

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра Химическая технология и ресурсосбережение

(наименование кафедры/департамента/центра полностью)

18.03.02. Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Оптимизация технологии биологической очистки сточных вод в
ООО «Тольяттикаучук»

Обучающийся

О.В. Зуморина

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.х.н., С.А. Соков

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена оптимизации технологии биологической очистки сточных вод на примере ООО «Тольяттикаучук». Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения экологической эффективности очистных сооружений предприятия, сбрасывающего сточные воды в акваторию реки Волги.

Целью работы является оптимизация процесса биологической очистки за счет внедрения технологии регулируемого оксидативного воздействия, основанной на комбинированном применении перекиси водорода и освещения зоны биоокисления светом в диапазоне 435–445 нм.

В рамках поставленной цели были решены следующие задачи: проведен анализ состава сточных вод предприятия и действующей технологии очистки, выполнен обзор научных публикаций и патентов, выбрана и обоснована технология оптимизации, разработана экспериментальная методика, выполнены расчеты материального баланса и оборудования, дана оценка экономической и экологической эффективности.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем пояснительной записки составляет 57 страниц, включая 7 таблиц, 7 рисунков и 42 источников в списке литературы.

Abstract

The final qualifying work is devoted to the optimization of the biological wastewater treatment technology using the case of LLC «Tolyattikauchuk». The relevance of the topic is due to the need to improve the environmental efficiency of the treatment facilities of the enterprise, which discharges wastewater into the Volga River basin.

The aim of the study is to optimize the biological treatment process by introducing a regulated oxidative exposure technology based on the combined use of hydrogen peroxide and illumination of the bio-oxidation zone with light in the 435–445 nm range.

To achieve this goal, the following tasks were completed: an analysis of the composition of the enterprise's wastewater and the existing treatment technology was carried out, a review of scientific publications and patents was conducted, the optimization technology was selected and justified, an experimental methodology was developed, material balance and equipment calculations were performed, and an assessment of economic and environmental efficiency was made.

The thesis consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The total volume of the explanatory report is 57 pages, including 7 tables, 7 figures, and 42 references.

Содержание

Введение	2
1 Теоретическая часть	5
1.1 Качественный и количественный состав сточных вод ООО «Тольяттикаучук»	5
1.2 Описание существующей технологии очистки сточных вод на предприятии	9
1.3 Анализ статей и патентов по теме работы.....	17
1.4 Общая характеристика биологической очистки сточных вод с регулируемым оксидативным воздействием.....	26
1.5 Обоснование выбора способа для условий ООО «Тольяттикаучук».....	29
2 Экспериментальная и расчетная часть	31
2.1 Методика проведения эксперимента	31
2.2 Результаты эксперимента	34
2.3 Расчет материального баланса	35
2.4 Расчет оборудования для подачи перекиси водорода.....	38
3 Решение вопросов интенсификации процесса с позиций энерго- и ресурсосбережения.....	43
3.1 Оценка экологической эффективности.....	43
3.2 Оценка экономической эффективности.....	44
3.3 Оптимизация работы аэротенков и световых модулей.....	48
Заключение	50
Список используемой литературы	Error! Bookmark not defined.
Приложение А Схема очистных сооружений в ООО «Тольяттикаучук» и предложения по оптимизации биологической очистки	58

Введение

Одним из крупнейших предприятий нефтехимического комплекса России является ООО «Тольяттикаучук», расположенное в г. Тольятти, Самарской области. Основное направление деятельности предприятия – это производство синтетических каучуков различных марок [9], которые используются в шинной и резинотехнической промышленности. В процессе производства образуются сточные воды, содержащие широкий спектр загрязняющих веществ, включая нефтепродукты, органические соединения, ПАВ и аммонийный азот. Очистка этих вод осуществляется на биологических очистных сооружениях предприятия, после чего они сбрасываются в Саратовское водохранилище.

Биологическая очистка сточных вод является основным способом удаления органических загрязнителей [2]. Она основана на использовании микроорганизмов, которые разлагают загрязняющие вещества. Однако существующая технология очистки на предприятии ООО «Тольяттикаучук» имеет ряд недостатков, таких как низкая эффективность удаления биогенных элементов, что приводит к превышению нормативных показателей по ряду веществ. Это требует разработки и внедрения новых методов, направленных на оптимизацию процесса биологической очистки.

Цель работы: оптимизация биологической очистки сточных вод путем внедрения регулируемого оксидативного воздействия (РОВ) с одновременным освещением зоны биоокисления видимым светом в диапазоне 435–445 нм, направленного на повышение метаболической активности активного ила.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ качественного и количественного состава сточных вод ООО «Тольяттикаучук»;

- рассмотреть существующую технологию очистки, выявить ее преимущества и недостатки;
- провести обзор современных методов повышения эффективности биологической очистки;
- обосновать и предложить оптимизированное решение, направленное на повышение эффективности очистки;
- рассчитать материальный баланс процесса до и после внедрения предложенной технологии;
- оценить экономическую и экологическую эффективность предложенных изменений.

Объект исследования - процесс биологической очистки сточных вод на ООО «Тольяттикаучук».

Предметом исследования является эффективность реализации технологии регулируемого оксидативного воздействия с одновременным освещением зоны биоокисления в составе схемы очистки сточных вод.

Научная новизна - обоснование применения РОВ с одновременным освещением зоны биоокисления видимым светом как элемента ресурсосберегающей и безреагентной доочистки без капитальной реконструкции. Практическая значимость работы состоит в возможности внедрения технологии на действующих очистных сооружениях с минимальными затратами.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. В первой главе представлены теоретические основы, анализ состава сточных вод и выбор метода оптимизации. Во второй главе изложены методика и результаты лабораторного эксперимента, а также расчеты оборудования и материального баланса. В третьей главе представлены расчеты экономической и экологической эффективности, подбор оборудования.

Общий объем пояснительной записки составляет 61 страниц, включая 7 таблиц, 5 рисунков и 40 источников в списке литературы.

1 Теоретическая часть

1.1 Качественный и количественный состав сточных вод ООО

«Тольяттикаучук»

ООО «Тольяттикаучук» – одно из крупнейших предприятий нефтехимического сектора Самарской области, ведущее свою деятельность с 1961 года. С 2019 года компания входит в состав Группы «Татнефть».

Завод выпускает каучуки четырех марок, углеводородные фракции, органические синтезированные продукты и присадки для автомобильных бензинов. Основной продукцией предприятия являются синтетические каучуки, которые используются в производстве шин и различных резинотехнических изделий, покрывая четверть российского рынка [8].

Сточные воды ООО «Тольяттикаучук» образуются в результате в результате деятельности различных технологических процессов и эксплуатационных нужд предприятия. В зависимости от источников возникновения и состава загрязняющих веществ сточные воды можно классифицировать на несколько основных видов: промышленные, хозяйственно-бытовые и ливневые сточные воды.

Основными источниками промышленных сточных вод являются:

- производство бутадиена и добавки высокооктановой метанольной (БиДВМ);
- производство синтетического бутадиен-метилстирольного каучука (СБСК);
- производство изопрена;
- производство синтетического изопренового каучука (СКИ);
- производство изобутан-изобутиленовой фракции и изобутилена (ИИФИиИ);
- производство синтетического бутадиенового каучука (СБК) [8].

Хозяйственно-бытовые сточные воды образуются в результате жизнедеятельности персонала предприятия и поступают из санитарно-бытовых помещений, административных и вспомогательных зданий. Данные стоки содержат органические соединения, азот, фосфор, взвешенные вещества и микроорганизмы. Их состав близок к коммунальным сточным водам, и основным методом их очистки является биологическая обработка, после чего они смешиваются с производственными стоками для дальнейшей очистки.

Ливневые сточные воды включают дождевые и талые воды, образующиеся в результате атмосферных осадков, стекающих с поверхностей промышленных площадок, кровель зданий, дорог и других твердых покрытий. Они могут содержать загрязнения различного происхождения, включая нефтепродукты, твердые взвеси, остатки технологических веществ и микроорганизмы.

Качественный состав сточных вод предприятия характеризуется наличием широкого спектра органических и неорганических загрязняющих веществ. Основными органическими соединениями, присутствующими в сточных водах, являются анионные синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ), нефтепродукты и метанол. Среди неорганических соединений выделяются аммонийный азот, нитриты, нитраты, сульфаты, хлориды. Кроме того, в составе сточных вод присутствуют взвешенные вещества, такие как остатки полимеров и каучуков, а также частицы металлов, нерастворимые шлам.

Бактериальные и биологические загрязнения представляют собой различные микроорганизмы: дрожжевые и плесневые грибы, водоросли и бактерии, в том числе болезнетворные – возбудители брюшного тифа и дифтерии и др.

Количественные показатели загрязняющих веществ в сточных водах ООО «Тольяттикаучук» варьируются в зависимости от технологических процессов и условий эксплуатации очистных сооружений. Сведения о суммарном сбросе загрязняющих веществ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сведения о суммарном сбросе загрязняющих веществ ООО «Тольяттикаучук»[31]

Наименование ингредиента	ПДК р.х, мг/дм ³	ПДК х-б, мг/дм ³	Фоновые концентрации Саратовского водохранилища, мг/дм ³	Норматив допустимого сброса, мг/дм ³	Утверждаемый НДС, т/год
БПК 5	2,1	2,0	1,37	13,5	297,2168
БПК полный	3,0	3,0	1,37	19,4	427,11
Сухой остаток	1000	1000	279,5	2633,0	57902,2411
Взвешенные вещества	Фон+0,25	-	4,34	20,3	446,926
АСЛАВ (ПАВ)	0,1	0,05	0,25	0,05	4,6014
Фосфат-ион (по фосфору)	0,2	1,15	0,093	4,7	103,4755
Метанол	0,1	3,0	0,104	0,1	2,2016
Сульфат-анион	100	500	82,0	192,5	4260,1079
Хлорид-анион	300	350	32,7	185,0	4072,9713
Кальций	50	50	13,8	21,6	1670,5787
Магний	50	50	13,4	13,4	475,5469
Азот нитратный	10,35	10,35	1,063	20,8	457,9341
Нитрат-анион	4,1	4,1	92,0	92,2	2025,4776
Азот аммонийный	0,5	0,5	0,5	0,5	143,1044
Азот нитритный	0,5	0,5	0,122	0,122	4,7613
Нитрит-анион	3,0	3,0	0,05	0,05	0,7613
Свинец	0,006	0,05	0,002	0,002	0,04403
Медь	0,001	0,1	0,003	0,001	0,02201
Цинк	0,01	1,0	0,001	0,07	1,5411
Хром шестивалентный	0,02	0,05	0,0013	0,1	0,2422
Никель	0,01	0,02	0,0023	0,05	0,1101
Фторид-анион	Фон+0,05 (не выше 0,75)	1,5	0,207	0,2	4,4032
Алюминий	0,04	0,2	0,0279	0,7144	15,7283
Железо	0,1	0,3	0,077	0,94	20,6951

Продолжение таблицы 1

Наименование ингредиента	ПДК р.х, мг/дм ³	ПДК х-б, мг/дм ³	Фоновые концентрации Саратовского водохранилища, мг/дм ³	Норматив допустимого сброса, мг/дм ³	Утверждаемый НДС, т/год
Формальдегид	0,1	0,05	0,019	0,018	0,3963
Титан	0,06	0,1	0,0013	0,3	6,6048
Карбамид (мочевина)	80,0	-	1,56	29,9	1078,787
Нефтепродукты	0,05	0,1	0,032	1,13	25,979
Фенол	0,001	0,001	0,0019	0,06	0,022

Сезонные изменения также оказывают влияние на состав сточных вод предприятия. В летний период наблюдается повышение концентрации нефтепродуктов и органических соединений, что обусловлено более интенсивными технологическими процессами и увеличением температурных режимов. В зимний период увеличение содержания хлоридов и сульфатов связано с применением реагентов для очистки технологического оборудования.

Сточные воды оказывают значительное негативное воздействие на окружающую среду. К примеру, попадая в водную среду, углеводороды могут нарушать физиологические процессы у живых организмов и изменять условия их обитания. Токсичность отдельных фракций нефти напрямую зависит от их концентрации в воде: чем выше уровень загрязнения, тем сильнее его влияние на водные экосистемы [1]. Нефтепродукты, образуя токсичные эмульсии, затрудняют газообмен, что приводит к удушью водных организмов.

Хотя природные микроорганизмы способны разлагать нефтепродукты, этот процесс протекает медленно, в результате чего углеводороды могут оседать на дне водоемов, способствуя вторичному загрязнению окружающей среды.

Согласно отчету о контроле качества сточных вод, наиболее проблемными загрязняющими веществами в очищенных сточных водах оказались:

- метанол – зафиксированы концентрации до 9,013 мг/дм³ при нормативе 0,1 мг/дм³ (кратность превышения – 90 раз);
- формальдегид – 1,0904 мг/дм³ против ПДК 0,0018 мг/дм³ (кратность превышения – 61);
- химическое потребление кислорода (ХПК) – 194 мгО₂/дм³ при норме 15 (превышение – 12,9 раза);
- анионные ПАВ – до 1,833 мг/дм³ при нормативе 0,5 (кратность – 3,98).

Также зафиксированы незначительные превышения по титану, свинцу, никелю, фосфору, фторид-анионам и летучим фенолам.

Рост объемов сточных вод, поступающих от предприятий Северного промышленного узла, включая ООО «Тольяттикаучук», требует внесения корректировок в технологию очистки (рисунок А.1 приложение А), направленных на повышение качества сбрасываемых вод.

1.2 Описание существующей технологии очистки сточных вод на предприятии

Очистные сооружения ООО «Тольяттикаучук» предназначены для очистки сточных вод, поступающих от производственных предприятий Северного промышленного узла и бытовых сточных вод населения Центрального района г. Тольятти. Проектная мощность очистных сооружений составляет 164,8 тыс. м³/сут, из которых первая и вторая очереди обеспечивают очистку 66,3 тыс. м³/сут, а третья очередь – 98,5 тыс. м³/сут [35].

Очистка сточных вод осуществляется двумя технологическими потоками: первый (I–II очереди) включает отдельную механическую очистку промышленных и бытовых стоков с последующей их совместной

биологической очисткой, а второй (III очередь) аналогичен первому, но имеет небольшие отличия в структуре очистных сооружений.

Процесс очистки сточных вод на предприятии (рисунок 1) состоит из нескольких ключевых этапов, включающих механическую очистку, биологическую очистку, доочистку и обеззараживание сточных вод, а также обезвоживание осадков.

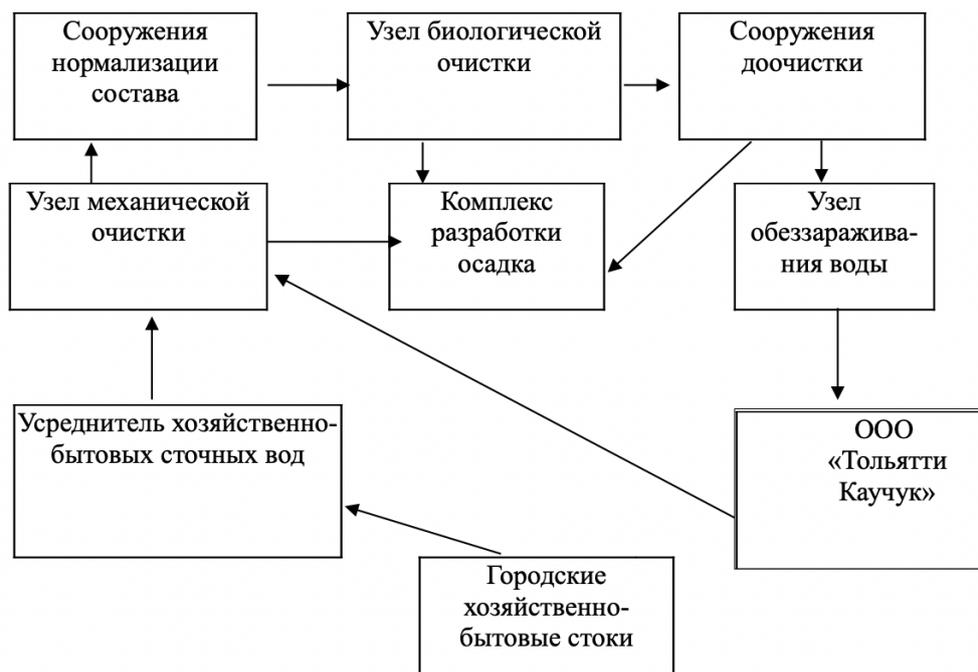


Рисунок 1 – Общая схема очистки сточных вод

Механическую обработку сточных вод применяют на предварительном этапе: она позволяет удалить до 60-90 % взвешенных твердых веществ из сточных бытовых и промышленных вод. Эта стадия включает:

- приемные камеры и механические решетки, задерживающие крупные фракции;
- песколовки, в которых осаждаются песчаные и минеральные частицы;
- усреднители, обеспечивающие выравнивание состава сточных вод перед их подачей на биологическую очистку.

После механической стадии из потока удаляются крупные и минеральные примеси, тем самым уменьшая нагрузку на следующие этапы. Очищенная вода направляется в первичные отстойники. До начала биологической обработки осветленные производственные стоки объединяются в самотечных железобетонных лотках с осветленными хозяйственно-бытовыми сточными водами.

Биологическая очистка осуществляется в аэротенках, где сточные воды подвергаются биохимическому разложению за счет жизнедеятельности микроорганизмов активного ила. Для поддержания высокой эффективности процесса в аэротенки подается воздух от воздухоподводящих станций, обеспечивающий насыщение смеси кислородом. Интенсивность подачи воздуха на аэрацию регулируется задвижками. Основные процессы, протекающие в аэротенках, включают:

- адсорбцию органических соединений микроорганизмами – загрязняющие вещества осаждаются на поверхности активного ила, что способствует их последующей переработке микроорганизмами;
- биохимическое разложение органики и минерализация загрязняющих веществ – микроорганизмы используют органические соединения как источник энергии, превращая их в простые вещества, такие как углекислый газ, вода и минеральные соли;
- окисление сорбированных веществ и восстановление активности ила – микроорганизмы активно перерабатывают органику, при этом важное значение имеет поддержание оптимальных условий, таких как концентрация кислорода и нагрузка на систему.

Процессы нитрификации и денитрификации, способствующие удалению соединений азота – нитрифицирующие бактерии превращают аммонийный азот в нитриты и нитраты, которые затем восстанавливаются до азота в ходе денитрификации [30].

Технологический процесс очистки производственных сточных вод представлен на блок-схеме (рисунок 2).

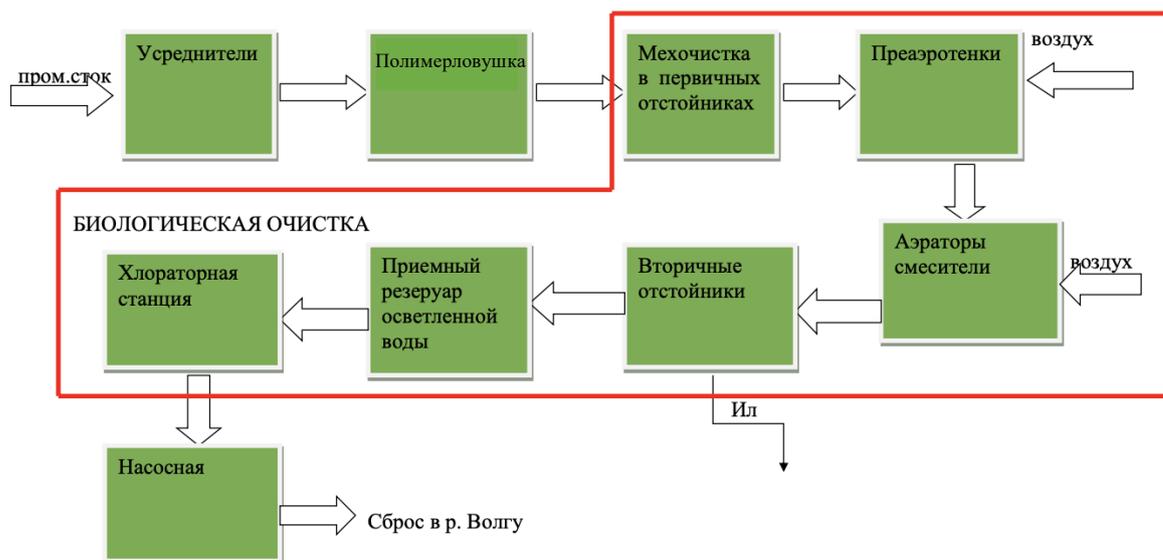


Рисунок 2 – Блок-схема биологических очистных сооружений ООО «Тольяттикаучук»

Процесс биологической очистки невозможен без участия широкого спектра микроорганизмов, которые формируют биоценоз активного ила. Основными группами микроорганизмов, участвующими в очистке, являются:

– бактерии:

а) *pseudomonas* – участвуют в разложении органических соединений, способствуют биодegradации сложных химических веществ;

б) *bacillus* – расщепляют углеводороды и жиры, играют важную роль в поддержании биоценоза активного ила. *Bacillus* не требовательна к питательным средам и может культивироваться как в аэробных, так и в анаэробных условиях;

в) *nitrosomonas* и *Nitrobacter* – осуществляют процессы нитрификации, превращая аммонийный азот в нитраты;

– простейшие организмы – инфузории рода *Vorticella*, *Opercularia*: поглощают бактерии и способствуют формированию структуры

- активного ила. Они участвуют в контроле численности бактериальных клеток и улучшают флокуляционные свойства ила;
- грибы – обеспечивают разложение трудноокисляемых соединений, таких как лигнин и фенольные соединения. Их роль особенно важна при очистке сточных вод, содержащих высокомолекулярные органические соединения.

Формирование устойчивого биоценоза активного ила является критически важным фактором эффективности биологической очистки. Любые нарушения условий эксплуатации, такие как недостаток кислорода или резкие колебания температуры, могут привести к изменению состава биоценоза и ухудшению качества очистки.

Несмотря на высокую эффективность биологической очистки, существующая система имеет ряд преимуществ и недостатков, требующих рассмотрения. К основным преимуществам относится комплексная многоступенчатая система очистки, включающая механическую, биологическую и химическую обработку, что позволяет достичь высокой степени очистки сточных вод. Важным фактором является эффективное использование активного ила, который поддерживает биоценоз и рециркулируется в процессе очистки, обеспечивая его стабильность. Биологическая стадия очистки позволяет эффективно удалять органические загрязнители, поскольку аэробная биodeградация приводит к преобразованию органических соединений в безопасные продукты. Дополнительным преимуществом является автоматизированный процесс управления, который позволяет контролировать параметры работы очистных сооружений и оперативно регулировать очистку.

Однако система также имеет ряд недостатков. Одной из ключевых проблем является недостаточная эффективность удаления загрязняющих веществ, которые не полностью устраняются в процессе биологической очистки, что приводит к превышению предельно допустимых концентраций данных веществ в сбрасываемых водах. Еще одной проблемой является

высокая нагрузка на биологическую очистку, обусловленная тем, что механическая очистка не всегда эффективно удаляет взвешенные вещества, в результате чего увеличивается нагрузка на активный ил, что снижает эффективность очистки. Существенным недостатком является образование значительного объема избыточного активного ила, который требует больших затрат на механическое обезвоживание и дальнейшую переработку. Также эксплуатация очистных сооружений требует значительных финансовых вложений, поскольку содержание систем аэрации, рециркуляции и применение реагентов для химической обработки являются затратными процессами. Таким образом, несмотря на высокую степень очистки сточных вод, система требует модернизации и внедрения дополнительных решений для повышения эффективности удаления загрязняющих веществ и снижения эксплуатационных расходов.

Во вторичных отстойниках происходит разделение биологически очищенных сточных вод и активного ила. Осевший активный ил со дна отстойников при помощи илососов удаляется в камеры иловой насосной станции 1-2 очереди и 3 очереди. Осветленные очищенные стоки после вторичных радиальных отстойников самотеком поступают в резервуар биологически очищенных стоков блока доочистки.

Перед сбросом сточные воды проходят процедуру обеззараживания с использованием гипохлорита натрия. Контроль за содержанием остаточного хлора проводится дважды в сутки. Очищенные сточные воды затем отводятся двумя потоками:

- 75,3 тыс. м³/сут – на насосную станцию №6 МУП «Производственного объединения коммунального хозяйства», откуда они поступают в Саратовское водохранилище;
- 89,5 тыс. м³/сут – через насосную станцию №3 АО «Тольяттиазот» направляются в общий рассеивающий выпуск в Саратовское водохранилище у пос. Федоровка.

Сброс сточных вод г. Тольятти осуществляется в мелководную часть водохранилища (рисунок 3) по трем выпускам на расстоянии 500 м от левого берега [34].

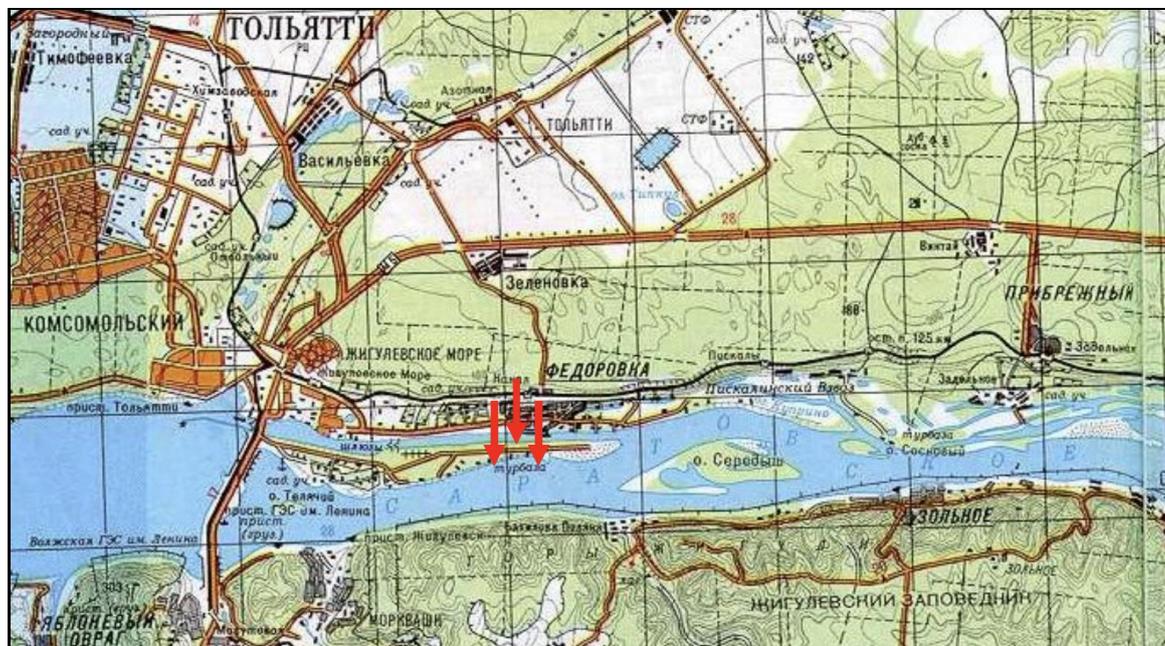


Рисунок 3 – Места выпуска сточных вод г. Тольятти в Саратовское водохранилище [34]

Точечный источник загрязнения № 1 – это хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды Автозаводского района после биологических очистных сооружений (БОС) ОАО «АВТОВАЗ».

Точечный источник загрязнения № 2 – это объединенные сточные воды после насосной станции № 3, включающие:

- хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды Комсомольского района после биологических очистных сооружений ОАО «Тольяттиазот»;
- хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды Центрального района после биологических очистных сооружений ООО «Тольяттикаучук» (30 %);

- неочищенные ливневые и промышленные сточные воды Центрального района после насосной № 1.

Точечный источник загрязнения № 3 – это хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды Центрального района после биологических очистных сооружений ООО «Тольяттикаучук» (70 %).

На стадии поступления стоков и на выходе из очистных сооружений ООО «Тольяттикаучук» действует комплексная система лабораторного контроля. Основной мониторинг осуществляется лабораторией санитарно-экологического контроля (ЛСЭК) и внешними надзорными структурами.

Аккредитованная лаборатория (ЛСЭК) осуществляет постоянный контроль за качеством сточных вод на всех этапах очистки. Она анализирует поступающую воду, оценивает эффективность процессов биологической очистки и ведет наблюдение за составом активного ила.

Санитарно-экологическая лаборатория предприятия (ЛСЭК) проводит эколабораторный контроль на промышленных участках, включая анализ сточных вод от различных производств. Периодичность отбора проб колеблется от 6 раз в сутки до 2 раз в месяц. Используемые методики утверждены в государственном реестре и соответствуют требованиям ФГУП «ВНИИМ им. Менделеева».

Также регулярный контроль осуществляется лабораторией ОАО «Тольяттиазот» над качеством воды, сбрасываемой в Саратовское водохранилище. Наряду с этим, территориальный отдел Роспотребнадзора по Самарской области и отделение ЦЛАТИ (г. Тольятти) проводят внешний надзор и квартальный отбор контрольных проб.

4. Обезвоживание и утилизация осадков

Образующиеся осадки подвергаются механическому обезвоживанию и утилизации. Включает:

- использование коагулянтов (известняк и хлорного железа) для уплотнения осадков;

- размещение осадков на иловых площадках или их переработка в отделении механического обезвоживания [10].

Анализ существующей технологии очистки сточных вод на ООО «Тольяттикаучук» показывает, что применяемая система обработки стоков является многоступенчатой и достаточно эффективной, но при этом имеет ряд существенных недостатков, требующих модернизации.

1.3 Анализ статей и патентов по теме работы

На сегодняшний день имеется много перспективных технологий по биологической очистке, обеспечивающих качество очищенной воды требуемым нормативам ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения. Реализация инновационных методов позволяет решить целый ряд экологических проблем. Был проведен анализ патентов, научных статей и технологических решений в сфере оптимизации процессов биологического способа водоочистки. Основными направлениями развития (таблица 2) являются:

- внедрение светового воздействия для активации биоценоза;
- биоаугментация активного ила устойчивыми штаммами бактерий [40];
- применение вихревых и ультразвуковых методов для физической активации ила;
- использование сорбционных и иммобилизирующих носителей для стабилизации микрофлоры;
- интеграция мембранных и биопленочных реакторов для глубокой доочистки органики [41].

Таблица 2 – Обзор и сравнительный анализ технологий

Источник / Патент	Автор/Организация	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
RU 2119461 C1[12]	Лобов Г.В., Васина Э. Г., и др./МУП «Горводоканал»	Аэрация активного ила кислородсодержащей смесью до подачи в аэротенк.	Повышенная эффективность по метанолу и органике, энергоэффективность.	Необходим точный контроль кислорода, сложность аппаратной части.
RU 2158237 C1[15]	Куликов Н. И. и др./Субратов А.А.	Многоступенчатая аэробная очистка с использованием аэробного минерализатора.	Удаление органики, снижение иловой нагрузки, стабильность.	Сложная архитектура, требует точной настройки потоков.
RU 2440306 C1 [18]	Васильев Б.В. и др./ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	Управление биоценозом ила без фосфорных добавок в аноксидных и аэробных условиях.	Устойчивость к переменному составу, подходит для органики и ПАВ.	Требует автоматизации, неэффективен при высоких нагрузках.
RU 2445275 [20]	Шулаев М.В., Фаттахов С.Г., Хабибуллина Л.И. и др./ИОФХ им. Арбузова РАН	Использование биостимулятора Мелафен для активизации ила	Простота применения, экологичность	Недостаточно изучена долгосрочная эффективность
RU 2472719 C2[21]	Серпокрылов Н.С. и др.	Использование шунгита в аэробном биореакторе как сорбента и носителя	Универсальность, доступность материала	Возможность заиливания и засорения загрузки
RU 2415086[17]	Кирсанов В.В., Кудряшов В.Н., Гафуров Р.Р. и др./ОАО «Казаньоргсинтез»	Подача сточных вод и активного ила по всей длине аэротенка	Повышение биореакции, укрупнение хлопьев	Сложность реализации, увеличение гидравлического сопротивления
RU 2522336 C1[22]	Козаченко А.И., Кузнецов Б.Д./АНХ-ИНЖИРИНГ	Диффузор с плавающим диском, равномерное перемешивание	Низкие энергозатраты, упрощенный монтаж	Низкий объем внедрений, требуется испытания
RU 2314864[16]	СФЦ Умвельттехник ГмбХ	Фильтрация сточных вод мембранами из полых волокон	Глубокая доочистка, удаление патогенов	Засоряемость мембран, дорогое обслуживание

Продолжение таблицы 2

Источник / Патент	Автор/Организация	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
MBBR (AIMS Env. Sci., 2014)[39]	Италия, Порто-Голле	Биореактор с подвижной загрузкой, активной микрофлорой	Компактность, устойчивость к нагрузкам	Необходимость фильтрации на выходе[40], недостаточное удаление фосфора[41]
RU 2121461[13]	Сабилова Т.М., Пименов И.В., Лапехина Э.А., Хмелева Н.Т./Восточный научно-исследовательский углехимический институт	Способ предназначен для очистки сточных вод от фенолов, роданидов и аммонийного азота с использованием бактериального ила, содержащего нитрифицирующие и денитрифицирующие бактерии. Очистка проводится в аэротенке при рН не ниже 7,0 и возврате ила в цикл. Сточные воды подаются в аэротенк с такой скоростью, чтобы удельная нагрузка по аммонийному азоту составляла 0,03–0,4 кг/м ³ в сутки при непрерывном аэрировании.	Технология позволяет в аэробных условиях одновременно осуществлять нитрификацию и денитрификацию, без выделения последней в отдельную стадию.	При постоянном аэрировании одновременное протекание этих процессов затруднено.
RU 2440307 С2 [19]	Халемский А. М., Швец Э. М., и др./ООО «Урал Инжиниринг Компания»	Предварительная аэрация с биологической очисткой в чередующихся аэробных зонах, замкнутый цикл.	Удаление адсорбированной органики, автоматизация процесса, снижение иловой нагрузки.	Сложность схемы, возможна частичная анаэробия в переходных зонах.
RU 2023685 С1[11]	Олешкевич Е.А. и др.	Иммобилизация ила на носителях из полимера с древесным углем.	Удаление ПАВ и органики до 99,9 %, саморегулируемая система.	Необходимость носителя, ограниченная воспроизводимость.

Продолжение таблицы 2

Источник / Патент	Автор/Организация	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
RU 2209186[25]	Кузнецов А.Е., Сафронов В.В.	Способ предназначен для очистки сточных вод от органических соединений, преимущественно фенолов, с применением активного ила в периодическом режиме. В процессе окисления в реактор поэтапно добавляют концентрированные сточные воды (до 5 г/л по фенолам) и перекись водорода (до 20 г/л), без отвода жидкости. Ил предварительно адаптируют к фенолу (до 2 г/л) и перекиси (до 3 г/л) без потери окислительной активности.	Метод позволяет значительно повысить скорость очистки, выдерживать высокие концентрации загрязнений и сократить объем стоков и очистных сооружений более чем в 10 раз.	Метод требует большого расхода перекиси водорода и работает в периодическом режиме, что увеличивает общий объем оборудования
	Андреев С.Ю., Белова Л.В. [5]	Интенсификация аэробной очистки с помощью вихревых эрлифтных устройств (ВЭУ), обеспечивающих перемешивание и равномерную загрузку активного ила.	Снижение ХПК, БПК, ПАВ, повышение эффективности мелкопузырчатой аэрации, экономия электроэнергии до 30 %.	Необходимость установки ВЭУ, тонкая настройка подачи воздуха, сложность интеграции в старые сооружения.

Продолжение таблицы 2

Источник / Патент	Автор/Организация	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
RU 2152362 С1[14]	Серпокрылов Н. С., Долженко Л. А., Носов С. В., Олифиренко В. Н.	Аэротенк глубокой очистки сточных вод оснащен контактными носителями из синтетических сеток на поворотных металлических рамах. Такая конструкция позволяет регулировать биоциноз и интенсифицировать биологическую очистку за счет иммобилизации микроорганизмов и эффективного возврата биомассы.	Установка обеспечивает высокую эффективность очистки – до 99 % по БПК и до 99,2 % по аммонийному азоту. Благодаря поворотным сеткам можно адаптировать состав микрофлоры под условия в каждой зоне. Конструкция позволяет регулировать процессы в реальном времени при колебаниях состава стока. Устройство снижает застойные зоны и равномерно распределяет потоки.	Сложность конструкции требует точного монтажа и настройки. Необходима регулярная очистка и контроль за состоянием сетчатых носителей. Установка чувствительна к механическим повреждениям рам и сеток. Требуется повышенное внимание к гидравлическому режиму и циркуляции.

Продолжение таблицы 2

Источники / Патент	Автор/Организация	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
RU 2535989 С1[23]	Самуйленко А. Я., Денисов А. А., Денисова Е. А. и др./Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности» Россельхозакадемии	Способ аэробной биологической очистки сточных вод с улучшенной флокуляцией активного ила за счет предварительного гидромеханического или ультразвукового воздействия на избыточный ил. Обработанный ил частично возвращается в цикл	Технология повышает эффективность очистки сточных вод на 60–80 % и снижает концентрации БПК и взвешенных веществ до нормативов. Существенно уменьшается выход избыточного ила и уменьшается нагрузка на иловые площадки. Повышается устойчивость работы сооружений при колебаниях состава стоков.	Необходима установка оборудования для гидромеханической или ультразвуковой обработки ила. Требуется точный контроль интенсивности и времени воздействия. Повышается сложность эксплуатации при увеличении числа перемешивающих стадий.
RU 2744230 С1[24]	А.Е. Кузнецов, А.В. Мелиоранский/Общество с ограниченной ответственностью «ТДС»	Технология сочетает введение активных форм кислорода (АФК) – в основном пероксида водорода – непосредственно в аэротенк, где происходит адаптация активного ила. Одновременно применяется освещение зоны биоокисления видимым светом (длина волны 435–445 нм), что активирует механизмы фоторепарации у микроорганизмов.	Адаптация активного ила происходит непосредственно в аэротенке, без необходимости в отдельной емкости. Комбинированное воздействие перекиси водорода и света не угнетает биоценоз, а наоборот – усиливает активность микрофлоры. Возможность использования различных АФК и фотосенсибилизаторов делает метод универсальным, а его внедрение не требует глубокой реконструкции.	Метод требует установки системы освещения аэротенков, что увеличивает энергозатраты и усложняет эксплуатацию. Необходим точный контроль дозировки перекиси водорода и других АФК, так как их избыток может угнетать биоценоз.

Для отбора технологии, подходящей к условиям очистных сооружений ООО «Тольяттикаучук», были сопоставлены два критерия:

- способность снижать концентрации основных загрязнителей – метанол, формальдегид, анионные ПАВ и повышенный ХПК;
- возможность внедрения без капитальной перестройки существующей системы биологической очистки.

Методы, основанные на деструкции ила (RU 2535989 C1), способствуют улучшению флокуляционных свойств, активируют биомассу, уменьшают выход избыточного ила и увеличивают устойчивость микрофлоры, особенно при переменных нагрузках. Но метод не очищает от метанола и формальдегида – ключевых загрязнителей стока. Для внедрения такой технологии потребуются отдельная химическая стадия.

Перспективными методами могли быть внедрение биореактора с разделением зон (MBBR), дозирование метанола и фосфорной кислоты, а также введение регуляторов биоактивности (например, мелафен, RU 2445275). Эти решения позволяют значительно улучшить качество очистки, сократить нагрузку на вторичные отстойники и выйти на нормативы по БПК, азоту и нефтепродуктам, но данные технологии требуют полной реконструкции существующих сооружений.

Для повышения эффективности вентиляции и перемешивания сточных вод авторами патента RU 2522336 C1 предложено устройство, имеющее источник сжатого воздуха и вентиляционный элемент, состоящий из внешнего и внутреннего конуса, плавающего диска, скрепленные между собой регулировочными шайбами, и гибкий водозаборный рукав с утяжеленным нижним концом.

Существует множество подходов к оптимизации биологической очистки сточных вод, основанных на применении традиционных методов. В частности, для интенсификации очистки химически загрязненных сточных вод в аэротенках

с активным илом, в патенте RU 2415086 предложен метод, предусматривающий прерывистую подачу как активного ила, так и сточных вод в аэрируемые резервуары. Согласно технологии, шлам и активная иловая смесь подаются равномерно и параллельно через вертикальные лотки с боковыми дренажами, размещенными вдоль длинной стороны резервуара, с шагом между дренажами не менее 50 мм. Основное отличие предложенной схемы от стандартной заключается в особенностях распределения иловых потоков: в новой системе достигается более высокая подача активного ила при различных уровнях нагрузки (от 160 до 480 условных единиц). Дополнительно предусмотрена интеграция различных функциональных узлов – канализационных, вентиляционных и телекоммуникационных – через продольные каналы, что позволяет эффективно совмещать потоки сточных вод с активным илом.

В результате эффективность биологической очистки в аэрируемом резервуаре с равномерным распределением потока сточных вод и активного ила существенно повысилась по сравнению с традиционной схемой подачи воздуха. Были зафиксированы изменения в структуре гранул активного ила – они стали заметно крупнее и плотнее по сравнению с контрольным вариантом.

Патент RU 2314864 описывает устройство – полуволоконный мембранный фильтр, предназначенный для удаления биомассы из сточных вод и применения в очистных системах и биореакторах. Конструкция включает полые волокнистые мембраны, собранные в пучок внутри защитной оболочки. Жидкость фильтруется снаружи внутрь, а очищенная вода отводится с одного конца мембраны, при этом предусмотрена возможность выхода газа через внешнюю опору волокон [42]. Устройство может быть интегрировано в состав промышленных очистных сооружений. Ключевыми преимуществами являются компактность, простота конструкции, надежность работы и высокая производительность фильтрации.

Для повышения эффективности аэробной очистки сточных вод был предложен метод, который предусматривает подачу сточных вод в биореактор, их аэрацию, сорбцию и окисление загрязнений на грузочном материале (RU 2472719 С2). В качестве подвижного носителя используются такие материалы, как кварцевый песок, керамзит и композиции, содержащие от 5 до 60 % активированного угля. Отличительной особенностью способа является применение диспергированного природного минерала – шунгита – в качестве загрузки. Его добавляют в аэробный биореактор вместе с очищаемыми сточными водами. Процессы окисления загрязнений происходят как на поверхности шунгита, так и за счет микроорганизмов, обитающих на его поверхности. Практические результаты подтверждают энергосберегающий эффект и рост общей эффективности биологической очистки.

В патентах RU 2023685 С1 и RU 2152362 С1 описаны системы иммобилизации микроорганизмов на носителях, позволяющие стабилизировать биоценоз и обеспечить глубокую очистку от органики и ПАВ. Технологии по RU 2440307 С2 направлены на интенсификацию биохимической активности ила.

На практике целесообразным направлением для условий ООО «Тольяттикаучук» является технология по патенту RU 2744230 С1, основанная на введении активных форм кислорода (АФК) и видимом освещении зоны биоокисления. Метод позволяет активировать микроорганизмы прямо в аэротенке, не выводя их в отдельную емкость, что сокращает площадь сооружений и снижает время адаптации ила. При этом комбинированное воздействие перекиси и света усиливает фоторепарационные процессы и окислительную активность биоценоза. Однако метод требует установки дополнительного освещения и точного контроля дозировки АФК.

1.4 Общая характеристика биологической очистки сточных вод с регулируемым оксидативным воздействием

Технология, описанная в патенте RU 2744230 C1, может применяться на городских, промышленных и хозяйственно-бытовых очистных сооружениях. Ее основная задача – повышение эффективности удаления органических загрязнителей, в том числе трудноокисляемых соединений. Этот эффект достигается за счет одновременного внесения активных форм кислорода, таких как пероксид водорода или комбинация пероксида водорода с пероксикислотами, веществами с прооксидантной активностью, а именно порфиринами, хинонами, каротиноидами, полифенолами, полиненасыщенными жирными кислотами и их производными, и освещения зоны биоокисления видимым светом. Метод универсален и может быть особенно полезен там, где состав сточных вод непостоянен, а нагрузка по ХПК – высокая.

В классических схемах обработки активного ила для усиления его свойств часто применяют предварительную адаптацию – например, выдерживают ил в отдельной емкости с дозированием перекиси водорода или других окислителей. Такой подход требует дополнительного оборудования и емкости. Но резкое воздействие АФК может вызвать стресс у микроорганизмов и даже подавить их активность. Изучаемый способ биологической очистки сточных вод предусматривает непосредственное введение оксидативного реагента в аэротенк, где циркулирует смесь стоков и активного ила. Концентрацию добавляемого агента поднимают ступенчато: начиная с 0,1 мг/л (в пересчете на эквивалентное количество H_2O_2) и постепенно доводя до оптимальной рабочей дозы, что обеспечивает популяциям микроорганизмов мягкую адаптацию к действию выбранного оксиданта. Проведение непосредственно биологической очистки проводят при использовании агента оксидативного воздействия, включающего АФК в дозах, не вызывающих полного угнетения биологической активности и

гибели микроорганизмов ила (при сублетальных дозах АФК): 0,1–100 мг/л в пересчете на эквивалентное количество пероксида водорода. Концентрации ниже 0,1 мг/л не индуцируют оксидативный стресс и не запускают выраженные адаптивные механизмы, тогда как превышение 200 мг/л способно существенно угнетать жизненные функции биоценоза даже у предварительно адаптированных сообществ и резко ухудшать показатели биологической доочистки.

На протяжении всего процесса – как в период постепенного наращивания дозы реагента, так и при стабильном рабочем режиме – водную среду освещают видимым светом с длинами волн 435–445 нм, поступающим от естественных либо искусственных источников, с интенсивностью энергетической облученности 0,2–200 мВт/л. Световое воздействие является важнейшим сопутствующим фактором: оно усиливает окислительный потенциал среды и поддерживает высокую физиологическую активность биоценоза. Отсутствие такого освещения на фазах адаптации или устойчивой эксплуатации приводит к ухудшению степени очистки сточных вод.

Интенсивное освещение – выше 200 мВт/л характеризуется обратным эффектом: активным ростом микроводорослей и цианобактерий, которые выделяют в воду лишние продукты метаболизма. При этом, если использовать только освещение без добавления окислителей - никакого заметного улучшения в работе микроорганизмов не наблюдается, эффективность водоочистки остается на прежнем уровне. Поэтому важно именно сочетание двух факторов: освещения нужной интенсивности и активных форм кислорода.

Положительное воздействие АФК и светового воздействия видимого спектра обусловлено возникновением чувствительности микроорганизмов активного ила, находящихся в состоянии стресса под действием сублетальных доз АФК, к видимому свету относительно низкой интенсивности вследствие функционирования фоторепарации с участием фермента фотолиазы, использующей свет для восстановления повреждений в ДНК микробных клеток

с максимумом поглощения при длине волны 435- 445 нм или около 380 нм и возникновением перекрестных реакций между различными внутриклеточными системами стресс-ответа.

Внедрение рассматриваемого способа на базе очистных сооружений ООО «Тольяттикаучук» возможно без кардинальной перестройки действующей схемы. Однако необходимо соблюсти ряд требований.

Главное условие эффективности – соблюдение режима регулируемого оксидативного воздействия. На первом этапе перекись водорода вносится малыми дозами – от 0,1 мг/л с постепенным увеличением до рабочих значений. Это позволяет мягко адаптировать биоценоз к новым условиям.

Режим освещения может быть как непрерывным, так и циклическим (не менее 6 часов в сутки, в ночное время). Источником могут служить естественный дневной свет или LED-прожекторы. В таблице 3 приведены технологические параметры способа биологической очистки сточных вод с регулируемым оксидативным воздействием.

Таблица 3 – Технологические параметры способа биологической очистки сточных вод с регулируемым оксидативным воздействием

Параметр	Рекомендуемые значения / Условия внедрения
Начальная доза H ₂ O ₂	0,1–10 мг/л (адаптационный период)
Рабочая доза H ₂ O ₂	50–100 мг/л (при полной адаптации)
Интервал внесения H ₂ O ₂	1 раз в 2-5 суток и дробно в течение дня
Длина волны света	435–445 нм
Интенсивность облучения	0,2–200 мВт/л
Режим освещения	Периодическое (≥6 ч/сут) или постоянное
Источник света	Естественный свет, LED-прожекторы с возможностью регулировки
Подключаемое оборудование	Дозаторы H ₂ O ₂ , система освещения, блок управления
Меры контроля	Мониторинг роста водорослей, регулировка света и доз H ₂ O ₂

Очистные сооружения ООО «Тольяттикаучук» имеют в наличии аэротенки вытеснительного и промежуточного типов, что позволяет равномерно распределить аэрируемые зоны и активный ил по длине реактора. Однако потребуется установка системы освещения и дозирующих устройств к существующим трубопроводам.

1.5 Обоснование выбора способа для условий ООО «Тольяттикаучук»

Очистные сооружения предприятия ООО «Тольяттикаучук» сталкиваются с рядом характерных проблем: превышения по метанолу, формальдегиду, ХПК, ПАВ, а также по тяжелым металлам и летучим фенолам. Данные показатели систематически превышают установленные ПДК для сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения, что влечет за собой необходимость дополнительных или оптимизированных способов биологической очистки.

Предлагаемый способ очистки сточных вод полностью соответствует типу загрязнений, характерных для стоков предприятия. Она была успешно апробирована на модельных сточных водах с высоким содержанием фенолов, ПАВ, формальдегида и органики, и продемонстрировала снижение загрязненности по ХПК в 1,5–3 раза, а также степени очистки фенолов до 98–99 %. Способ эффективен при переменном составе стоков, что характерно для смешанных промышленных и бытовых стоков предприятия.

Обновленная блок-схема стадии биологической очистки с учетом введения H_2O_2 и освещения зоны биоокисления будет выглядеть следующим образом (рисунок 4).

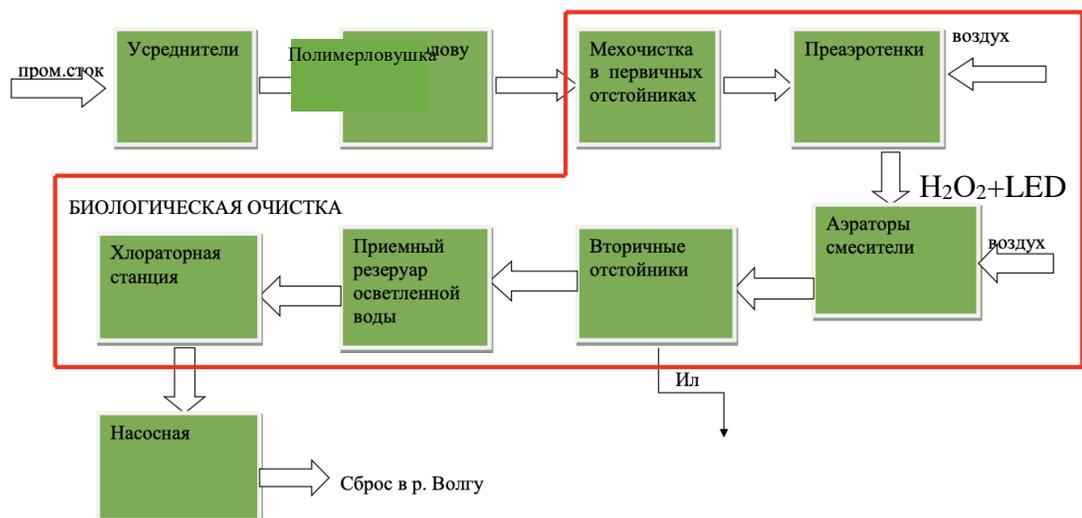


Рисунок 4 – Обновленная блок-схема стадии биологической очистки

При вводе в эксплуатацию новых сооружений биологической очистки при обеспечении одного и того же качества очистки заявляемый способ позволит повысить производительность (окислительную мощность) сооружений биологической очистки, обеспечить снижение площадей, занимаемых новыми вводимыми в эксплуатацию очистными сооружениями, а также снизить совокупные затраты. Это делает ее универсальным решением для предприятий, стремящихся повысить экологическую эффективность без значительных капитальных вложений.

Выводы к первой главе: был проведен анализ состава сточных вод ООО «Тольяттикаучук» и существующей схемы их очистки. Выявлены ключевые загрязняющие вещества. На основе обзора патентов и научных источников обоснован выбор технологии регулируемого окислительного воздействия.

2 Экспериментальная и расчетная часть

2.1 Методика проведения эксперимента

Экспериментальная часть работы направлена на исследование эффективности технологии регулируемого оксидативного воздействия при биологической очистке сточных вод. Основной задачей являлось подтверждение возможности снижения концентраций загрязняющих веществ в сточных водах с одновременным уменьшением образования избыточного активного ила и снижением энергозатрат.

Исследования проводились в условиях, приближенных к реальной эксплуатации очистных сооружений. Эксперимент проводился в стеклянных колбах объемом 250 мл. Объем среды – 100 мл, температура 22 ± 1 °С, рН 6,8–7,2.

Раствор перекиси водорода готовился из 30 % реактива путем разведения дистиллированной водой до концентрации 4 %. Хранение осуществлялось в темных стеклянных бутылках при температуре +4...+6 °С. Из расчета 25 мг/л H_2O_2 на 100 мл среды в каждую реакционную колбу вносилось 0,063 мл 4 %-ного раствора.

В качестве модельной среды использовались искусственно приготовленные растворы, состав которых имитировал загрязненность сточных вод ООО «Тольяттикаучук» по основным компонентам: Измеряемыми параметрами являлись:

- ХПК по ГОСТ 31859-2012 (бихроматный метод) [4];
- формальдегид – колориметрически с реактивом Шиффа [36];
- ПАВ по ГОСТ 27068-86 (синильно-фотометрический метод) [26];
- метанол – по методу фотометрии с хромотроповой кислотой [32];
- массовая доля ила – по сухому остатку после фильтрации (по ГОСТ 18164-72 [3]).

В рамках эксперимента были выделены три группы:

- контрольная (без реагента и освещения);
- с дозированием реагента H_2O_2 (25 мг/л), но без освещения;
- с реагентом H_2O_2 (25 мг/л) и видимым светом (опытная группа).

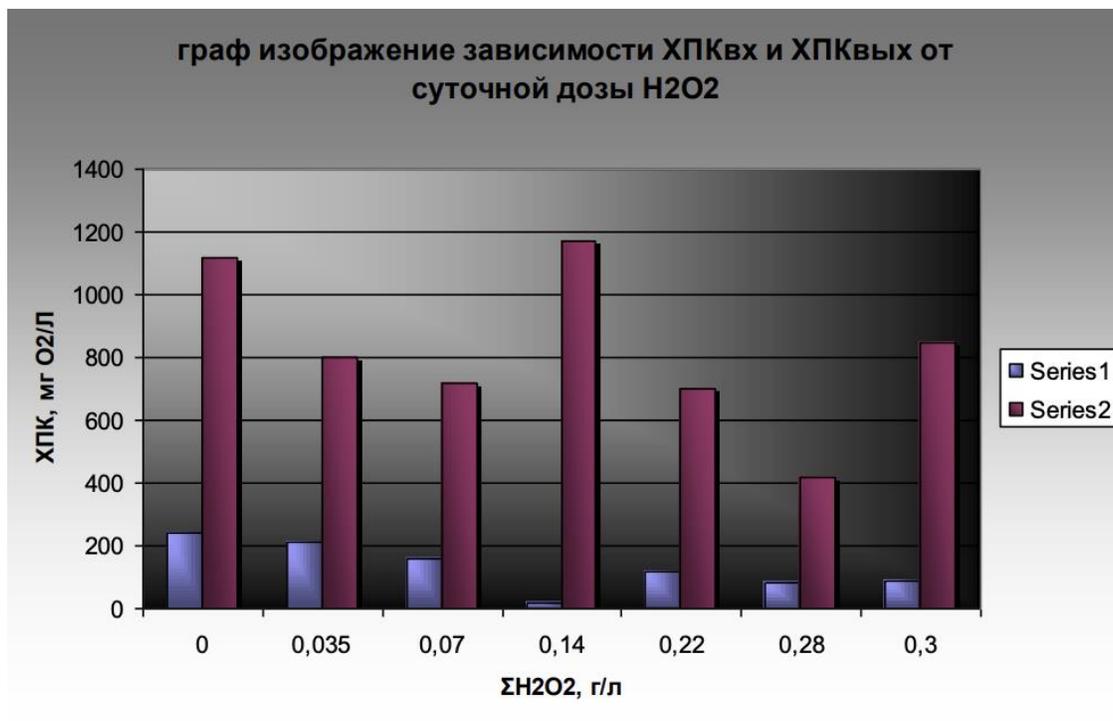
Пробы отбирались на входе и выходе из модели. Активный ил использовался промышленного происхождения – отобранный на действующих очистных сооружениях, предварительно отстоянный и адаптированный в течение 5 суток к дозированию пероксида водорода при сублетальных дозах.

Методика эксперимента основана на работе Кузнецова А.Е., согласно которой опыты по биологической очистке сточных вод с активным илом проводили в неасептических условиях с аэрацией среды в режиме периодического культивирования в колбах на качалке при 170–200 об/мин, комнатной температуре 20–25°C, рН 5,7–8,5. Использовались колбы объемом от 100 до 250 мл со средой 40–100 мл и активный ил из аэротенков городских очистных сооружений.

В ходе эксперимента в опытной группе осуществлялось регулярное внесение перекиси водорода в концентрации 25 мг/л в течение 10 суток. Постепенное повышение дозировки в ходе адаптационного периода показало, что популяция активного ила способна переносить дозы перекиси до 2 % объемной концентрации без признаков угнетения.

Освещение обеспечивалось люминесцентными лампами (две по 20 Вт), размещенными на расстоянии 30–40 см от поверхности колб, с длиной волны 435–445 нм и интенсивностью 0,3–0,5 Вт/л при времени воздействия 6 часов в сутки. Режим освещения был выбран импульсный, с возможностью коррекции по таймеру. Колбы, требующие защиты от освещения, заворачивались в фольгу.

В опытах Кузнецова А.Е. для определения оптимальной дозы реагента был использован диапазон от 25 до 300 мг/л. На рисунке 5 представлена зависимость $\text{ХПК}_{\text{вых}}$ от дозы пероксида водорода. При дозах выше 0,14 г/л эффективность снижается из-за угнетения дыхательной активности микроорганизмов.



серия 1 – ХПК_{вых}., серия 2 – ХПК_{вх}

Рисунок 5 – Зависимость ХПК_{вх} и ХПК_{вых} от дозы H₂O₂[6]

В первой серии опытов H₂O₂ вносилась однократно. При дозе 25–50 мг/л ХПК снижался с 560 мг/л до менее 30 мг/л за 4 суток. Это демонстрирует высокую эффективность даже при низких концентрациях пероксида водорода при условии освещения. Во второй серии использовался режим дробного внесения H₂O₂. При начальной ХПК около 1040 мг/л дробная подача в сочетании с освещением обеспечила снижение до 15 мг/л.

На рисунке 6 представлено сравнение эффективности при одинаковой дозе перекиси – с освещением (линия 3) и без (линия 4).

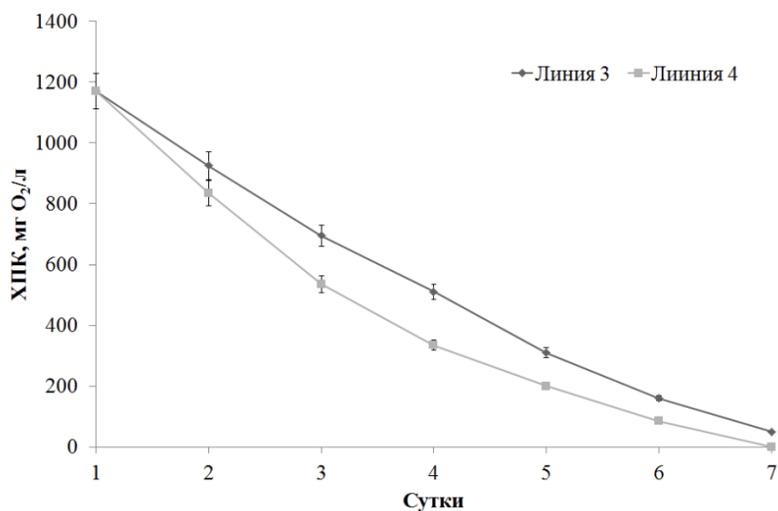


Рисунок 6 – ХПК при дробной подаче H_2O_2 [6]

При наличии света ХПК снижался до 15 мг/л, тогда как без света – только до 60 мг/л. Это подтверждает активную роль фоторепарации в биологическом процессе очистки.

2.2 Результаты эксперимента

В ходе лабораторного эксперимента были получены следующие результаты (таблица 4).

Таблица 4 – Эффективность комбинированного воздействия H_2O_2 и света по сравнению с контрольной группой

Показатель	До эксперимента	После применения H_2O_2 и света	Норматив (ПДК)
ХПК, мг O_2 /л	194	48	15
Метанол, мг/л	9,01	0,1	0,1
Формальдегид, мг/л	1,09	0,01	0,006
Анионные ПАВ, мг/л	1,83	0,04	0,1
Избыточный ил, % от исходного	100	60–70	-

Примечание: нормативы ПДК указаны согласно требованиям сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения

Наиболее выраженное снижение наблюдается по формальдегиду и метанолу – веществам, по которым на ООО «Тольяттикаучук» фиксировались максимальные превышения. В результате эксперимента: формальдегид снизился с 1,09 мг/л до 0,01 мг/л, что более чем в 15 раз ниже ПДК (0,006 мг/л); метанол – с 9,01 мг/л до 0,1 мг/л, что соответствует ПДК. Снижение ХПК фиксировалось с 194 до 48 мг/л. Хотя нормативное значение (15 мг/л) не был достигнут в рамках лабораторных условий, полученные данные говорят о возможности его достижения при дополнительной очистке (вторичный отстойник). Концентрация анионных ПАВ снизилась с 1,83 до 0,04 мг/л.

Также было зафиксировано снижение илообразования на 30–40 %, что свидетельствует о повышении осаждаемости активного ила и исчезновение нитчатых форм в биоценозе. Результаты экспериментальной части подтверждают эффективность технологии регулируемого оксидативного воздействия.

2.3 Расчет материального баланса

Для расчета необходимого количества перекиси водорода используется дозирование в пересчете на объем сточных вод. Согласно результатам лабораторных исследований, эффективная доза реагента составляет 20–30 мг/л 100 % H_2O_2 , вводимая 1 раз в 2–5 суток. В данной работе принята средняя доза 25 мг/л с периодичностью раз в 3 суток.

Итак, исходные данные:

- производительность – 165 000 м³/сут (6875 м³/ч);
- доза H_2O_2 – 25 мг/л;
- концентрация раствора – 4 %;
- плотность раствора – 998 кг/м³;
- объем аэротенков – 16 000 м³;

- интенсивность освещения – 0,5 Вт/л;
- режим работы LED – 6 ч/сут;
- запас на емкость – $R = 1,2$ (20 %).

Принцип предлагаемого решения патента RU 2744230 C1 заключается в том, что оксидативное воздействие осуществляется непосредственно в рабочем объеме аэротенка – без дополнительной камеры, где обычно обрабатывается активный ил (рисунок А.2 и А.3 Приложения А). Агент дозируется напрямую в аэротенк, где присутствует смесь сточных вод и активного ила, находящаяся в режиме биологического окисления. Подача реагента не зависит от массы осадка или содержания сухого вещества в иле. Соответственно, нет необходимости расчета массы абсолютно сухого вещества активного ила, что упрощает эксплуатацию и делает процесс очистки более гибким. Перекись водорода вносится в малых дозах, достаточных для стимуляции метаболизма микроорганизмов, но недостаточных для подавления их активности. Это обеспечивает высокий уровень биохимического окисления даже при колебаниях состава или объема сточных вод.

Одновременно с введением окислителя применяется видимое освещение зоны биоокисления. Для этого используются светодиодные модули, установленные над зеркалом воды в аэротенке. Длина волны излучения составляет 435–445 нм – наиболее воспринимаемый микрофлорой активного ила диапазон. Такая длина световой волны активирует фоторепарацию и способствует поддержанию высокой биологической активности ила. Интенсивность освещения выбирается в пределах безопасных значений – порядка 0,3 Вт/л, чтобы исключить чрезмерный рост микроводорослей и сохранить устойчивость биоценоза. Работа световых модулей возможна как в непрерывном, так и в импульсном режиме в течение 6–10 часов в сутки, преимущественно в темное время или в условиях недостаточного естественного освещения.

Расчет общего объема сточных вод за 3 суток:

$$V_{\text{общ}} = Q_{\text{сут}} \times T, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сут}}$ – суточный объем сточных вод, м³/сут;

T – период дозирования, сут.

$$V_{\text{общ}} = 165000 \times 3 = 495\,000 \text{ м}^3.$$

Расчет общего расхода перекиси водорода (100 %):

$$m = V_{\text{общ}} \times C, \quad (2)$$

где m – масса H₂O₂, кг;

C – доза, г/л.

$$m = 495\,000 \times 0,025 = 12\,375 \text{ кг H}_2\text{O}_2.$$

Среднесуточный расход H₂O₂:

$$m_{\text{сут}} = 12\,375 / 3 = 4\,125 \text{ кг/сут.}$$

Масса 4 %-ного раствора перекиси водорода:

$$m_4 = m_{\text{сут}} / w, \quad (3)$$

$$m_4 = 4\,125 / 0,04 = 103\,125 \text{ кг/сут.}$$

Объем раствора:

$$V = m_4 / \rho, \quad (4)$$

где ρ – плотность раствора, кг/м³.

$$V = 103\,125 / 998 \approx 103,3 \text{ м}^3/\text{сут}$$

Подача по времени (если дозировать равномерно в течение суток):

$$Q_{\text{час}} = 103,3 / 24 \approx 4,3 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Результаты расчета сведем в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчет материального баланса

Параметры	Единицы измерения	Значения
Объем стоков за 3 суток	м ³	495 000
Доза H ₂ O ₂ (100 %)	мг/л	25
Общий расход H ₂ O ₂	кг	12 375
Среднесуточный расход	кг/сут	4 125
Раствор H ₂ O ₂ 4 %	м ³ /сут	103,3
Подача в час	м ³ /ч	4,3
Объем хранения с запасом	м ³	371,9

Таким образом, насос должен обеспечивать дозированную подачу раствора в объеме около 4,3 м³/ч. Периодическая подача позволяет использовать насос в импульсном режиме[37], что снижает нагрузку на оборудование и увеличивает его ресурс.

2.4 Расчет оборудования для подачи перекиси водорода

На данном этапе рассчитаем параметры оборудования, обеспечивающего дозированную подачу перекиси водорода в аэротенки. В данной схеме перекись водорода (4 %-ный раствор) вводится без рециркуляции активного ила и с минимальным вмешательством в основную конструкцию очистных сооружений. Это требует точного подбора насосного агрегата [7], емкостного оборудования и системы управления дозированием.

Дополнительные данные:

- КПД насоса $\eta_n = 0,7$;
- КПД передачи: $\eta_p = 0,98$.

Формула для расчета мощности насоса:

$$N = \frac{Q \times \rho \times g \times H}{1000 \times \eta_n \times \eta_p}, [37] \quad (5)$$

где N – мощность насоса, кВт;

Q – расход раствора, м³/с;

g – ускорение свободного падения, 9,81 м/с²;

H – напор, м;

η_n – КПД насоса;

η_p – КПД передачи.

Подставим значения:

$$Q = 4,3 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,0012 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$N = \frac{0,0012 \times 998 \times 9,81 \times 30}{1000 \times 0,7 \times 0,98} = 0,51 \text{ кВт.}$$

Таким образом, выбирается насос с номинальной мощностью не менее 0,51 кВт.

Буферная емкость для хранения перекиси водорода рассчитывается с учетом трехсуточного объема раствора и запаса 20 %:

$$V_{\text{хран}} = V_{\text{сут}} \times T \times R, \quad (6)$$

$$V_{\text{хран}} = 103,3 \times 3 \times 1,2 \approx 371,9 \text{ м}^3.$$

Рекомендуется использование резервуара из химически стойкого материала – полиэтилена высокой плотности. Система управления дозированием должна включать контроллер PLC с возможностью настройки режима подачи: временные интервалы, регулировка расхода, включение по сигналу. Обязка насоса включает обратный клапан, импульсный демпфер, расходомер, узел промывки, клапан аварийного сброса. Все соединения выполняются на фланцах и оборудуются прокладками из PTFE или EPDM.

Монтаж осуществляется в утепленном контейнере, оснащенном вентиляцией, освещением и обогревом. Внутренний контур дозирования

защищается от замерзания с помощью греющего кабеля и автоматического термореле.

В условиях размещения аэротенков на открытом воздухе и организации ночного режима освещения расчетная энергетическая освещенность воды в зоне биоокисления должна составлять не менее $0,5 \text{ Вт/м}^3$, чтобы обеспечить стабильную фотореактивную активность микроорганизмов. При средней глубине аэротенка около 4 метров, это соответствует требуемой мощности освещения на уровне 2 Вт/м^2 по зеркалу воды.

Площадь поверхности аэротенка (для объема $16\,000 \text{ м}^3$ и глубины 4 м) составит:

$$S = V/h, \quad (7)$$

$$S = 16\,000/4 = 4\,000 \text{ м}^2$$

Необходимая мощность освещения:

$$W = 2 \times 4\,000 = 8\,000 \text{ Вт} = 8 \text{ кВт}$$

При КПД светильников 80 % (над водой) и 10 % эффективном проникновении света в воду, фактическая мощность должна быть увеличена в 10 раз:

$$W_{\text{факт}} = 8 \times 10 = 80 \text{ кВт}$$

Расход энергии в ночной период (6 ч):

$$E_{\text{сут}} = 80 \times 6 = 480 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут.}$$

Используются LED-светильники мощностью 150–200 Вт. Необходимое количество:

$$N_{\text{св}} = 80\,000/200 = 400 \text{ штук.}$$

Светильники устанавливаются по периметру аэротенков с шагом 5–7 м, на опорах высотой 2,5–3 м. Светораспределение – $90\text{--}120^\circ$. Все светильники объединяются в группы по 10–15 штук с подключением к центральному

распределительному щиту. Управление освещением осуществляется через таймеры, датчики освещенности и блоки автоматического включения.

В качестве источников освещения предлагается использовать светодиодные светильники промышленного исполнения модели IO-PROM200M, так как они соответствуют расчетным требованиям по мощности, световому потоку и степени защиты. Может эксплуатироваться в условиях повышенной влажности и загрязненности.

Для уменьшения эксплуатационных расходов и удобства обслуживания система монтируется по блочно-секционной схеме. Каждая линия оснащена автоматическим выключателем, предохранителем и аварийным отключением. Питание – от трехфазной сети 380 В через преобразователь напряжения. Предусмотрен режим ночного дежурного освещения и возможность включения вручную при обслуживании.

Техническое обслуживание включает регулярную очистку оптики (1 раз в месяц), проверку изоляции, контроль мощности потребления и замену элементов питания. Система легко масштабируется под увеличение или сокращение площади аэротенков.

Контроль и измерение в системе мониторинга работы очистных сооружений и поддержания трофности поверхностных замкнутых водоемов наряду с традиционными параметрами и показателями очистки (Т, рН, рО₂, ХПК и др.): инсоляции зеркала воды солнечным светом в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра; содержания в очищаемой воде Н₂О₂ и/или других активных форм кислорода естественного происхождения и/или добавленных в очистное сооружение; примесей водорослей и цианобактерий в составе консорциумов микроорганизмов активного ила и биопленок; степень адаптированности активного ила и его основных групп к оксидативным стрессорам, а также использование, при необходимости, генетических маркеров ответа популяции микроорганизмов на оксидативный стресс (рисунок 7).

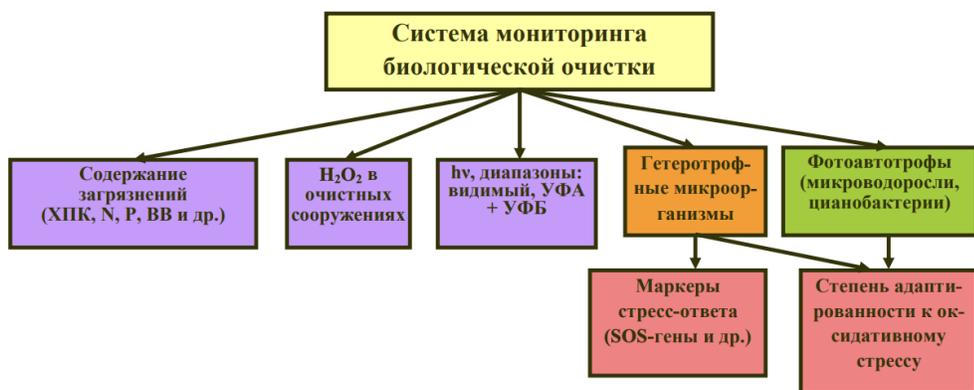


Рисунок 7 – Схема системы мониторинга хода биологической очистки в условиях контролируемого оксидативного стресса[6]

Организация такой системы мониторинга позволит более тщательно контролировать ход биологической очистки, отслеживать роль всех упомянутых факторов в повышении качества очистки сточных вод при их совместном действии.

Выводы ко второй главе: разработана методика лабораторного эксперимента с использованием дозированной подачи перекиси водорода и освещения зоны биоокисления. Получены количественные данные по снижению ХПК, формальдегида, метанола и ПАВ до нормативных значений. Выполнены расчеты материального баланса и подобрано оборудование. Подтверждена технологическая реализуемость метода и его совместимость с существующей схемой очистки.

3 Решение вопросов интенсификации процесса с позиций энерго- и ресурсосбережения

3.1 Оценка экологической эффективности

В результате внедрения технологии достигается существенное снижение концентраций приоритетных загрязнителей в сточных водах. По результатам эксперимента, на фоне дозирования H_2O_2 (в дозе 25 мг/л) и воздействия видимым светом (диапазон 435–445 нм) были достигнуты следующие эффекты:

- снижение концентрации формальдегида с 1,09 до 0,01 мг/л (на 99,1 %);
- снижение концентрации метанола с 9,01 до 0,1 мг/л (на 99 %);
- снижение ХПК с 194 до 48 мг/л (на 75 %);
- снижение концентрации анионных ПАВ с 1,83 до 0,04 мг/л (на 97,8 %).

Расчет массы предотвращенного сброса загрязняющих веществ за год следующий:

$$M = \frac{(C_{\text{до}} - C_{\text{после}}) \times Q \times 365}{1000}, [29] \quad (8)$$

где M – масса сброса, т/год;

$C_{\text{до}}$ и $C_{\text{после}}$ – концентрации загрязнителя до и после внедрения технологии, мг/л;

Q – объем сточных вод, м³/сут.

$$\text{Формальдегид: } M = \frac{1,08 \times 165000 \times 365}{1000} = 65,03 \text{ т/год.}$$

$$\text{Метанол: } M = \frac{8,91 \times 165000 \times 365}{1000} = 536,52 \text{ т/год.}$$

$$\text{ХПК: } M = \frac{146 \times 165000 \times 365}{1000} = 8\,759,25 \text{ т/год.}$$

$$\text{Анионные ПАВ: } M = \frac{1,79 \times 165000 \times 365}{1000} = 107,72 \text{ т/год.}$$

Общая масса предотвращённого сброса составляет более 9 500 тонн в год.

3.2 Оценка экономической эффективности

Одним из важнейших направлений оптимизации процессов очистки сточных вод является внедрение методов, обеспечивающих более полное удаление загрязняющих веществ при меньших затратах ресурсов. В условиях ограниченного пространства, высокой переменности состава сточных вод и растущих требований к качеству очистки особую значимость приобретают технологии, не требующие капитальных реконструкций, но позволяющие значительно повысить эффективность процессов.

С точки зрения ресурсосбережения внедряемая технология позволяет снизить совокупное потребление реагентов. В частности, при традиционной биологической очистке для достижения аналогичного эффекта требуется применение коагулянтов, флокулянтов, адсорбентов или химических окислителей в больших количествах.

В рамках оценки экономической эффективности предлагается рассчитать годовую экономию. Для начала рассмотрим расходы по основным аспектам.

Затраты на утилизацию избыточного активного ила. Процесс его образования неизбежен вследствие роста биомассы микроорганизмов, активно перерабатывающих органические вещества в аэротенках. Однако объемы образующегося ила могут существенно различаться в зависимости от параметров технологического процесса. В условиях высокой нагрузки на систему, нестабильного состава сточных вод и нарушений режима аэрации происходит избыточное разрастание микробной биомассы, сопровождающееся повышенным образованием осадка. Это может влиять на стабильность работы вторичных отстойников, снижая эффективность всего очистного процесса. В результате

применения предложенной технологии достигается сокращение объема избыточного ила на 30–40 %.

Таким образом до внедрения:

$$20 \text{ м}^3/\text{сут} \times 420 \text{ руб./м}^3 \times 365 \text{ сут} = 3\,066\,000 \text{ руб./год.}$$

Сокращение объема ила на 40 %:

$$12 \text{ м}^3/\text{сут} \times 420 \text{ руб./м}^3 \times 365 \text{ сут} = 1\,839\,600 \text{ руб./год.}$$

Расходы на химические реагенты. Ориентировочно рассчитаем: при расходе 1000 м³/сут требуется около 4 кг H₂O₂ в сутки, при цене 110 руб./кг (в пересчете на 100 % вещество) затраты составляют 440 руб./сут или 160 600 руб./год.

Для текущего объекта с общим объемом сточных вод 165 000 м³/сут:

- затраты на реагент составляют 165×440 руб. = 72 600 руб./сут;
- годовая потребность: 72 600×365 = 27 000 000 руб./год.

Затраты на освещение. При надводном размещении осветительных приборов и учете светорассеивания (до 90 %) для поддержания активного физиологического состояния биоценоза необходима установленная мощность освещения около 3,1 кВт на 1000 м³ воды при 12-часовом режиме. Скорректируем расчет для 6 часов:

$$\text{на } 1000 \text{ м}^3 \text{ } 1,55 \text{ кВт} \times 6 \text{ ч} = 9,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$\text{на } 165\,00 \text{ м}^3 \text{ } 9,3 \times 16,5 = 153,45 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сут.}$$

$$\text{В сутки } 153,45 \times 7 = 1\,074,15 \text{ руб./сут.}$$

$$\text{Годовые затраты составили } 391\,069,75 \text{ руб./год.}$$

Экономическая эффективность составила:

$$1\,839\,600 + 27\,000\,000 + 391\,070 = 29\,230\,670 \text{ руб./год}$$

Для внедрения технологии РОВ потребуется следующее оборудование, предоставленное в таблице 6.

Таблица 6 – Капитальные вложения

Оборудование	Модель / Источник	Ориентировочная цена, руб.	Характеристики
Насос-дозатор H ₂ O ₂	Seko Tekna EVO[7]/TMP603	38 830	Мембранный насос, производительность: 4–8 л/ч, давление: до 12 бар, питание: 100–240 В, управление: цифровое, ЖК-дисплей, входы для датчиков уровня и температуры
Ёмкость для хранения H ₂ O ₂	Экополимер (Россия) / Simona (Германия)	1 000 000	Полиэтилен высокой плотности (HDPE), стойкий к H ₂ O ₂ ; с люком, дыхательным клапаном и переливом
LED-промышленный светильник (200 Вт)	Ю-ПРОМ200М [33]	400 шт×15 876 =6 350 400	Мощность 200 Вт, температурный режим: -40...+60 °С
Шкаф автоматизации	Овен ШКА (PLC, сборка)	1 000 000	Оснащен контроллером, регулирование параметров, возможность удалённой диспетчеризации
Электромонтаж и кабельная продукция	НУМ, ВВГнг, металлорукав, щиты	1 100 000	

Итого вложения составили:

38 830+1 000 000+6 350 400+1 000 000+1 100 000=9 489 230 руб.

Экономический эффект достигается за счет снижения объема экологических платежей. Расчет платы за сверхнормативный сброс загрязняющих веществ выполнен в соответствии с пунктом 11 Постановления Правительства РФ № 913 от 03.11.2020 г., согласно которому при превышении нормативов сброса применяется базовая ставка, умноженная на коэффициент, равный 25.

Формула для расчета:

$$П = \Delta C \times Q_{\text{год}} \times T \times 25 / 1000, [28] \quad (10)$$

где ΔC – превышение концентрации, мг/л ($C_{\text{факт}} - \text{ПДК}$);

$Q_{\text{год}}$ – годовой объем сточных вод, м³;

T – ставка платы в руб./тонну (Прил. к Пост. № 913).

Результаты расчета сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Плата за сверхнормативный сброс загрязняющих веществ

Вещество	ΔC , мг/л	Масса, т/год	Ставка, руб./т	Коэф. К	Плата, руб.
Формальдегид	1,084	65,244	7 355,9	25	12 001 216
Метанол	8,91	536,605	7 355,9	25	98 547 221
Анионные ПАВ	1,73	104,189	1 192,3	25	3 104 869

При сохранении существующих концентраций превышения по формальдегиду, метанолу и анионным ПАВ годовая сумма платы может достигать 113 млн руб.

Сводя все расчеты, получаем результат:

$$E_{\text{год}} = 113 - 29,231 = 84 \text{ млн/год.}$$

Срок окупаемости рассчитывается по формуле:

$$T = K_{\text{вложений}} / E_{\text{годовая}} \quad (9)$$

$$T = 9,5 \text{ млн} / 84 \text{ млн} \approx 0,11 \text{ год.}$$

Экономический эффект также может достигаться и за счет отказа от части затрат на утилизацию неочищенных вод. Как показывает опыт эксплуатации, в системах с регулируемым окислительным воздействием процент повторных очисток снижается, что уменьшает объем воды, возвращаемой на начальные стадии технологического цикла. Это дает возможность сократить энергозатраты и увеличить общий КПД системы очистки.

3.3 Оптимизация работы аэротенков и световых модулей

Вопрос энергосбережения занимает центральное место в современных подходах к модернизации очистных сооружений. Биологическая очистка сточных вод является одним из наиболее энергоемких промышленных процессов. Наибольший расход электроэнергии связан с системами аэрации и поддержания жизнедеятельности активного ила [27]. Дополнительное освещение, на первый взгляд, может способствовать увеличению энергопотребления, однако в долгосрочной перспективе правильно организованная система позволяет достичь существенной экономии за счет управляемого графика включения, использования естественного освещения и импульсного режима работы LED-светильников.

Одним из значимых факторов является импульсный или циклический режим работы системы освещения.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что микроорганизмы активного ила реагируют на прерывистое освещение столь же эффективно, как и на постоянное, при этом энергопотребление соответственно может быть снижено на 30–40 %. Это напрямую позволяет обеспечить необходимую биологическую активность при значительно меньших затратах электроэнергии.

Снижение энергозатрат возможно при переходе от непрерывной подачи воздуха в аэротенки к регулируемой или переменной аэрации. В условиях регулируемого оксидативного воздействия биомасса активного ила проявляет более высокую метаболическую активность, что позволяет уменьшить продолжительность или интенсивность аэрации.

Так, например, при использовании перекиси водорода в дозе 25 мг/л и освещении 0,3 Вт/л наблюдается устойчивое снижение потребности в кислороде на 10–20 %.

Сочетание светового воздействия с дозированной подачей перекиси водорода способствует ускоренной биодеструкции органических соединений, что сокращает время пребывания сточных вод в аэротенке. В результате появляется возможность оптимизации потоков и уменьшения продолжительности работы насосного и воздуходувного оборудования, что дополнительно повышает общую эффективность очистных сооружений.

Выводы к третьей главе: проведена оценка экономической и экологической эффективности внедряемой технологии. Капитальные вложения составляют около 9,5 млн руб. Срок окупаемости составляет менее 1,5 месяцев.

Заключение

В работе рассмотрена проблема низкой эффективности существующей системы очистки производственных и хозяйственных сточных вод на ООО «Тольяттикаучук», что оказывает негативное воздействие на естественный биоценоз реки Волги, в которую осуществляется сброс.

Чтобы избежать дальнейшего ухудшения экологической обстановки, требуется повышение качества очистки сточных вод с достижением нормативных показателей.

На основе анализа существующих методов и патентов, в работе предложен способ обработки активного ила с использованием регулируемого оксидативного воздействия – дозированного введения перекиси водорода в сочетании с освещением зоны биоокисления видимым светом в диапазоне 435–445 нм.

Такой подход способствует эффективному снижению концентраций метанола, формальдегида, анионных ПАВ и ХПК, превышающих допустимые нормы.

Предложенная технология реализуется путем установки системы дозирования H_2O_2 и LED-модулей без необходимости реконструкции существующих очистных сооружений.

По расчетам материального баланса при производительности очистки сточных вод в 165 000 м³/сутки и дозе 25 мг/л, суточный расход 4 %-ного раствора перекиси водорода составляет 103,3 м³.

Для бесперебойной работы системы необходима буферная емкость объемом 371,9 м³.

Подача раствора в систему осуществляется со скоростью 4,3 м³/ч. Проведен выбор насосного и вспомогательного оборудования.

По результатам расчётов установлено:

- снижение ХПК с 194 до 48 мг/л;

- снижение формальдегида и метанола на 99 %;
- сокращение избыточного ила на 30–40 %;
- предотвращение сброса более 9 500 тонн загрязняющих веществ в год;
- снижение платы за сверхнормативный сброс на сумму свыше 100 млн рублей в год.

Капитальные затраты составляют порядка 9,5 млн рублей, при этом срок окупаемости – менее 1,5 месяцев. Предложенная оптимизация рекомендуется для внедрения на промышленных очистных сооружениях.

Список используемой литературы

1. Акулич Т. И., Андреюк С. В. Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Технология очистки сточных вод» для специальности 1-70 04 03 «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов». – Брест: БрГТУ, 2022. – 257 с.
2. Богданович Н. И. Процессы и аппараты очистки сточных вод: учебное пособие. Архангельск: САФУ, 2018. 115 с. ISBN 978-5-261-01282-5. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/161825> (дата обращения: 22.03.2025);
3. ГОСТ 18164 – 72. Вода. Методы определения содержания взвешенных веществ и осадка. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 16 с.;
4. ГОСТ 31859 – 2012. Вода. Определение химического потребления кислорода. Метод с применением бихроматного окислителя. – Введ. 2013–01–01. – М.: Стандартиформ, 2013. – 12 с.;
5. Интенсификация работы аэротенков за счет использования перемешивающих вихревых эрлифтных устройств / С. Ю. Андреев, Л. В. Белова. 2024;
6. Кузнецов А.Е. Высокоэффективные экологически чистые совмещённые системы микробиологического синтеза и очистки сточных вод с оксидативным стрессовым воздействием: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2021. – 708 с. ;
7. Насос-дозатор Seko Tekna EVO TMP603. URL: <https://www.marcobravo.ru/nasos-dozator-seko-tekna-evo-tmp603> (дата обращения: 04.05.2025);
8. О компании// Материалы сайта Группы «Татнефть» - URL: <https://togliatti.tatneft.ru/> (дата обращения: 16.04.2025);

9. ООО Тольяттикаучук// Материалы сайта «Open Vision» - URL: <https://www.open-vision.ru/about/clients/ooo-tolyattikauchuk/> (дата обращения: 01.03.2025);

10. Описание технологического процесса очистки сточных вод / АО «Тольяттисинтез». – Тольятти, 2023. – 16 с.

11. Патент № 2023685 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/02, С02F 3/10, С02F 3/34. Способ биологической очистки сточных вод от органических загрязнений : № 4954561/26 : заявл. 11.06.1991 : опубл. 30.11.1994 / Е. А. Олешкевич, Н. А. Макарова, Л. В. Сагадеева, В. Т. Разумовский;

12. Патент № 2119461 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/02. способ биологической очистки сточных вод : № 97115703/25 : заявл. 22.09.1997 : опубл. 27.09.1998 / Г. В. Лобов, Э. Г. Васина, С. П. Дыдыкин [и др.] ; заявитель Муниципальное унитарное предприятие «Горводоканал»;

13. Патент № 2121461 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/30, С02F 101/16, С02F 101/30. способ биологической очистки высококонцентрированных сточных вод : № 97105040/25 : заявл. 31.03.1997 : опубл. 10.11.1998 / Т. М. Сабирова, И. В. Пименов, Э. А. Лапехина, Н. Т. Хмелева ; заявитель Восточный научно-исследовательский углехимический институт.;

14. Патент № 2152362 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/02. Аэротенк глубокой очистки сточных вод : № 99112255/12 : заявл. 04.06.1999 : опубл. 10.07.2000 / Н. С. Серпокрылов, Л. А. Долженко, С. В. Носов, В. Н. Олифиренко.;

15. Патент № 2158237 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/02, С02F 11/02. Способ биологической очистки сточных вод и обработки осадков : № 99112545/12 : заявл. 15.06.1999 : опубл. 27.10.2000 / Н. И. Куликов, В. Н. Чернышев, Г. И. Кононов, А. А. Субратов.;

16. Патент № 2314864 Российская Федерация МПК С2, В01D 65/02, В01D 63/04, С02F 3/06, С02F 3/12. / ДЕМОУЛИН Гуннар.; патентообладатель

СФЦ Умвельттехник ГМБХ. № 2004136167/15; заявл. 23.04.03; опубл. 20.01.08, Бюл. № 2. 15 с.: ил.;

17. Патент № 2415086 Российская Федерация МПК С2, С02F 3/02. / Кирсанов В.В., Кудряшов В.Н., Гафуров Р.Р. и др.; патентообладатель ОАО «Казаньоргсинтез». № 2009114004/05; заявл. 13.04.09; опубл. 27.03.11, Бюл. № 9. 9 с.: ил.;

18. Патент № 2440306 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/30, С02F 101/16, С02F 103/04. Способ обеспечения надежности очистки сточных вод от соединений азота и фосфора : № 2010124223/05 : заявл. 11.06.2010 : опубл. 20.01.2012 / Б. В. Васильев, Ю. А. Трухин, О. Н. Рублевская [и др.] ; заявитель Государственное Унитарное Предприятие «Водоканал Санкт-Петербурга»;

19. Патент № 2440307 С2 Российская Федерация, МПК С02F 3/30, С02F 103/20. способ биологической очистки сточных вод : № 2010110401/05 : заявл. 14.09.2009 : опубл. 20.01.2012 / А. М. Халемский, Э. М. Швец, И. Амброж, Е. Р. Слюсарчик ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Урал Процесс Инжиниринг Компания (УПЕК)»;

20. Патент № 2445275 Российская Федерация МПК С2, С02F 3/02, С02F 3/34. / Шулаев М.В., Фаттахов С.Г., Хабибуллина Л.И. и др.; патентообладатель(и) Учреждение Российской академии наук институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра Российской академии наук. № 2009149504/05; заявл. 29.12.09; опубл. 20.03.12, Бюл. № 8. 38 с.: ил.;

21. Патент № 2472719 Российская Федерация МПК С2, С02F9/14, С02F 3/10, С02F 1/28. / Серпокрылов Н.С., Смоляниченко А.С., Марочкин А. А. и др.; патентообладатель(и) Серпокрылов Н.С., Смоляниченко А.С., Марочкин А. А. и др. № 2011107616/05; заявл. 28.02.11 опубл. 20.01.13, Бюл. № 2. 5 с.: ил.;

22. Патент № 2522336 Российская Федерация МПК С1, С02F 3/02, С02F 3/16, С02F 7/00. / Козаченко А.И., Кузнецов Б.Д.; патентообладатель ООО

«АНХИНЖИРИНГ». № 2012148737/05; заявл. 16.11. 12; опубл. 10.07.14, Бюл. № 19. 5 с.: ил;

23. Патент № 2535989 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/00, С02F 3/02. способ аэробной биологической очистки сточных вод : № 2013128945/10 : заявл. 26.06.2013 : опубл. 20.12.2014 / А. Я. Самуйленко, А. А. Денисов, Е. А. Денисова [и др.] ; заявитель Государственное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности» Россельхозакадемии;

24. Патент № 2744230 С1 Рос. Федерация. № 2020118749 / Кузнецов А. Е., Мелиоранский А. В. заявл. 2020.06.07: опубл. 2021.03.0, заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ТДС».;

25. Патент РФ № 2209186 (от 26.12.2003). Способ биологической очистки сточных вод от органических соединений (Кузнецов А.Е., Сафронов В.В.). Приоритет от 26.12.2000 г;

26. ПНД Ф 14.1:2.15–95. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионных поверхностно-активных веществ в пробах природных и очищенных сточных вод экстракционно-фотометрическим методом. – М.: Росгидромет, 1995 (изд. 2004). – 20 с.;

27. Поддержание оптимальных условий работы активного ила в системах биологической очистки вод / В. Е. Батынов, А. В. Церенов, С. В. Шарманджинов, Ю. С. Гермашева // Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки : Сборник трудов по материалам IV Международного конкурса научно-исследовательских работ, Уфа, 20 марта 2021 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр «Вестник науки», 2021. – С. 183-187. – EDN AQHLQN.;

28. Постановление Правительства РФ от 03.11.2020 № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и порядке их применения»;

29. Приказ Минприроды РФ от 30.03.2007 № 71. Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причинённого водным объектам вследствие нарушения водоохранного законодательства. – М., 2007. – 40 с.
30. Прикладная экобиотехнология / Под ред. А.Е. Кузнецова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – Т. 1. – 629 с.;
31. Программа производственного экологического контроля ООО «Тольяттикаучук»;
32. РД 52.24.423–2005. Массовая концентрация метанола в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с хромотроповой кислотой. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Роспотребнадзора, 2005. – 28 с;
33. Светодиодный светильник IO-PROM200M 200 Вт. URL: <https://ionos.ru/catalog/ledprom/iopromled/396> (дата обращения: 16.05.2025);
34. Селезнева А.В. От мониторинга к нормированию антропогенной нагрузки на водные объекты. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2007. – 105 с.
35. Схема водоснабжения и водоотведения городского округа Тольятти на период с 2014 до 2028 года. Система водоотведения. Том 2 / В.Т. Замиховский [и др.]. – Ростов-на-Дону: ЗАО «УК «ДонГИС», 2014. – 253 с.;
36. Третьяков В.Ф., Тальшинский Р.М., Илолов А.М., Голубева И.А., Ковалева Н.И., Французова Н.А., Якимова М.С. Методы анализа формальдегида // Вестник МИТХТ. – 2008. – Т. 3, № 6. – С. 3–9. – Серия: Химия и технология органических материалов;
37. Эксплуатация механо-технологического оборудования: курс лекций / Ю.Д. Земенков [и др.] ; под общ. ред. Ю.Д. Земенкова. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. – 257 с.;
38. Gomes A.L.R., Ribeirinho-Soares S., Madeira L.M., Nunes O.C., Rodrigues C.S.D. Disinfection of Secondary Urban Wastewater Using Hydrogen

Peroxide Combined with UV/Visible Radiation: Effect of Operating Conditions and Assessment of Microorganism Competition. *Water*, 17 (4), 596, 2025;

39. Small scale waste water treatment by anaerobic process at common effluent treatment plant // *International Journal of Engineering sciences & research technology*. 2018. № 4(7), P. 1031–1035.;

40. Stephen T.-L.T., Ivanov V., Wang X.-H., Tay J.-H. Bioaugmentation and enhanced formation of microbial granules used in aerobic wastewater treatment // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2006. V.70. Issue 3. P.374–381.;

41. Upgrading of a wastewater treatment plant with a hybrid moving bed biofilm reactor (MBBR) // *AIMS Environmental Science*. 2017. Volume 1, Issue 2. P. 45–52;

42. Wetterau G., Fu P., Chalmers R.B. Optimisation of wastewater reverse osmosis – improving performance through more aggressive operation. *The International Desalination Association World Congress*. 2021.

Приложение А

Схема очистных сооружений в ООО «Тольяттикаучук» и предложения по оптимизации биологической очистки

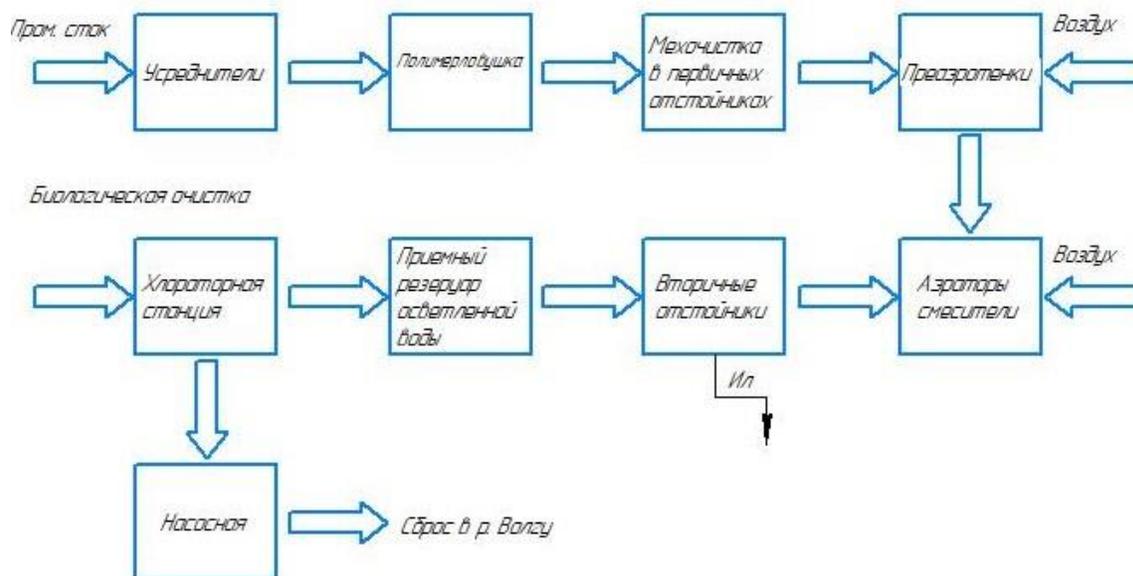


Схема очистных сооружений (до внедрения)

Общий процесс на предприятии (полная схема выше)

*поступление стоков – усреднители – полимерловушки –
механическая очистка в первичных отстойниках – преэрозии – смесители –
вторичный отстойник – приемный резервуар – хлорирование – сброс*

Рисунок А.1 - Схема очистных сооружений (до внедрения)

Продолжение Приложения А

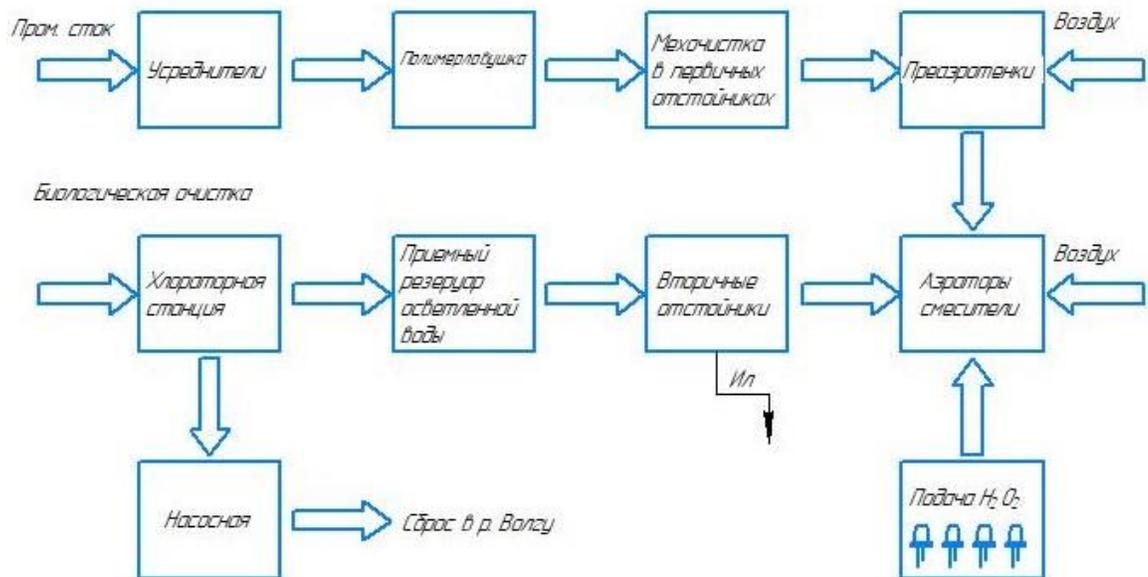


Схема после внедрения (с оптимизацией)

Та же схема, но добавлены:

-светодиодные модули над аэротенком (435-445 нм);

-подача H₂, O₂ в аэротенк

Рисунок А.2 - Схема очистных сооружений (с оптимизацией)

Продолжение Приложения А

*Регулируемое окислительное
Воздействие*

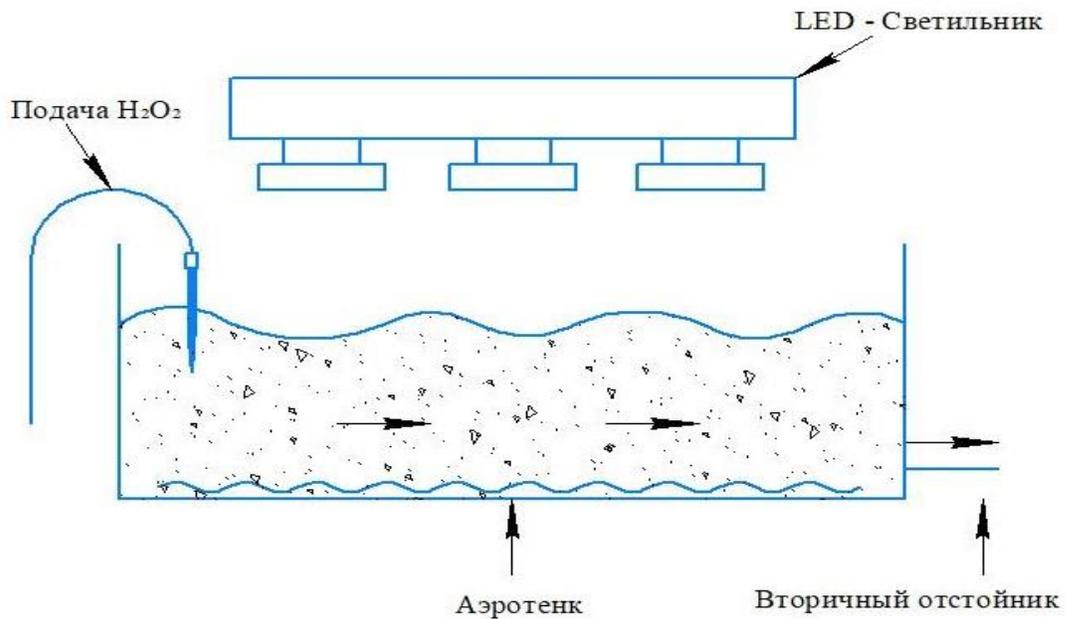


Схема предлагаемого решения (в разрезе)

Разрез аэротенка:

- слева- подача H_2O_2 через трубку;*
- сверху- LED-светильники;*
- внутри-активный ил, потоки;*
- справа- выход в отстойник*

Рисунок А.3 - Схема предлагаемого решения (в разрезе)