На правах рукописи

Авдеенков Павел Павлович

ОЧИСТКА ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ПРЕДПРИЯТИЙ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КУРИНЫХ ЯИЦ

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: **Степанов Сергей Валериевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Павлинова Ирина Игоревна**
доктор технических наук, профессор,
начальник «Учебного центра»
АО «МосводоканалНИИпроект»

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

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Защита состоится 9 ноября 2023 г. в 11 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.377.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте http://d24237705.samgtu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета **Тупицына Ольга Владимировна**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На данный момент в Российской Федерации насчитывается более десяти специализированных предприятий глубокой переработки куриных яиц, продукция которых пользуется спросом в кондитерской и хлебобулочной промышленности, при производстве мясных изделий и полуфабрикатов, в спортивном питании, в масложировой отрасли при производстве майонезов, соусов, макарон, мороженого и десертов, кормов для животных, косметики, напитков. Публикации по очистке сточных вод данной категории предприятий в нашей стране до настоящих исследований отсутствовали. Рассматриваемые сточные воды, как и для большинства предприятий пищевой промышленности, являются высококонцентрированными: ХПК достигает 14800 мг/л, $БПК_5$ – 11475 мг/л, взвешенные вещества – 5580 мг/л. Очистка таких сточных вод является весьма сложной задачей. На существующих предприятиях пищевой промышленности наибольшее распространение получила предварительная реагентная напорная флотация, которая, как правило, не позволяет очищать сточные воды даже до норм приема в сети городской канализации. Очистить высококонцентрированные сточные воды до норм сброса в водные объекты рыбохозяйственного значения ($ПДК_{рыбхоз}$) возможно только при применении ступени аэробной биологической очистки. Поэтому исследования по очистке сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц являются актуальными.

Степень разработанности темы. Физико-химической очисткой промышленных сточных вод в разные годы занимались А.М. Когановский, Л.В. Гандурина, С.В. Гетманцев, И.А. Нечаев и др. Существенный вклад в применение и разработку методов биологической очистки промышленных сточных вод принадлежит С.В. Яковлеву, Я.А. Карелину, Т.А. Карюхиной, И.В. Скирдову, Л.И. Гюнтер, Ц.И. Роговской, Н.А. Базякиной, В.Н. Швецову, А.А. Бондареву, К.М. Морозовой, И.И. Павлиновой, Б.Г. Мишукову и др. В работах НИИ ВОДГЕО, СамГТУ, СПбГАСУ, МГСУ исследованы процессы биологической очистки сточных вод в мембранных биореакторах и реакторах периодического действия. Однако применение перечисленных технологий для очистки высококонцентрированных сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц ранее не изучалось.

Цель работы – научное обоснование и разработка эффективной технологии обработки высококонцентрированных сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц с предварительной физико-химической и полной биологической очисткой с обеспечением выполнения рыбохозяйственных нормативов по соединениям азота.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести анализ литературных источников и натурных данных по качественному составу сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц и методам их очистки.

2. Экспериментально определить наиболее эффективный коагулянт для предварительной очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц и оптимальные технологические параметры его применения.

3. Оценить перспективность применения биологической очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц. Определить кинетические константы, коэффициенты и технологические параметры для биологической очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц как исходных, так и после физико-химической очистки (ФХО).

4. На основании экспериментально полученных кинетических констант и коэффициентов биохимических процессов оценить влияние ФХО на процесс последующей биологической очистки.

5. Разработать алгоритм технологического расчета сооружений очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

6. На основании технико-экономической оценки выбрать наиболее рациональный вариант технологической схемы очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

Объект исследования – сточные воды предприятий глубокой переработки куриных яиц.

Предмет исследования – технологии физико-химической и биологической очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

Научная новизна:

1. Впервые разработана технология очистки сточных вод для предприятий глубокой переработки куриных яиц, сочетающая физико-химические и биологические методы.

2. Определены основные технологические параметры, кинетические константы и коэффициенты биологической очистки исходных сточных вод и сточных вод после ФХО предприятий глубокой переработки куриных яиц.

3. Впервые установлено влияние предварительной коагуляции на кинетические характеристики дальнейшей биологической очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Получены кинетические зависимости процессов биологической очистки исходных сточных вод и сточных вод после ФХО предприятий

глубокой переработки куриных яиц в технологических схемах с предварительной денитрификацией.

2. Разработаны технологические схемы очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц, включающие физико-химические и биологические методы с предварительной денитрификацией.

3. Разработан алгоритм расчета технологических схем очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

4. На основании расчета стоимости жизненного цикла (СЖЦ) доказана технико-экономическая целесообразность предварительной ФХО с последующей одноступенчатой биологической очисткой сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

Методология и методы исследования. Методологическая база физико-химической очистки основана на методике пробного коагулирования, биологической очистки – методе определения скоростей процессов биологической очистки в контактных и проточных условиях на установках непрерывного культивирования микроорганизмов. Теоретическая база физико-химической очистки основана на современных представлениях коллоидной химии, биологической очистки – на фундаментальных законах ферментативной кинетики. Эмпирическая база физико-химической очистки состояла из лабораторного оборудования для пробного коагулирования, а биологической очистки – из лабораторного реактора периодического действия и пилотного мембранного биореактора.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты подбора коагулянтов, параметров их применения и оценка влияния на последующую биологическую очистку сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

2. Значения кинетических констант и коэффициентов биологической очистки для исходных сточных вод и сточных вод после предварительной ФХО предприятий глубокой переработки куриных яиц.

3. Технологические схемы биологической очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц с предварительной ФХО и без нее.

4. Алгоритм расчета технологических схем сооружений очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

5. Результаты технико-экономической оптимизации параметров физико-химической и биологической очистки сточных вод предприятия глубокой переработки куриных яиц.

Степень достоверности. Химические анализы были выполнены по стандартным методикам в аккредитованной гидрохимической лаборатории

АСА СамГТУ. Все экспериментальные исследования были проведены на реальных сточных водах предприятия глубокой переработки куриных яиц в течение длительного периода при большом количестве параллельных опытов с допустимой воспроизводимостью полученных результатов.

Апробация и реализация результатов исследования.

Основные и промежуточные результаты работы были доложены на Международной конференции «Вода: экология и технология» ЭКВАТЭК, г. Москва, 2021 г., XIII Международной научно-практической конференции «Техновод», г. Сочи, 2021 г., конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева, г. Москва, 2022 и 2023 гг., 79 и 80 научно-технических конференциях АСА СамГТУ «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика», г. Самара, 2022–2023 гг., Международной конференции *EcwaExpo*, г. Москва, 2022 г., Международной научно-практической конференции «Водоснабжение, химия и прикладная экология», г. Гомель, 2023 г.

Результаты диссертационной работы использованы ООО «Эколос Проектстрой» при разработке технологии очистки сточных вод, поставке оборудования и выполнении пуско-наладочных работ на локальных очистных сооружениях двух предприятий глубокой переработки куриных яиц: Яйцеперерабатывающая фабрика ЗАО «Рузово», локальные очистные сооружения «ЛОС-КН-600»; ООО «Лето Групп», комплекс очистных сооружений производственных сточных вод.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Работа соответствует паспорту научной специальности 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, п. п. 3 и 7.

Личный вклад автора в полученные научные результаты, включенные в диссертацию, состоит в формулировке целей и задач исследований, поиске и анализе литературных данных, изготовлении лабораторной установки, разработке методик и проведении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, формулировании выводов и заключения, расчете технико-экономических показателей и их сравнении, внедрении полученных результатов на действующем предприятии.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы.

Диссертация общим объемом 167 страниц состоит из введения, пяти глав и приложения, содержит 20 таблиц и 51 рисунок. Список литературы включает 255 наименований отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, а также основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ литературных источников по качественному составу сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц, который позволил охарактеризовать данные сточные воды как высококонцентрированные по органическим загрязнениям. Рассмотрены методы очистки исследуемых сточных вод и высококонцентрированных сточных вод предприятий пищевой промышленности, выявлена перспективность физико-химических и аэробных биологических методов.

Во второй главе представлены натурные данные о качественном составе сточных вод изучаемого предприятия. Описаны методики проведения исследований на лабораторной и пилотной установках.

Исследования *физико-химической* очистки проводились методом пробного коагулирования. В качестве коагулянтов были использованы сульфат алюминия, хлорид железа и ряд полиоксихлоридов алюминия (ПОХА) – низкоосновный «Аква-Аурат™-14», среднеосновные «Аква-Аурат™-10М» и «Аква-Аурат™-30». Выбор оптимального коагулянта производился по эффективности удаления ХПК, взвешенных веществ, концентрации вторичных загрязнений, удельной стоимости коагулянта.

Биологическая очистка изучалась *в лабораторном SBR*, цикл работы которого включал заполнение сточной водой, аноксидную и аэробную фазы, седиментацию и декантацию. Количество и продолжительность фаз изменялись в зависимости от целей опыта и промежуточных результатов работы установки. Все исследования по биологической очистке проводились на исходной сточной воде и сточной воде после ФХО – низкоосновным ПОХА марки «Аква-Аурат-14™» с дозой 125 мг Al_2O_3/л.

Методика эксперимента в *контактных условиях* заключалась в определении скорости окисления органических веществ по убыли концентрации растворенного кислорода в исследуемой пробе.

Зависимость скорости окисления органических веществ от концентрации субстрата и дозы активного ила, при постоянных значениях концентрации растворенного кислорода, температуры и *pH*, может быть представлена в виде уравнения:

$$\rho = \rho'_{max} \frac{S}{S+K_m} \cdot \frac{1}{1+\varphi a_i}, \quad (1)$$

где ρ'_{max} – максимальная скорость окисления при $a_i \to 0$ и $t = 20°C$, мг/(г·ч); S – концентрация субстрата, мг/л; K_m – константа Михаэлиса, мг/л; φ –

коэффициент ингибирования продуктами метаболизма активного ила, л/г, a_i – концентрация активного ила, г/л.

Влияние температуры на скорость аэробных процессов в интервале от 0 до 32°С описывается уравнением Вант-Гоффа:

$$\rho_{max\,(t)} = \rho_{max\,(20°C)} \cdot e^{\varkappa(t-20)}, \quad (2)$$

где $\rho_{max(20°C)}$ – максимальная скорость окисления при 20°С, мг/(г·ч); χ – температурная константа, °С$^{-1}$; t – температура, °С.

Коэффициент ингибирования продуктами метаболизма φ был определен при построении графиков зависимости величины, обратной удельной скорости потребления кислорода, от концентрации ила.

Биологическая очистка в проточных условиях изучалась на пилотном МБР (рис. 1) реальной сточной воды в условиях действующего предприятия.

Рисунок 1 – Пилотная установка МБР: 1 – емкость для ФХО; 2 – усреднитель; 3 – аноксидная зона; 4 – насос рециркуляции; 5 – насос подачи исходных сточных вод; 6 – лопастная мешалка; 7 – аэробная зона; 8 – компрессор системы мелкопузырчатой аэрации; 9 – компрессор системы среднепузырчатой аэрации; 10 – шкаф управления; 11 – манометр; 12 – насос пермеата; 13 – емкость сбора перелива при аварии; 14 – емкость сбора пермеата

Реактор с полезным объемом 79 л работал по схеме с предварительной денитрификацией. Внутри аэробной зоны располагалось два погружных плоскорамных мембранных элемента *SINAP* 10 из поливинилиденфторида с номинальным размером пор 0,1 мкм, которые работали под вакуумом, создаваемым насосом (12). Полезная площадь одного мембранного элемента составляла 0,1 м^2.

В третьей главе представлены результаты лабораторных исследований по физико-химической и биологической очистке реальных сточных вод предприятия глубокой переработки куриных яиц.

На первом этапе исследований определен наиболее эффективный коагулянт и его доза. Характерные результаты одной из серий приведены на рис. 2.

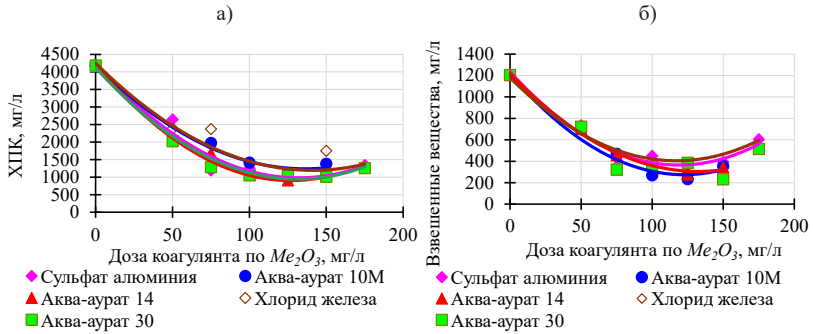

Рисунок 2 – Зависимость ХПК (а) и концентрации взвешенных веществ (б) в очищенной сточной воде от марки коагулянта и его дозы

Все исследованные коагулянты показали близкие результаты и наибольшую глубину очистки при дозе 125 мг Me_2O_3/л. Максимальная эффективность по ХПК 78% была получена при использовании «Аква-Аурат™-14», наименьшая – 74% при применении «Аква-Аурат™-10М». По взвешенным веществам наибольшая эффективность 80% оказалась у «Аква-Аурата™-30» и «Аква-Аурата™-10М», а наименьшая – 76% у хлорида железа.

В качестве наиболее эффективного коагулянта для дальнейших исследований был выбран низкоосновный ПОХА марки «Аква-Аурат™-14» с дозой 125 мг Al_2O_3/л, обеспечивающий наименьшее повышение концентрации остаточного алюминия при *pH* 6,7–7 – на 0,02 мг/л. Качественный состав сточной воды после ФХО, мг/л: ХПК – 700-4150, $БПК_{полн}$ – 455-3320, взвешенные вещества – 163-660. Поскольку очищенные сточные воды после ФХО не соответствовали требованиям приема в сети городской канализации по ХПК и $БПК_{полн}$, то возникла необходимость в применении *биологических методов очистки*.

Работа *SBR* изучалась в течение 53 и 66 суток на исходной сточной воде и сточной воде после ФХО предприятия глубокой переработки куриных яиц. На исходной сточной воде реактор работал при средней дозе активного ила a_i – 4,7 г/л (иловый индекс J_i – 96 мл/г, зольность ила s – 14,5%) и средней нагрузке по ХПК q_i – 0,18 г/(г·сут). В ходе исследований на сточной воде после ФХО средние значения параметров составили: a_i – 3,2 г/л, J_i – 63,9 мл/г, s – 19,3%, q_i – 0,15 г/(г·сут).

На рис. 3 представлены результаты работы *SBR* при двойном чередовании аноксидных и аэробных фаз одной из серий опытов на сточной воде после ФХО.

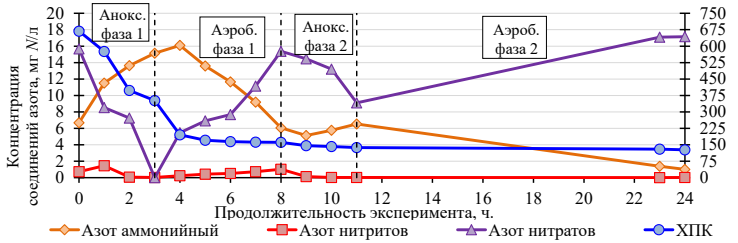

Рисунок 3 – Результаты эксперимента по очистке сточных вод после ФХО в реакторе периодического действия при двойном чередовании аноксидных и аэробных фаз

Качество очищенной сточной воды после предварительной ФХО и последующей биологической очистки в среднем составило, мг/л: ХПК – 99, $БПК_{полн}$ – 15,4, взвешенные вещества – 11, $N\text{-}NH_4$ – 1, $N\text{-}NO_2$ – 0,04. В случае биологической очистки исходных сточных вод средние значения показателей оказались, мг/л: ХПК – 253, $БПК_{полн}$ – 58,4, взвешенные вещества – 10, $N\text{-}NH_4$ – 2,1, $N\text{-}NO_2$ – 0,06. Концентрация азота нитратов в очищенной воде даже при двух аноксидных фазах в цикле *SBR* превышала $ПДК_{рыбхоз}$ при очистке как сточных вод после ФХО (в среднем 15 мг/л), так и исходных сточных вод (в среднем 21,7 мг/л). Поскольку концентрации загрязнений в очищенных сточных водах после *SBR* превышали допустимые значения, то дальнейшие исследования были проведены в проточном МБР с предварительной денитрификацией.

В ходе *контактных опытов*, проведенных на лабораторной установке *SBR*, были определены температурные константы: χ – 0,104 и 0,08 $°C^{-1}$ (рис. 4); коэффициенты ингибирования продуктами метаболизма: φ – 0,05-0,08 (0,065) и 0,25-0,28 (0,265) л/г (рис. 5) соответственно для исходной сточной воды и сточной воды после ФХО предприятий глубокой переработки куриных яиц.

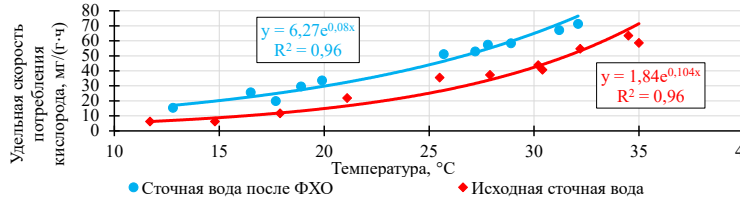

Рисунок 4 – Зависимость удельной скорости потребления кислорода от температуры

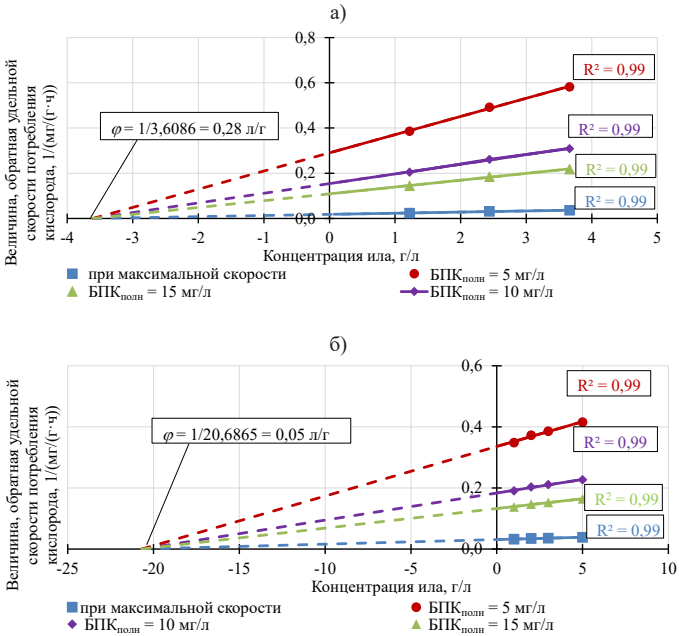

Рисунок 5 – Зависимость величины, обратной скорости потребления кислорода, от концентрации ила на исходной сточной воде (а) и на сточной воде после ФХО (б)

Установлено, что ФХО качественно влияет на кинетические характеристики биологической очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц K_m, ρ'_{max} и в бóльшей степени на φ. Расчеты показали, что в диапазоне концентраций активного ила 1,5-4,5 г/л ФХО положительно влияет на удельную скорость биохимических процессов, а свыше 4,5 г/л наблюдается снижение максимальной удельной скорости потребления кислорода по механизму неконкурентного ингибирования, которое может быть вызвано присутствием в сточной воде остаточного алюминия и/или повышенным солесодержанием.

В четвертой главе представлены результаты исследований на пилотной установке МБР в течение 70 и 39 суток на исходной сточной воде и сточной воде после ФХО предприятия глубокой переработки куриных яиц. На исходной сточной воде установка работала при температуре 16,6-24°С и *pH* 6,47-8,3. Трансмембранное давление (ТМД) было ниже чувствительности манометра. Технологические параметры изменялись в следующих пределах: нагрузка на ил q_i – 0,085-0,142 г БПК$_{полн}$/(г·сут), время пребывания сточной воды T – 6-9 сут, a_i – 5-10 г/л, s – 18%. Состав исходной сточной воды за

весь период исследований изменялся в пределах, мг/л: ХПК – 3805-11062, БПК$_{полн}$ – 2702-7854, $N\text{-}NH_4$ – 0-21,47, $N\text{-}NO_3$ – 0-7,54, $N\text{-}NO_2$ – 0-5,14; пермеата, мг/л: ХПК – 89,7-208,5, БПК$_{полн}$ – 7,5-30,2, $N\text{-}NH_4$ – 0,09-1,79, $N\text{-}NO_3$ – 8,74-29,38, $N\text{-}NO_2$ – 0,01-0,09. На сточной воде после ФХО при температуре 23,2-28°С и *pH* 6,63-8,3 ТМД не превышало 0,8 м вод. ст., q_i колебалась в пределах 0,072-0,134 г БПК$_{полн}$/(г·сут), *T* – 2-3 сут, a_i – 4-6,5 г/л, *s* – 22%. Качественный состав сточной воды после ФХО, поступающей в МБР, за весь период исследований составил, мг/л: ХПК – 900-3407, БПК$_{полн}$ – 585-2215, $N\text{-}NH_4$ – 1,25-11,62, $N\text{-}NO_3$ – менее 0,02, $N\text{-}NO_2$ – 0-3,09; состав пермеата: ХПК – 93,8-181, БПК$_{полн}$ – 8,9-19, $N\text{-}NH_4$ – 0-1,11, $N\text{-}NO_3$ – 3,97-17,99, $N\text{-}NO_2$ – 0-0,05.

На рис. 6 представлены результаты работы пилотной установки на сточной воде после ФХО, которые объединены в технологические режимы по q_i, *T* и a_i.

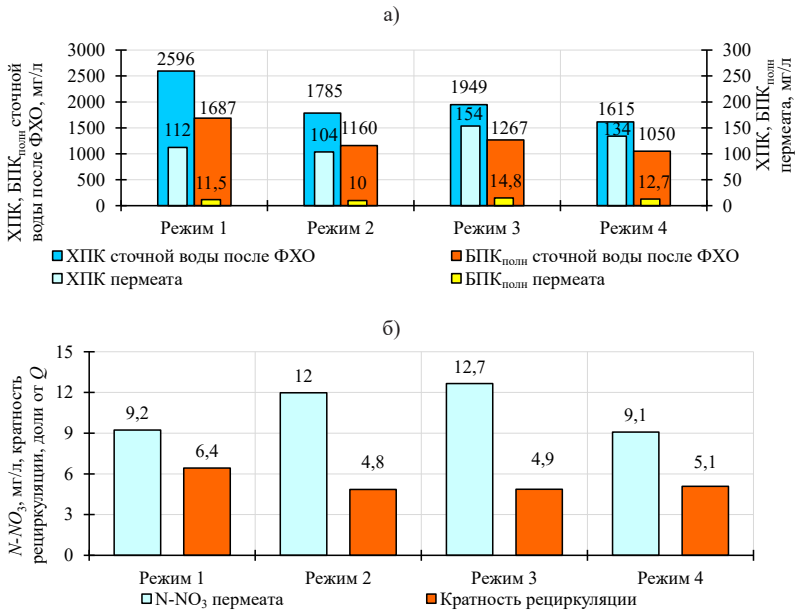

Рисунок 6 – Результаты работы МБР на сточной воде после предварительной ФХО по органическим загрязнениям (а), азоту нитратов (б)

На основании эксперимента, проведенного в условиях действующего предприятия глубокой переработки куриных яиц на пилотном МБР с предварительной денитрификацией, доказано, что диктующим

загрязнением, на которое необходимо вести расчет сооружений биологической очистки, является $БПК_{полн}$. $БПК_{полн}$ пермеата не превышало 12 мг/л при средней нагрузке на активный ил по $БПК_{полн}$ 0,09 г/(г·сут) для исходной сточной воды и 0,0725 г/(г·сут) для сточной воды после предварительной ФХО. При этом концентрации аммония и нитритов соответствовали $ПДК_{рыбхоз}$. Минимальная рециркуляция, обеспечивающая концентрацию азота нитратов в очищенной воде 9 мг/л, оказалась восьмикратной для исходной сточной воды и шестикратной для сточной воды после ФХО. Инертная часть ХПК составила около 90 мг/л для обоих видов исследуемой сточной воды.

По результатам четырехмесячной работы МБР на исходной сточной воде и сточной воде после ФХО были определены значения кинетических констант, необходимых для расчета промышленных сооружений биологической очистки. Для этого все полученные удельные скорости окисления были приведены к стандартным условиям (концентрация активного ила $a_i \rightarrow 0$ и температура t = 20°С) по уравнениям (1) и (2), используя полученные в ходе лабораторных исследований значения φ и χ. На рис. 7 представлены графические зависимости удельной скорости окисления органических веществ от $БПК_{полн}$ очищенной воды. Кинетические константы (ρ'_{max}, K_m) были определены графоаналитическим методом – двойных обратных величин Лайнуивера-Берка.

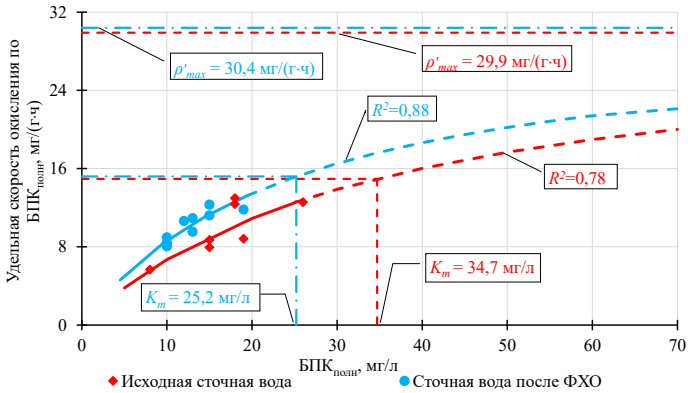

Рисунок 7 – Кинетика окисления органических веществ по $БПК_{полн}$

Таким образом, полученные кинетические константы и коэффициенты позволяют рассчитать объем реакторов для сточных вод предприятий данной категории с любой заданной степенью очистки. Значения всех кинетических констант и коэффициентов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения кинетических констант процессов
окисления органических веществ, полученные в МБР

Показатель	Сточная вода	
	после ФХО	исходная
Константа Михаэлиса K_m, мг/л	25,2	34,7
Максимальная скорость окисления ρ'_{max}, мг БПК$_{полн}$/(г·ч) при $a_i \to 0$ и $t = 20°C$	30,4	29,9
Коэффициент ингибирования продуктами метаболизма φ, л/г	0,265	0,065
Температурная константа χ, °C^{-1}	0,08	0,104

Расчеты показали, что удельная скорость окисления органических веществ по БПК$_{полн}$ при концентрации активного ила 1,5-3 г/л и глубине очистки до 5 мг/л для исходной сточной воды и сточной воды после ФХО предприятия глубокой переработки куриных яиц оказалась практически одинаковой, а при бóльших дозах активного ила и концентрациях субстрата она была выше для исходной сточной воды.

В **пятой главе** разработан алгоритм расчета технологических схем сооружений очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц, который в виде блок-схемы представлен на рис. 8.

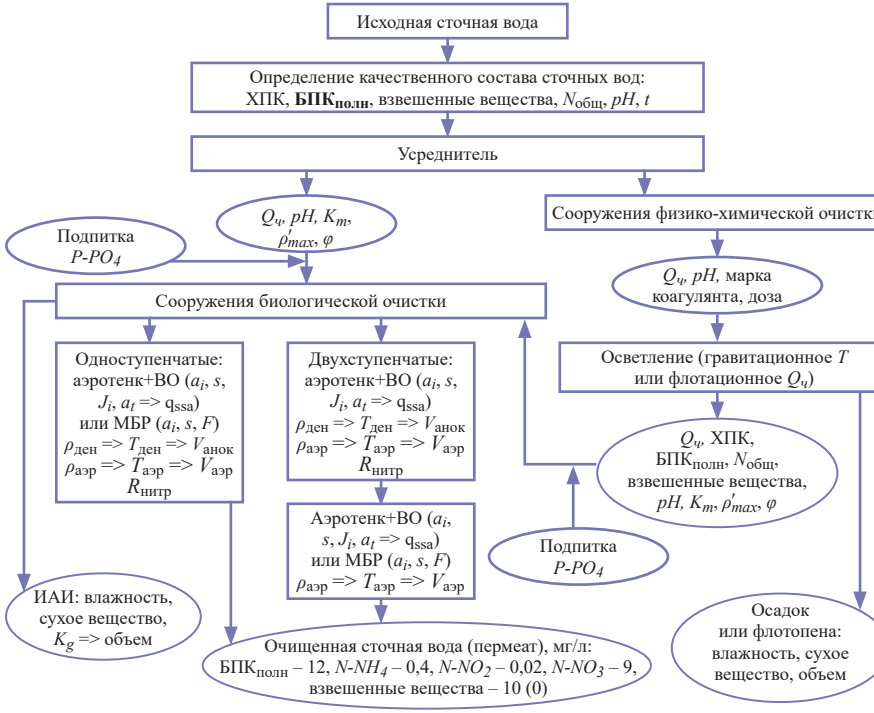

Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма технологического расчета очистных сооружений предприятий глубокой переработки куриных яиц

Расчет сооружений ФХО (при их наличии) сводится к определению наиболее эффективного коагулянта с дозой, соответствующей максимальной эффективности очистки по ХПК и взвешенным веществам. Для осветления сточных вод после обработки коагулянтом могут быть использованы технологии реагентной напорной флотации или гравитационного уплотнения, расчет которых может быть выполнен по рекомендациям производителей. Для расчета сооружений биологической очистки предлагается использовать разработанную ранее методику «ВОДГЕО/СамГТУ», основанную на вычислении скоростей биохимического окисления в аноксидной и аэробной зонах по уравнениям ферментативной кинетики с использованием экспериментально полученных кинетических констант и коэффициентов, значения которых для сточных вод предприятий глубокой переработки яиц представлены в табл. 1. Для реализации биологической очистки может быть использована технология «аэротенк – вторичный отстойник» или МБР. Также в алгоритме предусмотрены одно- и двухступенчатые схемы.

По результатам всех проведенных исследований предложены технологические схемы очистки (рис. 9), которые позволяют очистить исследуемую сточную воду до следующих показателей, мг/л: $БПК_{полн}$ – 12, $N\text{-}NH_4 < 0{,}4$, $N\text{-}NO_2 < 0{,}02$, $N\text{-}NO_3 < 9$.

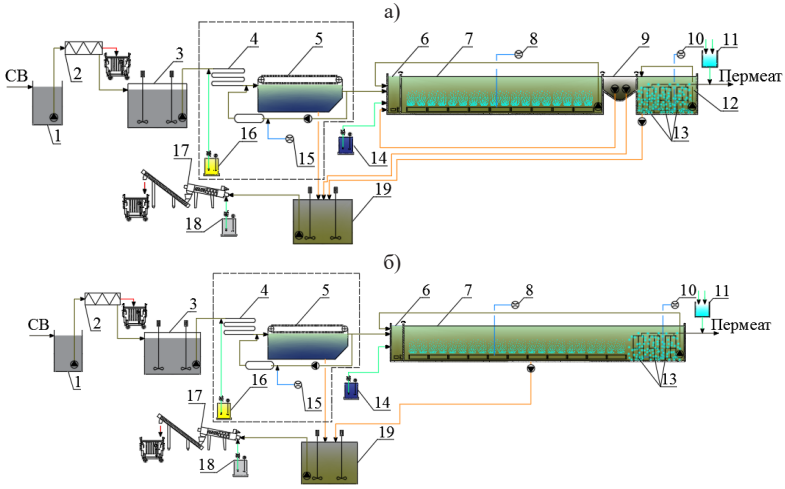

Рисунок 9 – Принципиальные схемы очистки сточных вод предприятия глубокой переработки куриных яиц с механической, физико-химической (выделено пунктиром), аэробной двухступенчатой (а) и одноступенчатой (б) биологической очисткой: 1 – КНС; 2 – барабанная решетка; 3 – усреднитель; 4 – трубчатый флокулятор; 5 – напорный флотатор; 6 – аноксидная зона аэротенка I ступени; 7 – аэробная зона аэротенка I ступени; 8, 10 – воздуходувки; 9 – вторичный отстойник; 11 – бак с реагентами для промывки мембран; 12 – аэротенк II ступени (МБР); 13 – мембранные модули; 14 – бак биогенной подпитки фосфором; 15 – компрессор с сатуратором; 16 – бак коагулянта; 17 – шнековый дегидратор; 18 – бак флокулянта; 19 – емкость флотошлама и избыточного активного ила; СВ – исходная сточная вода

Поскольку все технологические схемы позволяют получить одинаковое качество очищенной сточной воды, то выбор рационального решения может быть сделан только на основании технико-экономического расчета с учетом всех затрат, включая реагентную обработку сточной воды и образующегося осадка. В качестве инструмента для такого расчета была выбрана методика стоимости жизненного цикла (СЖЦ), которая приведена в ГОСТ Р 58785-2019 «Качество воды. Оценка стоимости жизненного цикла для эффективной работы систем и сооружений водоснабжения и водоотведения» (с Изменением № 1). Технико-экономическое сравнение возможных вариантов было проведено для условий нового строительства очистных сооружений производительностью 25 м^3/ч за расчетный срок эксплуатации 25 лет. Качественный состав исходных сточных вод и сточных вод после ФХО представлен в табл. 2.

Таблица 2

Расчетный состав сточных вод после ФХО
в зависимости от дозы коагулянта «Аква-Аурат™-14»

Показатель, мг/л	Исходная сточная вода	Доза коагулянта, мг Al_2O_3/л				
		50	75	100	125	150
ХПК	7537	4748	3542	2638	2261	2412
$БПК_{полн}$	5351	3086	2303	1715	1470	1568
Взвешенные вещества	2759	1622	1083	763	518	572
$N_{общ}$	160	143	109	83	72	76

Результаты технико-экономического расчета (в ценах декабря 2022 г.) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета СЖЦ по рассматриваемым вариантам, млн руб.

Показатель	Исходная сточная вода		Доза коагулянта, мг Al_2O_3/л			
			100		125	
Вариант	1	2	3	4	5	6
Количество ступеней биологической очистки	одна	две	одна	две	одна	две
Сумма капитальных затрат	158,09	136,08	136,4	124,73	128,55	120,77
Электроэнергия, C_e	88,08	96,10	72,62	78,79	68,22	74,39
ФОТ, C_o	104,58					

Окончание табл. 3

Показатель	Исходная сточная вода		Доза коагулянта, мг Al_2O_3/л			
			100		125	
C_m, в т.ч.:	252,43	254,37	234,98	234,80	243,64	244,62
- замена оборудования	105,10	107,41	100,66	101,66	99,44	100,44
- текущий ремонт	27,53	23,7	23,75	21,72	22,39	21,03
- прочие расходы	19,63	20,16	18,2	18,5	18,56	18,93
- полиоксихлорид алюминия	0		57,2		71,5	
- флокулянт	12,38	15,3	17,94	18,5	19,31	20,28
- трифосфат натрия	87,26		16,7		11,91	
- лимонная кислота	0,47					
- ГХН	0,06					
ООС, C_{env}	0,39	0,49	0,57	0,59	0,62	0,64
Сумма эксплуатационных затрат	445,49	455,54	412,76	418,76	417,06	424,24
СЖЦ	603,58	**591,62**	549,16	543,49	**545,62**	545
Удельная стоимость 1 м^3, руб./м^3	110,24	**108,06**	100,3	99,27	**99,66**	99,54
Удельная стоимость 1 кг, руб./кг БПК$_{полн}$	20,6	**20,19**	18,75	18,55	**18,62**	18,6
Экономический эффект	–	**11,96**	54,42	60,09	**57,96**	58,58

Одним из самых экономичных и наиболее рациональным, с учетом наименьших энергозатрат и простоты обслуживания, оказался вариант 5 с предварительной ФХО и одноступенчатыми аэротенками. Удельная стоимость очистки 1 м^3 сточной воды в этом случае составила 99,66 руб./м^3, или 18,62 руб./кг БПК$_{полн}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сточные воды предприятий глубокой переработки куриных яиц являются высококонцентрированными, с ХПК от 3620 до 12200 мг/л, БПК$_{полн}$ от 2534 до 8540 мг/л и концентрацией взвешенных веществ от 1206 до 3451 мг/л. Соотношение БПК$_{полн}$/ХПК составило в среднем 70%, что указывает на высокое содержание легкоокисляемых органических веществ и на возможность включения в технологическую схему сооружений биологической очистки. Наличие органического азота 72-244 мг/л требует проведения на стадии биологической очистки денитрификации. Для очистки данных сточных вод перспективными являются технологические схемы с физико-химической и биологической очисткой.

2. Наиболее эффективным коагулянтом оказался низкоосновный полиоксихлорид алюминия марки «Аква-Аурат™-14» с дозой 125 мг Al_2O_3/л, который в оптимальном интервале *pH* 6,7-7 обеспечивал эффективность очистки в среднем по ХПК 77,3%, $БПК_{полн}$ 76,3%, взвешенным веществам 80,1%, органическому азоту 58,7%.

3. На основании контактных опытов, проведенных на лабораторной установке *SBR*, установлена перспективность биологической очистки как исходных сточных вод, так и сточных вод после ФХО предприятия глубокой переработки куриных яиц. Экспериментально определены: коэффициент ингибирования продуктами метаболизма φ – 0,065 и 0,265 л/г, температурная константа χ – 0,104 и 0,08°C^{-1}.

4. На пилотном МБР с предварительной денитрификацией в условиях действующего предприятия глубокой переработки куриных яиц отработаны технологические режимы и определены кинетические константы процесса биохимического окисления органических веществ: ρ'_{max} по $БПК_{полн}$ – 29,9 и 30,4 мг/(г·ч), K_m по $БПК_{полн}$ – 34,7 и 25,2 мг/л для исходных и сточных вод после ФХО соответственно. $БПК_{полн}$ пермеата не превышало 12 мг/л при средней нагрузке на активный ил по $БПК_{полн}$ 0,09 г/(г·сут) для исходной сточной воды и 0,0725 г/(г·сут) для сточной воды после предварительной физико-химической очистки. При этом концентрации аммония и нитритов соответствовали $ПДК_{рыбхоз}$. Для нормативного удаления азота нитратов нитратный рецикл требовался восьмикратный для исходных сточных вод и шестикратный для предварительно коагулированных.

5. На основании лабораторных исследований и пилотных испытаний показано, что ФХО качественно влияла на кинетические характеристики биологической очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц. Значительное увеличение коэффициента ингибирования продуктами метаболизма φ в результате ФХО может быть объяснено присутствием остаточного алюминия и/или повышением солесодержания, действующих по механизму неконкурентного ингибирования. Показано, что удельные скорости окисления органических веществ по $БПК_{полн}$ при концентрации активного ила 1,5-3 г/л и глубине очистки до 5 мг/л для исходной сточной воды и сточной воды после ФХО были практически одинаковыми, а при бóльших дозах ила и концентрациях субстрата удельные скорости окисления оказались выше для исходной сточной воды.

6. Разработан алгоритм расчета технологических схем сооружений очистки сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц с предварительной физико-химической очисткой и без нее и полной биологической очисткой, включающей денитрификацию.

7. На основании расчета СЖЦ очистных сооружений предприятия глубокой переработки куриных яиц производительностью 25 $м^3$/ч за период эксплуатации 25 лет проведена оптимизация технологической схемы и доказано, что наиболее рациональным, с учетом наименьших энергозатрат и простоты обслуживания, оказался вариант с предварительной физико-химической и одноступенчатой биологической очисткой. Удельная стоимость очистки 1 $м^3$ сточной воды в этом случае составила 99,66 руб./$м^3$, или 18,62 руб./кг $БПК_{полн}$.

Рекомендации:

Рекомендуется использование полученных результатов исследования при проектировании, реконструкции и эксплуатации очистных сооружений сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Подбор наиболее эффективных флокулянтов, как совместно с коагулянтом, так и без него, изучение влияния данных реагентов на дальнейшую биологическую очистку и технико-экономическое обоснование целесообразности их применения.

2. Провести технико-экономическое сравнение варианта, выбранного в качестве наиболее рационального, с классической одно- и двухступенчатой схемой «аэротенк – вторичный отстойник».

3. Экспериментально установить, какие факторы влияют на изменение коэффициента ингибирования продуктами метаболизма φ, который увеличился в результате применения минерального коагулянта.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации из перечня рецензируемых научных журналов и изданий:

1. Степанов С.В., Авдеенков П.П., Пономаренко О.С., Морозова К.М. Результаты исследований физико-химической очистки сточных вод предприятий переработки яиц // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 5. С. 32–39. DOI: 10.35776/VST.2022.05.04. (К1).

2. Степанов С.В., Авдеенков П.П., Пономаренко О.С., Морозова К.М. Результаты исследований биологической очистки сточных вод предприятия переработки яиц // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 9. С. 35–43. DOI 10.35776/VST.2022.09.05. (К1).

3. Степанов С.В., Авдеенков П.П., Пономаренко О.С., Морозова К.М. Определение кинетических констант и коэффициентов процессов биологической очистки сточных вод предприятий глубокой переработки

яиц // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 10. С. 40–47. DOI 10.35776/VST.2022.10.05. (К1).

4. Степанов С.В., Авдеенков П.П., Пономаренко О.С., Морозова К.М. Результаты исследований биологической очистки сточных вод предприятия переработки яиц в пилотном мембранном биореакторе // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 12. С. 21–30. DOI: 10.35776/VST.2022.12.04. (К1).

5. Степанов С.В., Авдеенков П.П., Пономаренко О.С., Морозова К.М. Оптимизация и технико-экономическая оценка технологических схем очистки сточных вод предприятия глубокой переработки куриных яиц // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 5. С. 37–47. DOI: 10.35776/VST.2023.05.05. (К1).

Список научных работ, опубликованных в журналах РИНЦ:

6. Степанов С.В., Пономаренко О.С., Авдеенков П.П., Морозова К.М., Беляков А.В. Очистка сточных вод предприятия глубокой переработки яиц // Технологии очистки воды «Техновод-2021» : материалы XIII Международной научно-практической конференции. 2021. С. 228–233.

7. Степанов С.В., Пономаренко О.С., Авдеенков П.П., Беляков А.В., Морозова К.М. Сточные воды яйцепереработки и их очистка // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. 2022. С. 483–492.

8. Авдеенков П.П. Комбинированная очистка высококонцентрированных сточных вод предприятий глубокой переработки куриных яиц // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. 2023. С. 522–532.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать
Формат 60 х 84 1/16. Бумага офсетная.
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ 347.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244