вод маслоэкстракционного производства специализированными аэробными термофильными микроорганизмами является актуальным.

Степень разработки темы. Методы биологической очистки отображены в работах С.В. Яковлева, И.В. Скирдова, В.Н. Швецова, А.А. Бондарева, К.М. Морозовой и др. Качественный и количественный состав сточных вод, поступающих от предприятий маслоэкстракционного производства, изучен в работах В.С. Мачигина. Исследованием возможности использования микроорганизмов для очистки жиросодержащих сточных вод занимались российские ученые Т.В. Меледина, А.А. Соколова, Л.А. Федосеева, Н.В. Проскорякова, Н.В. Кобызева и зарубежные авторы Abdul Karim M.I., Bhumibhamon O., Da-Silva O., Deive F.J., Lasik M, Prasad M., Rattanapan C., Sipinyte V. и др.

Цель работы – создание эффективной технологии биологической очистки сточных вод маслоэкстракционного производства с применением аэробных термофильных микроорганизмов.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Исследовать качественный состав сточных вод маслоэкстракционного производства.

2. Обосновать применение аэробных термофильных микроорганизмов для биологической очистки сточных вод с температурой от 40 до 55°C и определить конструкцию биореактора и оптимальные технологические параметры.

3. Определить кинетические константы биологической очистки с применением аэробных термофильных микроорганизмов на сточных водах предприятий маслоэкстракционного производства.

4. Разработать метод оценки количества иммобилизованной биомассы при окислении жиров.

5. Разработать технологическую схему и методику расчета очистных сооружений предприятий маслоэкстракционного производства с применением аэробных термофильных микроорганизмов.

6. Выполнить технико-экономическое обоснование предложенной технологии.

Объект исследования: сточные воды предприятия маслоэкстракционного производства.

Предмет исследования: технология биологической очистки с применением аэробных термофильных микроорганизмов.

Научная новизна диссертации

1. Впервые определены основные технологические параметры биологической очистки сточных вод предприятий маслоэкстракционного производства с применением биоценоза (чистых культур) аэробных термофильных микроорганизмов, иммобилизованных на инертной загрузке.

2. Получены значения кинетических констант процессов окисления органических веществ при биологической очистке сточных вод маслоэкстракционного производства с применением аэробных термофильных микроорганизмов.

3. Доказано, что эффективность очистки при температуре от 35 до 55 °C, обеспечивается биоценозом одноклеточных низших грибов, иммобилизованных на загрузке, при меньшей температуре имеет место симбиоз бактериального активного ила и одноклеточных низших грибов.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

1. Впервые предложена и экспериментально обоснована технология биологической очистки сточных вод маслоэкстракционного производства с применением иммобилизованного биоценоза аэробных термофильных микроорганизмов в составе биопрепарата при температуре до 55 °С.

2. Доказана целесообразность применения метода определения липолитической активности для качественной и количественной оценки биоценоза иммобилизованных аэробных термофильных микроорганизмов в биореакторе при очистке жиросодержащих сточных вод.

3. Разработана методика расчета сооружений биологической очистки с применением аэробных термофильных микроорганизмов для очистки сточных вод предприятий маслоэкстракционного производства.

Методология и методы исследования. Теоретической базой исследования являются фундаментальные закономерности ферментативной кинетики. Методологической базой исследования служили методы определения скоростей ферментативных реакций в контактных (лабораторных) и проточных (пилотных) условиях.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность основных выводов подтверждается воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований, проведенных в контактных и пилотных условиях, выполнением химических анализов в аккредитованной лаборатории на поверенных приборах по стандартизированным методикам.

Положения, выносимые на защиту

1. Технология биологической очистки сточных вод с применением аэробных термофильных микроорганизмов на предприятиях маслоэкстракционного производства при температуре до 55 °С и значения кинетических констант процессов окисления органических веществ сточных вод данного производства.

2. Методика количественного определения липолитической активности биоценоза иммобилизованных термофильных микроорганизмов в сточных водах.

3. Методика расчета биореакторов для очистки сточных вод маслоэкстракционного производства с применением аэробных термофильных микроорганизмов.

4. Техничко-экономическое обоснование применения аэробных термофильных микроорганизмов для очистки сточных вод маслоэкстракционного производства.

Личный вклад автора в диссертационную работу состоит в постановке целей и задач исследования, разработке методики проведения исследования, обработке и анализе полученных результатов, в непосредственном участии и проведении лабораторных и пилотных экспериментов, формулировании основных научных положений, выносимых на защиту, их опубликование и апробация на действующих производственных объектах.

Реализация работы

Результаты диссертационной работы приняты для реконструкции существующих очистных сооружений производительностью 800 м³/сут маслоэкстракционного завода АО «Самараагропромпереработка», п.г.т. Безенчук Самарской области, также приняты в проектную практику ООО НПФ «ЭКОС» и внедрены в учебный процесс кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Апробация результатов

Основные результаты работы доложены: на международной научно-практической конференции, приуроченной к 130-летию кафедры водопользования и экологии «Современные проблемы водоснабжения и водоотведения», Санкт-Петербург, 2018; 77-й научно-технической конференции АСА СамГТУ «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии», Самара, 2018; XIII Международной научно-практической конференции «Перспективы развития строительного комплекса», Астрахань, 2019; международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня образования факультета водоснабжения и водоотведения МИСИ – МГСУ, Москва, 2019; международной научно-практической конференции «Молодежь и наука»,

Нижний Тагил, 2020; XVI Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева, Москва, 2021; International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies (CAEST), г. Самара 2021 г.

Публикации по результатам исследований. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 1 в базе данных Scopus, 4 в изданиях из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 114 страницах машинного текста и включает в себя введение, 4 главы, список литературы из 110 наименований, содержит 48 рисунков, 20 таблиц и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, решение которых позволило обосновать эффективность применения биоценоза аэробных термофильных микроорганизмов для очистки сточных вод при температуре до 55 °С и определить основные технологические параметры, кинетические константы и коэффициенты биологической очистки сточных вод предприятий маслоэкстракционного производства.

В первой главе, на основании анализа изученной литературы, показана перспективность применения биологической очистки сточных вод маслоэкстракционного производства, однако из-за высокой температуры требуется ее усовершенствование. Определено, что перспективным направлением является разработка технологии биологической очистки жиросодержащих сточных вод с помощью термофильных микроорганизмов и созданных на их основе биопрепаратов, обладающих способностью утилизировать жировые вещества различной природы при температуре до 55 °С.

Во второй главе представлен анализ состава сточных вод и методов локальной очистки, а также теоретические предпосылки и методики проведения исследований.

Сбор и анализ общих данных по маслоэкстракционным заводам ООО «БоМЭЗ» с. Богатое и АО «Самараагропромпереработка» п.г.т. Безенчук

показал, что температура сточных вод, поступающих на очистные сооружения, составляет 40-55 °С. Показатели исходных сточных вод маслоэкстракционного завода п.г.т. Безенчук отображены в табл. 1. Особенностью данной категории сточных вод является низкое содержание биогенных элементов. Диктующими показателями для анализа эффективности очистки выбраны ХПК, БПК₅ и жиры.

Таблица 1

Показатели сточных вод, поступающих на очистные сооружения маслоэкстракционного завода АО «Самараагропромпереработка», мг/л

Показатель	Минимальные значения	Максимальные значения	Средние значения
рН	7,1	9,51	8,3
БПК ₅	72	1532	802
ХПК	226	4816	2521
Взвешенные вещества		306	306
СПАВ	1,3	Более 10	1,3
Жиры	22	494	258
Нефтепродукты	0,6	2,87	1,735
Фенол	<0,0005	0,11	0,11
Азот аммонийный	0,9	7,8	4,35
Азот нитратов	0,72	2,35	1,535
Азот нитритов	0,065	0,38	0,2225
Фосфор фосфатов	0,28	0,57	0,425

В лабораторных условиях исследования с применением биоценоза микроорганизмов в составе биопрепарата проходили одновременно в двух идентичных реакторах периодического действия (SBR) с полезным объемом 5 л (рис. 1). Для иммобилизации микрофлоры были применены фрагменты блоков биологической загрузки ББЗ-45 в количестве 20 % от объема реактора. В реакторы первоначально было введено 5 л сточной воды из существующего усреднителя, новые порции вводили ежедневно в количестве 1-1,5 л. Цикл работы SBR: аэрация (23 ч), отстаивание (1 ч), отбор проб и введение новой порции сточных вод. Разовая доза биопрепарата для запуска биологической очистки в аэробных условиях составила 0,5 г/л. Каждые 24 часа определялись ХПК и концентрация жиров. Фрагменты сетчатой оболочки ББЗ предварительно взвешивались, нумеровались и закреплялись по периферии SBR. Через 10 дней образцы извлекались, высушивались при температуре 80 °С до постоянной массы и взвешивались. По разности массы образца до и после оценивалось количество

биоупленки по сухому веществу, которое затем пересчитывалось на единицу массы загрузки.

Микрокопирование образованной биомассы осуществлялось с использованием оптического (светового) микроскопа ЛОМО Микмед-1 с увеличением $180\times$ и микроскопа XSP-45 с увеличением $10\times$.

Эксперименты на пилотной установке были выполнены в условиях АО «Самараагропромпереработка» п.г.т. Безенчук на реальных сточных водах. Установка включала усреднитель объемом 100 л, биореактор полезным объемом 40 л, отстойник полезным объемом 80 л и насос подачи исходной воды (рис. 2). Производительность насоса составляла 2–13 л/ч, продолжительность пребывания в биореакторе 3 – 20 ч.

В аэрационное сооружение при пуске была введена доза биопрепарата 62,5 мг на 1 л реактора (2,5 г на 40 л объема реактора) по сухому веществу, а для поддержания количества биомассы каждые 4 дня дозировали 25 мг/л (1 г на 40 л) биопрепарата по сухому веществу.

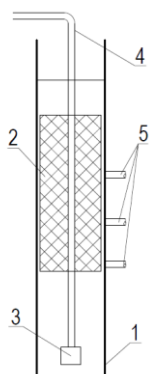


Рис. 1. Схема реактора периодического действия (SBR): 1 – корпус; 2 – биологическая загрузка (ББЗ); 3 – аэратор; 4 – подача воздуха; 5 – пробоотборники

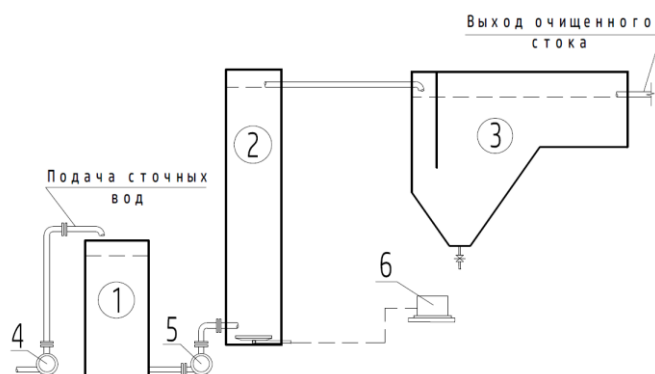


Рис. 2. Схема пилотной установки: 1 – усреднитель; 2 – биореактор; 3 – отстойник; 4 – насос подачи исходной воды; 5 – насос подачи из усреднителя; 6 – компрессор

Химические анализы были выполнены по стандартным методикам. Концентрация жиров определялась по ПНД Ф 14.1:2.122-97, при низких концентрациях жиров (до 10 мг/л) в ряде случаев была применена методика ПНД Ф 14.1:2.189-02.

Для характеристики прироста иммобилизированной биомассы микроорганизмов, окисляющих жиры, предложена методика определения липолитической активности. Для определения активности фермента использовали набор «ЛИПАЗА» (LPS, «ДиаВетТест», Россия) для полуавтоматических анализаторов, адаптировав для определения в очищенной воде из биореактора.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований по биологической очистке с применением аэробных термофильных микроорганизмов на реальных сточных водах маслоэкстракционных заводов ООО «БоМЭЗ» с. Богатое и АО «Самараагропромпереработка» п.г.т. Безенчук.

Для слабokonцентрированного стока ООО «БоМЭЗ» были выбраны биопрепараты «Русский богатырь № 4» (очистка промышленных сточных вод) и «Русский богатырь № 5» (очистка промышленных сточных вод с высоким содержанием жиров). Состав биопрепаратов, по данным производителя, включает грамположительные спорообразующие факультативно-аэробные почвенные бактерии (*Bacillus subtilis*, *Bacillus polymyxa*).

Эксперимент был проведен в лабораторном SBR (рис. 1) при температуре сточных вод 23–25 °С и концентрации растворенного кислорода в реакторе 5–7 мг/л. Первый режим – время пребывания 4,79 сут, расход 1 л/сут; второй режим – 3,21 сут, расход 1,5 л/сут. На первом режиме работы установки ХПК очищенной воды составляла в среднем для биопрепарата №4 – 177 мг/л и для биопрепарата №5 – 189 мг/л. На втором режиме в среднем получено ХПК очищенной воды для биопрепарата №4 – 117 мг/л и для биопрепарата №5 – 113 мг/л. Средняя эффективность очистки органических веществ по ХПК при применении биопрепарата №4 составила: 1-й режим – 64 %, 2-й режим – 73 %. При применении биопрепарата №5: 1-й режим – 61 %, 2-й режим – 74 %. Эффективность очистки по жирам составила 100 % при концентрации жира в исходной сточной воде 14 мг/л.

Фотографирование призм показало, что микроорганизмы в составе биопрепаратов хорошо закрепляются на загрузке (рис. 3 и 4).



Рис. 3. Биомасса, образованная при применении биоценоза микроорганизмов в составе биопрепарата «Русский Богатырь № 4» при температуре до 25 °С

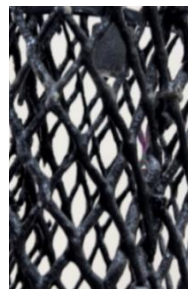


Рис. 4. Биомасса, образованная при применении биоценоза микроорганизмов в составе биопрепарата «Русский Богатырь № 5» при температуре до 25 °С

Было проведено микроскопирование при 25 °С, которое подтвердило прирост иммобилизованной чистой культуры и развитие бактериального активного ила при использовании биопрепарата «Русский богатырь №4» (рис. 5) и «Русский богатырь №5», однако бактериальный ил последнего был скудным (рис. 6).

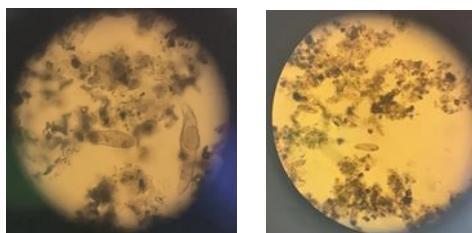


Рис. 5. Структура образованной биомассы и организмы (notommata ansata, litonotus lamella), присутствующие при применении биопрепарата «Русский Богатырь № 4» при температуре 25°С и увеличении 180^х

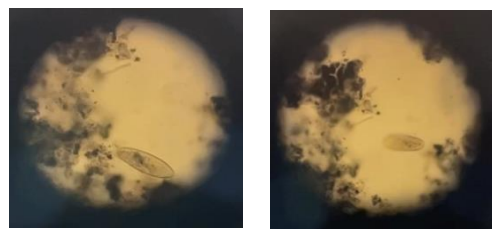


Рис. 6. Структура образованной биомассы и организмы (lironotus lamella), присутствующие при применении биопрепарата Богатырь № 5» при температуре 25°С и увеличении 180^х

В конце лабораторного эксперимента был рассчитан прирост биомассы в SBR, который при введении биопрепарата «Русский Богатырь № 4» за 10 дней составил 0,24 г на 1 л объема реактора, что подтвердило перспективность его применения для биологической очистки. В то же время при использовании биопрепарата «Русский Богатырь №5», напротив, наблюдалось снижение общей биомассы, что коррелирует с фото на рис. 3 и 4.

При увеличении температуры сточных вод в биореакторе до 45 °С наблюдался активный рост иммобилизованной биомассы биопрепарата «Русский Богатырь № 4» и заполнение сот ББЗ (рис. 7).



Рис. 7. Биомасса, образованная при применении биопрепарата «Русский Богатырь № 4» при температуре 45 °С

Сравнение микроскопирования полученного биоценоза (рис. 8) и пищевых дрожжей (рис. 9) демонстрирует их идентичность, что дает возможность предположить, что биопрепарат имеет в своем составе одноклеточные низшие грибы.

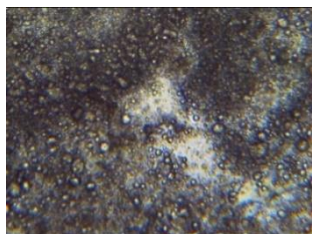


Рис. 8. Микроскопирование биомассы при применении биопрепарата «Русский Богатырь № 4» (45 °С, увеличение 10^х)

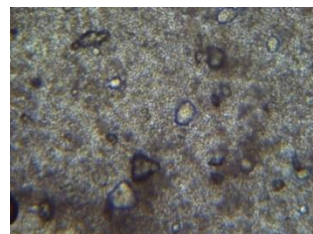


Рис. 9. Микроскопирование пищевых дрожжей (45 °С, увеличение 10^х)

Из рис. 3, 4, 7 видно, что биомасса интенсивно развивается на загрузке и почти отсутствует в свободном объеме, что позволяет сделать вывод о целесообразности применения ББЗ для удержания биомассы в системе, увеличения стабильности процессов очистки при низких концентрациях органических веществ. Для дальнейших исследований в проточных условиях на сточных водах предприятия маслоэкстракционного производства, выбран биоценоз микроорганизмов в составе биопрепарата «Русский Богатырь №4».

Исследования на пилотной установке (рис. 2) проводились на территории маслоэкстракционного завода АО «Самараагропромпереработка» в период с 30.06.2021 по 30.10.2021 гг. Первоначально время пребывания в установке составляло 3 ч – первый режим. За весь период наблюдения температура поступающих сточных вод изменялась от 40 до 59 °С, концентрация растворенного кислорода в реакторе находилась в диапазоне от 0,34 до 2,31 мг/л. Концентрация жира в поступающих сточных водах изменялась от 22 до 198 мг/л, в сред-

нем – 90 мг/л, в очищенных сточных водах – находилась в пределах от 2 до 48 мг/л, в среднем – 21 мг/л. Эффективность очистки по жирам составила 77 %. Содержание органических загрязнений по ХПК в исходной сточной воде изменялось от 226 до 728 мг/л, в среднем – 401 мг/л, в очищенной сточной воде – от 68 до 266 мг/л, в среднем – 164 мг/л. Эффективность очистки по ХПК достигала 60 %.

Во втором режиме время пребывания в установке было увеличено до 20 ч. Концентрация жиров в исходных сточных водах изменялась от 268 до 494 мг/л, составляла в среднем 395 мг/л, в очищенных сточных водах – от 4 до 43 мг/л, в среднем – 16 мг/л, эффективность очистки в среднем достигла 96 %. Концентрация органических веществ по БПК₅ в исходной сточной воде изменялась от 768 до 1532 мг/л, в среднем – 1035 мг/л, в очищенной сточной воде – от 68 до 192 мг/л, в среднем – 133 мг/л, эффективность очистки составила в среднем 87 %. ХПК исходных сточных вод изменялась от 883 до 4816 мг/л, в среднем – 2278 мг/л, в очищенной сточной воде – от 168 до 489 мг/л, в среднем – 279 мг/л), эффективность очистки в среднем составила 88 %.

Обработка результатов проведенных исследований на пилотной установке в широком диапазоне температур позволила определить температурную константу χ по уравнению Вант-Гоффа для основных загрязняющих компонентов. Для жира χ составила $0,0478\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, для БПК₅ – $0,0496\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, для ХПК – $0,046\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (рис. 10–12).

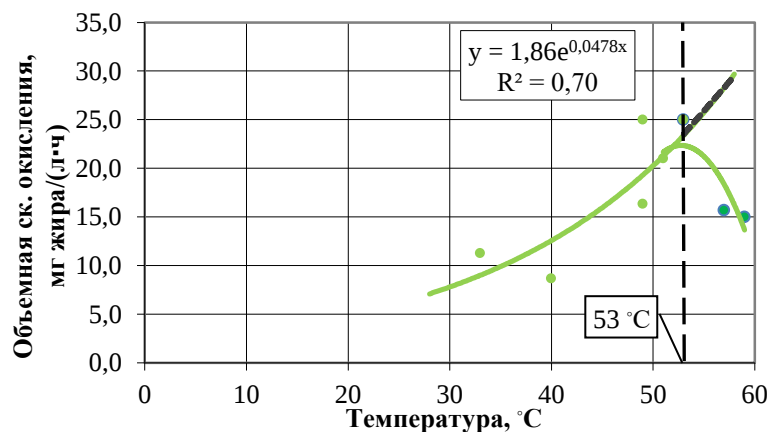


Рис. 10. Зависимость объемной скорости окисления по жирам от температуры

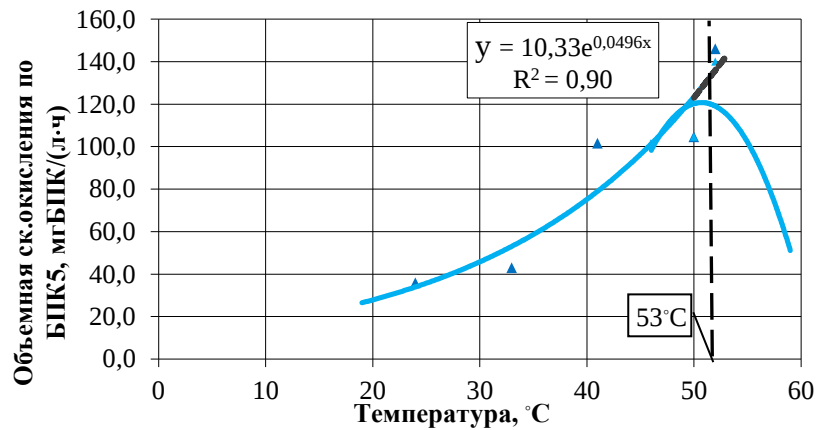


Рис. 11. Зависимость объемной скорости окисления по BPK₅ от температуры

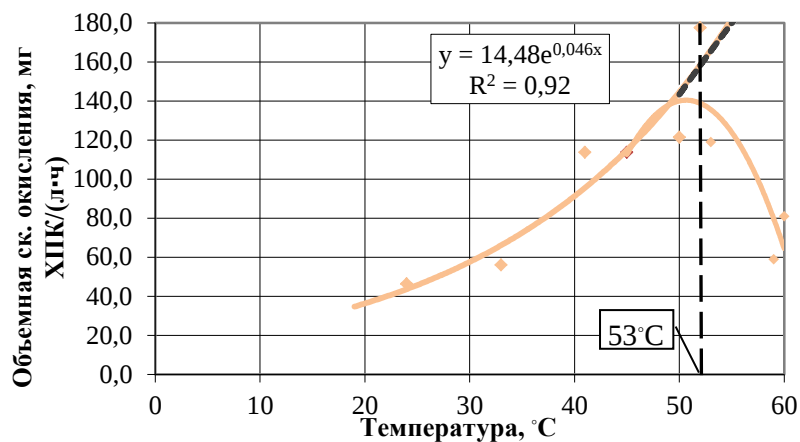


Рис. 12. Зависимость объемной скорости окисления по ХПК от температуры

Установлено, что объемная скорость с повышением температуры возрастает, а после 53 °С – снижается, что соответствует данным производителя.

На основании проведенных исследований, получены основные зависимости окислительной мощности по ХПК, BPK₅ и жирам от концентрации этих веществ в очищенной воде. Через коэффициент χ окислительная мощность по каждому компоненту была приведена к стандартной температуре 40 °С: по ХПК достигала 5,4 кг/(м³·сут), BPK₅ – 4,2 кг/(м³·сут), жирам – 1,3 кг/(м³·сут). Используя полученные зависимости по окислительной мощности, определены кинетические константы окисления органических веществ, необходимые для расчета аэрационных сооружений.

Кинетика окисления жиров и органических загрязнений по BPK₅ описывается уравнением Михаэлиса-Ментен, а кинетика снижения ХПК – модифицированным уравнением с наличием инертной составляющей. Кинетические за-

висимости вместе с соответствующими уравнениями представлены на рис. 13–15.

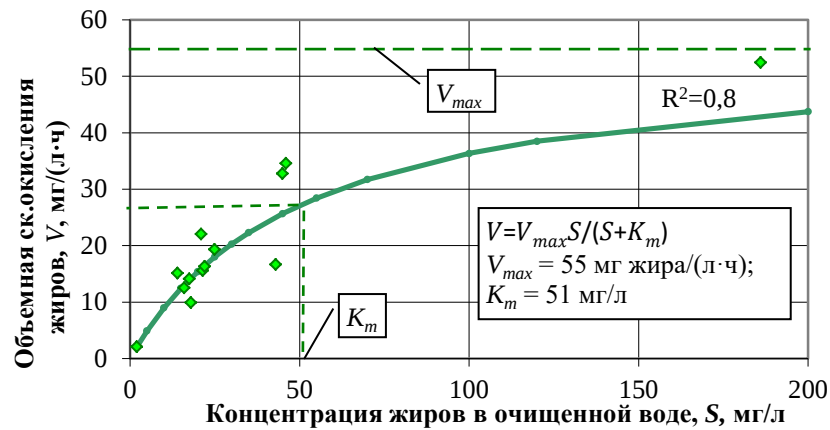


Рис. 13. Кинетика окисления жиров

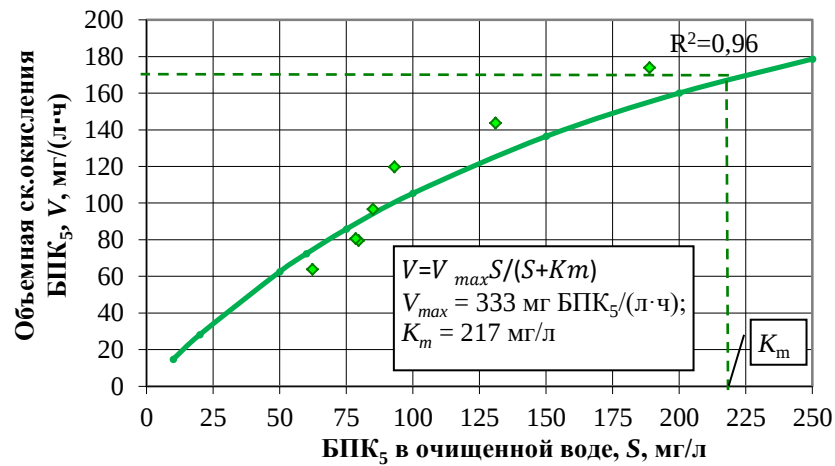


Рис. 14. Кинетика окисления органических веществ по BPK_5

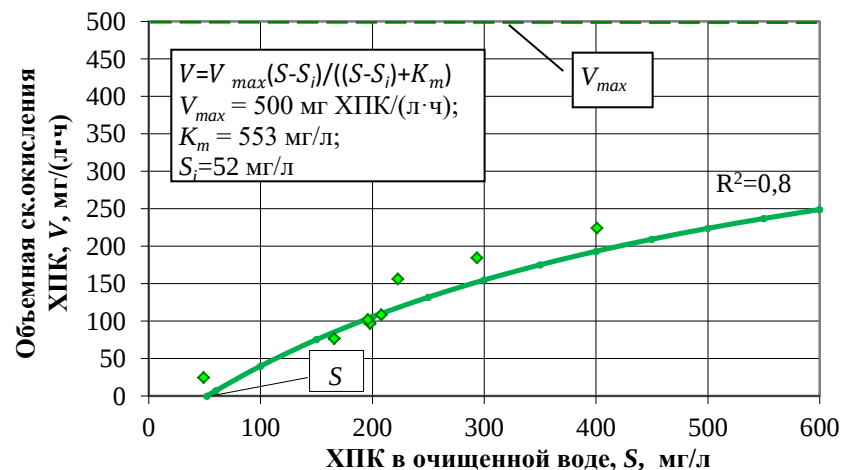


Рис. 15. Кинетика окисления органических веществ по XPK

Методом линеаризации – двойных обратных величин, были определены кинетические константы V_{max} и K_m для каждого из загрязнений (табл. 2).

Таблица 2

Значения кинетических констант процессов биологической очистки сточных вод предприятий маслоэкстракционного производства

Показатель	Жиры	БПК ₅	ХПК
$V_{\max}$, мг/(л·ч)	55	333	500
K_m , мг/л	51	217	553
χ , °C ⁻¹	0,0478	0,0496	0,046
S_i , мг/л	-	-	52

Полученные температурные константы близки по значению, что позволяет применить среднее значение χ для всех показателей (0,048 °C⁻¹) для рассматриваемого вида сточных вод.

Поскольку в данном эксперименте было затруднено определение количества биомассы, все зависимости получены по объемной скорости. Для расчета удельной скорости были проведены исследования по определению экзофермента липазы, окисляющей жиры. Результаты данного эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

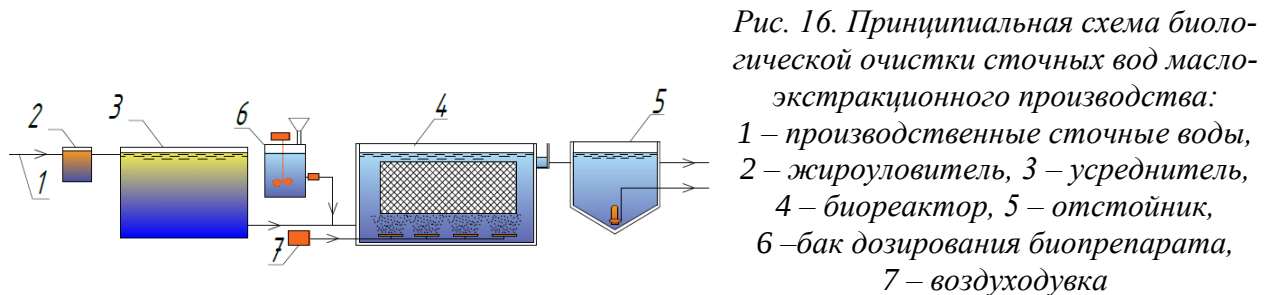
Определение липолитической активности в сточных водах маслоэкстракционного производства при введении биоценоза

Дата	Доза биопрепарата, мг/л	Макс. знач. липолитической активности, Е/л	Мин. знач. липолитической активности, Е/л	Ср. знач. липолитической активности, Е/л
6.09.2021	62,5	13,59	4,53	9,06
7.09.2021	-	13,59	9,06	11,33
8.09.2021	-	77,0	69,06	73,03
9.09.2021	-	7,34	2,43	4,89
10.09.2021	-	13,59	9,06	11,325

Получено, что при первоначальной дозе биопрепарата 62,5 мг/л липолитическая активность в биореакторе составила 9,06 Е/л. На следующие сутки липолитическая активность увеличилась до 11,325 Е/л, на третьи сутки – до 73,03 Е/л. Далее, 9.09.2021 г. из аэрационного сооружения произошел вынос биомассы (по техническим причинам), из-за чего имело место снижение липолитической активности с 73,03 до 4,89 Е/л, а также в этот период снизилось качество очистки по S_i с 2 до 22 мг/л. После восстановления работы реактора липолитическая активность вновь увеличилась до 11,33 Е/л. Увеличение липолитической активности указывает на прирост микроорганизмов биопрепарата. Таким образом, определение фермента липазы позволяет определить удельную скорость окисления как объемную скорость, отнесенную на единицу ак-

тивности липазы, мг/(Е·ч), и получить основные кинетические зависимости по удельной скорости окисления, а также может служить для контроля и оценки прироста аэробных термофильных микроорганизмов в биореакторе.

В четвертой главе разработана технология и методика расчета сооружений очистки сточных вод предприятий маслоэкстракционного производства с применением аэробных термофильных микроорганизмов. Рекомендуемая технологическая схема сооружений представлена на рис. 16.



Расчет биореактора с применением аэробных термофильных микроорганизмов основан на использовании полученных в ходе пилотного эксперимента кинетических констант (табл. 3).

Объемная скорость окисления органических веществ V с учетом влияния температуры, при конкретном качестве очистки воды, определяется по формулам, мг/(л·ч):

$$V_{\text{ЖИР,БПК}} = \frac{V_{\max(\text{ЖИР,БПК})} [\text{ЖИР,БПК}]_{\text{вых}} e^{\chi(t-t_{\text{ст}})}}{([\text{ЖИР,БПК}] + K_{m \text{ ЖИР,БПК}})}, \quad (1)$$

$$V_{\text{ХПК}} = \frac{V_{\max(\text{ХПК})} [\text{ХПК}_{\text{вых}} - S_i] e^{\chi(t-t_{\text{ст}})}}{([\text{ХПК} - S_i] + K_{m \text{ ХПК}})}, \quad (2)$$

Продолжительность окисления органических веществ T в аэробной зоне может быть определена по формуле, ч:

$$T = \frac{[\text{ЖИР, БПК, ХПК}]_{\text{вход}} - [\text{ЖИР, БПК, ХПК}]_{\text{вых.}}}{V_{\text{жир, БПК, ХПК}}} \quad (3)$$

Результаты расчета представлены в табл. 4. Лимитирующим показателем для расчета аэрационного сооружения оказались жиры.

Таблица 4

Результаты расчета для достижения норм сброса в сети города

Показатель	Жиры	БПК ₅	ХПК
Концентрация в исходной сточной воде, мг/л	400	1200	1500
Концентрация в очищенной воде, мг/л	50	300	500
Объемная скорость окисления, V , мг/(л·ч)	34,6	248,1	223,8
Продолжительность аэрации, T , ч	10,1	3,6	4,3

При времени пребывания 10,1 ч и достижении норм сброса по жирам, процесс окисления органические вещества по БПК₅ и ХПК будет проходить глубже (табл. 5).

Таблица 5

**Результаты расчета при времени пребывания 10,1 ч
для достижения норм сброса в сети городской канализации**

Показатель	Жиры	БПК₅	ХПК
Концентрация в очищенной воде, мг/л	50	76	220
Объемная скорость окисления V , мг/(л·ч)	34,6	111	146,6

Объем аэрационного сооружения рассчитывается по формуле, м³:

$$V_{\text{аэр}} = q_{\text{расч}} \cdot T, \quad (4)$$

Рабочий объем аэрационного сооружения составил 350 м³.

Технико-экономическое сравнение выполнено для двух вариантов нового строительства сооружений очистки сточных вод для условий маслоэкстракционного завода АО «Самараагропромпереработка»:

1-й вариант – биологическая очистка в биореакторах с иммобилизованным на ББЗ биоценозом аэробных термофильных микроорганизмов.

2-й вариант – физико-химическая очистка с охлаждением поступающих сточных вод до 25 °С.

Схема флотационной реагентной очистки (2-й вариант) включает сооружения доочистки в виде последовательно расположенных напорных фильтров с песчаной и сорбционной загрузкой; в качестве флокулянта применяется Праестол 853 ВС.

Состав исходных и очищенных сточных вод по основным загрязнителям принят в соответствии с табл. 4. Концентрация биогенных элементов в исходной сточной воде, мг/л: азот аммонийный – 7,8; азот нитратов – 2,35; фосфор фосфатов – 0,57.

Производительность очистных сооружений была принята 800 м³/сут или 33 м³/ч аналогично предприятию, на сточных водах которого проводился эксперимент. Расчет был выполнен на температуру поступающих сточных вод 45 °С (среднесуточная температура в течение года) и концентрацию растворенного кислорода 1,5 мг/л. Сооружения механической очистки приняты оди-

наковыми для обоих вариантов и в расчете не учитывались. В сравниваемых вариантах приняты установки обезвоживания осадка до влажности 80 %. В 1-м варианте количество задерживаемой биопленки по сухому веществу принято равным количеству дозируемого биопрепарата. Техничко-экономическая оценка осуществлена на основании стоимости жизненного цикла (СЖЦ) за 25 лет эксплуатации (табл. 6).

Таблица 6

Стоимость жизненного цикла, тыс. руб.

Показатель	Обозначение	1-й вариант без охлаждения (биопрепарат), тыс. руб	2-й вариант ФХО с охла- ждением, тыс. руб
Сумма капитальных затрат	C_i	23 145, 69	51 339,49
Стоимость электроэнергии	C_e	58 702, 25	53 290, 91
Оплата труда обслуживающего персонала	C_o	38 030, 42	38 030, 42
Затраты на замену оборудования, текущий ремонт, прочие расходы, реагенты	C_m	67 185,22	100 881,87
Затраты на охрану окружающей среды	C_{env}	376, 24	712, 87
Σ эксплуатационных затрат		164 294, 14	192 916, 08
Итого:	СЖЦ	187 439, 83	244 255, 58
Экономический эффект	Δ СЖЦ	56 815, 74	
Стоимость 1 м ³ , руб./м ³		25,68	33,47

Лучшим вариантом, т. е. технологией с наименьшим показателем СЖЦ, оказался 1-й вариант – биологическая очистка с применением биоценоза аэробных термофильных микроорганизмов. Сумма финансирования по данному варианту с учетом инвестирования на этапе строительства и 25-летней эксплуатации меньше, чем по 2-му варианту, на 56,8 млн. руб.

Результаты исследований приняты для реконструкции существующих очистных сооружений маслоэкстракционного завода АО «Самараагропром-переработка» п.г.т. Безенчук, расход 800 м³/сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Состав сточных вод маслоэкстракционного производства характеризуется высокими концентрациями органических веществ (ХПК до 4900 мг/л, БПК₅ до 1600 мг/л, жиры до 500 мг/л) и температурой сточных вод 40-55 °С, что

при биологической очистке требует применения термофильных микроорганизмов.

2. Показана технологическая целесообразность очистки жиросодержащих сточных вод с помощью биоценоза аэробных термофильных микроорганизмов в реакторе с неподвижной загрузкой, занимающей 20 % объема. Доказано, что биоценоз при температуре от 35 до 55 °С представлен низшими одноклеточными грибами, иммобилизованными на загрузке.

3. Кинетические константы окисления органических веществ при очистке сточных вод маслоэкстракционного производства с применением аэробных термофильных микроорганизмов при температуре 40 °С составили: для ХПК максимальная скорость окисления $V_{\max} - 500$ мг/(л·ч), константа Михаэлиса $K_m - 553$ мг/л, концентрация инертных веществ $S_i - 52$ мг/л; для БПК₅ $V_{\max} - 333$ мг/(л·ч), $K_m - 217$ мг/л, для жиров $V_{\max} - 55$ мг/(л·ч), $K_m - 51$ мг/л; температурная константа $\chi = 0,048^{\circ}\text{C}^{-1}$.

4. Предложена и апробирована методика определения липолитической активности, которая позволяет оценить активность иммобилизованной биомассы в реакторе.

5. Разработана технологическая схема и методика расчета сооружений биологической очистки предприятий маслоэкстракционного производства с иммобилизованной на инертной загрузке аэробных термофильных микроорганизмов.

6. Технико-экономическое сравнение по стоимости жизненного цикла за 25 лет эксплуатации очистных сооружений маслоэкстракционного производства производительностью 800 м³/сут показало, что технология с применением аэробных термофильных микроорганизмов позволит получить по сравнению с технологической схемой физико-химической очистки экономический эффект 56,82 млн. руб. Себестоимость очистки составила 25,68 руб./м³ по предложенному варианту.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации из перечня рецензируемых журналов и изданий:

1. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Быстранова А.О. Современные методы очистки масложиродержащих сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2019. №4. С. 61–65.

2. Стрелков А.К., Базарова А.О., Теплых С.Ю. Очистка сточных вод пищевых производств с высоким содержанием жиров, нефтепродуктов и фенольных примесей // Градостроительство и архитектура. 2021. № 3. С. 50-55.

3. Стрелков А.К., Базарова А.О., Теплых С.Ю. Исследование биохимической очистки с применением биопрепарата на реальных сточных водах предприятия маслоэкстракции // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 25. С. 117–125.

4. Стрелков А.К., Базарова А.О., Теплых С.Ю. Методика оценки эффективности применения биопрепарата на сточных водах маслоэкстракционного производства // Градостроительство и архитектура. 2022. № 3. С. 28–33.

Публикации в изданиях базы данных Scopus:

5. A.K. Strelkov, S.Yu., Teplykh, A.O. Bystranova. The impact of the factors of oil-containing wastewater formation of Bezenchuk oil extraction plant // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Civil, Architectural and Environmental Sciences and Technologies, CAEST 2019. 2020. С. 012102.

Публикация в других изданиях:

6. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Быстранова А.О. Исследование состава и условий образования сточных вод маслоэкстракционного завода г. Безенчук // Перспективы развития строительного комплекса: материалы XIII Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. 2019. С. 95–98.

7. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Быстранова А.О. Сравнение методов определения содержания растительного жира в сточных водах // Международная научно-техническая конференция, посвященная 90-летию со дня образования факультета водоснабжения и водоотведения МИСИ МГСУ: сборник докладов. 2019. С. 130–133.

8. Стрелков А.К., Базарова А.О. Применение биопрепарата для очистки сточных вод с высоким содержанием жиров, нефтепродуктов и фенольных примесей // Яковлевские чтения: XIII Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти академика РАН С.В. Яковлева. М-во образования и науки Рос. Федерации, Московский государственный строительный университет. 2021. С. 209–212.

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание ученой степени
Кандидата технических наук

Подписано в печать 04.05.2023.
Формат 60 х 84 1 / 16. Бумага офсетная.
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ.

ООО «Научно-технический центр»
443096, г. Самара, ул. Мичурина, 58
Тел (846) 336-27-52
E-mail: iopad@mail.ru