

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет

Кафедра

**промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта
Направление подготовки**

Техносферная безопасность

20.03.01 Техносферная безопасность

Профиль

Инженерная защита окружающей среды

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему

«Разработка мероприятий по повышению эффективности очистки сточных вод
гальванического производства»

Студент

(подпись, дата)

Минкин Денис
Валерьевич

Руководитель

(подпись, дата)

Полянская Е.А.

Консультанты:

по БЖД

(подпись, дата)

Костиневич В.В.

по экономике

(подпись, дата)

Камардина Н.В.

Нормоконтролер

(подпись, дата)

Полянская Е.А.

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от _____ № _____)

Заведующий кафедрой

(подпись, дата)

Безбородова О. Е.

Работа защищена с отметкой _____ (протокол заседания ГЭК от _____ № _____)

Секретарь ГЭК

(подпись)

Камардина Н.В.

Пенза, 2026

Реферат

Выпускная квалификационная работа (ВКР) бакалавра выполнена на тему: «Разработка мероприятий по повышению эффективности очистки сточных вод гальванического производства».

Пояснительная записка – 62 страницы, 4 рисунка, 10 таблиц, 23 источника.

Графические материалы ВКР составляют 6 листов в формате А1.

Ключевые слова: гальваническое производство, сточные воды, наилучшие доступные технологии, электрокоагуляция, мембранная очистка, ультрафильтрация, обратный осмос, гальваношлам, экологический ущерб.

Цель работы – повышение эффективности очистки сточных вод гальванического производства путем внедрения наилучших доступных технологий.

Задачи: провести анализ нормативно-правовой базы в области очистки сточных вод гальванических производств, а также существующих методов обезвреживания стоков; исследовать особенности формирования сточных вод на предприятии, оценить состав, объемы и проанализировать эффективность действующей системы очистки; обосновать и выбрать перспективные технологические решения, выполнить технологические расчеты предлагаемых мероприятий; рассмотреть вопросы безопасности жизнедеятельности при нанесении гальванических покрытий; провести оценку предотвращенного экологического ущерба.

В работе представлены: теоретические основы и нормативно-правовое регулирование очистки сточных вод гальванического производства; анализ системы водоотведения и очистки на действующем предприятии; разработка мероприятий по модернизации оборудования; анализ опасных производственных факторов и обеспечение безопасности жизнедеятельности рабочих; оценка экономической эффективности за счет предотвращенного экологического ущерба и ресурсосбережения.

Содержание

Введение.....	5
1 Теоретические основы очистки сточных вод гальванического производства.....	7
1.1 Нормативно-правовое регулирование очистки сточных вод предприятий гальванического производства.....	7
1.2 Особенности гальванического производства и виды загрязнений сточных вод.....	11
1.3 Анализ существующих методов и технологий очистки сточных вод гальванических производств.....	14
2 Анализ системы очистки сточных вод при нанесении гальванических покрытий.....	18
2.1 Характеристика предприятия.....	18
2.2 Характеристика водопользования и водоотведения на предприятие.....	19
2.2.1 Характеристика водопользования.....	19
2.2.2 Характеристика водоотведения.....	21
2.3 Анализ технологического процесса нанесения гальванических покрытий с точки зрения образования сточных вод.....	27
2.4 Анализ эффективности очистки сточных вод.....	31
3 Разработка мероприятий по повышению эффективности очистки сточных вод гальванического производства с учетом требований наилучших доступных технологий.....	35
3.1 Анализ проблем существующей системы водоотведения и очистки сточных вод.....	35
3.2 Обоснование и выбор перспективных технологических решений в контексте НДТ.....	37
3.3 Разработка предлагаемых мероприятий по повышению эффективности очистки сточных вод.....	39
4 Обеспечение безопасности жизнедеятельности при нанесении гальванических покрытий.....	46
4.1 Нормативно-правовая база охраны труда на гальваническом предприятии.....	46

4.2 Анализ вредных и опасных производственных факторов при нанесении гальванических покрытий	47
4.3 Специальная оценка условий труда на предприятии	50
5 Оценка эффективности предлагаемых мероприятий	52
5.1 Расчет предотвращенного экономического ущерба от загрязнения водных ресурсов	52
5.2 Расчет экономической эффективности от ресурсосбережения	55
5.3 Экономический эффект от снижения затрат на обращение с отходами	56
Заключение	58
Список использованных источников	60
Приложение А. Графическая часть работы	
Перечень графического материала:	
Лист 1. Карта-схема предприятия	
Лист 2. Анализ технологического процесса нанесения гальванических покрытий	
Лист 3. Схема очистки сточных вод гальванического производства	
Лист 4. Анализ эффективности очистки сточных вод	
Лист 5. Схема модуля ультрафильтрации	
Лист 6. Схема камерного фильтр-пресса	

Введение

Гальваническое производство является одним из наиболее водоемких и экологически опасных секторов промышленности. Высокая токсичность сточных вод, обусловленная присутствием ионов тяжелых металлов (меди, никеля, цинка, хрома), цианидов, кислот, щелочей и поверхностно-активных веществ создает серьезную угрозу для водных объектов и здоровья населения. Ежегодно с промывными и отработанными растворами в окружающую среду поступают значительные количества ценных компонентов, что свидетельствует не только о высокой антропогенной нагрузке, но и о нерациональном использовании ресурсов.

В Российской Федерации действует разветвленная система нормативно-правового регулирования в области охраны окружающей среды, включающая федеральные законы («Об охране окружающей среды», «Водный кодекс»), постановления Правительства, приказы Минприроды, санитарные правила и информационно-технические справочники по наилучшим доступным технологиям (НДТ). В соответствии с требованиями ИТС 36-2024 «Обработка поверхностей электрохимическими методами» предприятия обязаны внедрять малоотходные, ресурсосберегающие и замкнутые технологии, включая многокаскадные промывки, рекуперацию металлов и мембранную доочистку.

Объектом исследования в выпускной квалификационной работе выбрано предприятие, расположенное в г. Пензе, осуществляющее полный цикл нанесения гальванических покрытий при серийном выпуске малогабаритной арматуры. Выбор данного предприятия обусловлен масштабом производства, разнообразием технологических операций (цинкование, никелирование, хромирование, меднение, химическое никелирование), близостью жилой застройки (минимальное расстояние 15 м), сокращенной санитарно-защитной зоной, а также использованием в качестве

приемника сточных вод поверхностного водоема рыбохозяйственного назначения.

Цель выпускной квалификационной работы – повышение эффективности очистки сточных вод гальванического производства на основе внедрения наилучших доступных технологий для достижения нормативных требований и организации замкнутого водооборота.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ нормативно-правовой базы в области очистки сточных вод гальванических производств, а также существующих методов и технологий обезвреживания стоков;
- исследовать особенности формирования сточных вод на предприятии, оценить состав, объемы и режимы водоотведения, проанализировать эффективность действующей системы очистки;
- на основе положений ИТС 36-2024 обосновать и выбрать перспективные технологические решения для повышения эффективности очистки сточных вод, выполнить технологические расчеты предлагаемых мероприятий;
- рассмотреть вопросы безопасности жизнедеятельности при нанесении гальванических покрытий;
- провести оценку предотвращенного экологического ущерба и экономии от ресурсосбережения.

1 Теоретические основы очистки сточных вод гальванического производства

Теоретическое обоснование выбора технологических решений в области очистки гальванических стоков базируется на комплексном анализе трех взаимосвязанных аспектов: нормативно-правового регулирования, определяющего допустимые уровни воздействия и обязательные к применению подходы; особенностей формирования и состава сточных вод, обусловленных спецификой технологических процессов; и сравнительной эффективности существующих методов обезвреживания сточных вод.

1.1 Нормативно-правовое регулирование очистки сточных вод предприятий гальванического производства

Нормативно-правовым обеспечением деятельности по очистке сточных вод гальванического производства, служат документы федерального и отраслевого уровня, которые устанавливают общие требования к охране окружающей среды, нормированию сбросов, применению наилучших доступных технологий (НДТ), а также порядок разработки и реализации мероприятий по минимизации негативного воздействия на водные объекты.

1. Федеральные законы

1.1 Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 25.12.2023) «Об охране окружающей среды» [1].

Закон обязывает предприятия внедрять меры по предотвращению и сокращению сбросов загрязняющих веществ, что напрямую касается гальванических стоков.

1.2 Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 26.12.2024) «Об отходах производства и потребления» [2].

Регулирует учет, контроль и правила обращения с отходами, включая образование, сбор, транспортировку, хранение, переработку и утилизацию

осадков очистки сточных вод гальванического производства (шламы с тяжелыми металлами).

1.3 Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ (ред. от 26.12.2024) «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [3].

Регламентирует контроль за соблюдением предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в сточных водах и окружающей среде для защиты здоровья населения.

1.4 Федеральный закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 29.12.2025) «Водный кодекс Российской Федерации» [4].

Определяет порядок использования водных объектов для сброса сточных вод, устанавливает запрет на сброс без разрешения и требования к качеству воды в местах выпуска. Особое внимание уделяется нормированию допустимых сбросов (НДС) для предотвращения загрязнения водоемов токсичными соединениями из гальванических стоков.

1.5 Федеральный закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении» [5].

Регулирует отношения в сфере водоотведения, включая требования к качеству очищенных сточных вод, передаваемых в централизованные системы, и меры по обеспечению экологической безопасности.

2. Постановления Правительства РФ

2.1 Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2398 (ред. от 18.12.2024) «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий» [6].

Регламентирует категоризацию объектов НВОС, что определяет требования к очистке сточных вод для гальванических цехов.

2.2 Постановление Правительства РФ от 13.03.2019 № 262 «Об утверждении Правил создания и эксплуатации системы автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ» [7].

Устанавливает правила создания и эксплуатации систем мониторинга загрязнения, обязательные для крупных гальванических производств.

2.3 Постановление Правительства РФ от 23.12.2014 № 1458 «О порядке определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям» [8].

Определяет механизм отнесения технологий к НДТ, что является ключевым для выбора схем очистки сточных вод гальванического производства (реагентные, мембранные, ионообменные методы).

2.4 Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 (ред. от 28.11.2023) «Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения» [9].

Устанавливает максимально допустимые концентрации загрязняющих веществ (в т. ч. Cu, Ni, Cr, Zn, цианиды) при сбросе в централизованные системы водоотведения, с учетом pH 6,5–8,5.

3 Приказы Министерства природных ресурсов и экологии РФ

3.1 Приказ Минприроды России от 29.12.2020 № 1118 (ред. от актуальной даты) «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей» [10].

Определяет порядок расчета НДС с учетом фонового загрязнения, разбавления и консервативности веществ – критично для нормирования гальванических стоков.

4 СанПиНы, ГОСТы и информационно-технические справочники НДТ

4.1 СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных,

общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 3 (ред. от 15.11.2024) [11].

Регламентирует ПДК веществ в различных средах и на различных территориях

4.2 СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 (ред. от 30.12.2022) [12].

Содержит предельно допустимые концентрации для загрязняющих веществ, характерных для гальванических стоков (тяжелые металлы, цианиды, хром(VI) и др.). Это целевые показатели, которых необходимо достичь после очистки для сброса воды в водные объекты.

4.3 ГОСТ 9.314-90 «Единая система защиты от коррозии и старения. Вода для гальванического производства и схемы промывок. Общие требования» [13].

Определяет требования к качеству воды, используемой в гальваническом производстве, и принципы рационального водопользования, включая минимизацию сбросов.

4.4 Информационно-технический справочник по НДТ ИТС 36-2024. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Обработка поверхностей электрохимическими методами" (утв. Приказом Росстандарта от 24.12.2024 № 3068) [14].

Содержит описание НДТ для гальванического производства, включая меры по снижению водопотребления, предотвращению образования стоков и их очистке (многокаскадные промывки, рекуперация металлов).

4.5 Информационно-технический справочник по НДТ ИТС 8-2022 «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях» [15].

Предоставляет универсальные подходы к очистке сточных вод, включая комбинированные технологии для гальванических стоков.

5 Локальные документы предприятия

К локальным нормативным актам относятся: проект нормативов допустимых сбросов (НДС), технологический регламент очистных сооружений, инструкции по эксплуатации систем раздельного канализования стоков, а также договоры на прием сточных вод в централизованные системы водоотведения. Эти документы разрабатываются с учетом отраслевых НДТ и обеспечивают индивидуальный подход к минимизации и организации замкнутого водооборота.

1.2 Особенности гальванического производства и виды загрязнений сточных вод

Гальваническое производство (обработка поверхностей электрохимическими методами) представляет собой комплекс технологических процессов нанесения металлических покрытий на изделия из металлов и пластмасс путем электролиза или химического осаждения.

Основные операции включают подготовку поверхности (обезжиривание, травление, активацию), собственно нанесение покрытий (цинкование, никелирование, хромирование, меднение и др.) и финишную обработку (пассивация, окрашивание).

Главным источником образования сточных вод являются операции промывки деталей после каждой стадии: вода используется для удаления уноса электролитов и технологических растворов с поверхности изделий и технологических спутников. До 90–95 % всей потребляемой воды в гальваническом производстве расходуется именно на промывные операции, при этом удельный расход колеблется в широком диапазоне - от 0,1 до 2,3 м³ на 1 м² обрабатываемой поверхности в зависимости от типа оборудования и применяемых технологий.

Сточные воды формируются также при охлаждении оборудования, промывке фильтров, мойке ванн и эксплуатации гальванических линий. По санитарно-токсикологическому показателю они относятся к высокоопасным (кадмий, свинец, молибден, блескообразующие добавки) и опасным (никель, медь, цианид- и хромат-ионы, нефтепродукты, ПАВ) веществам. Кроме исходных компонентов электролитов в стоки переходят загрязнения с поверхности изделий (окислы, жиры, масла, металлы основы) и продукты химических реакций при смешении разных потоков.

Одной из ключевых особенностей является необходимость отдельного канализования стоков. На предприятиях образуются кислотные, щелочные, циансодержащие, хромсодержащие, фторидсодержащие и другие типы сточных вод, которые, как правило, отводятся по отдельным сетям. Смешение несовместимых потоков приводит к образованию токсичных газов; большие количества карбонатов в кислотных стоках могут вызвать скопление углекислоты в колодцах и создать угрозу для персонала при ремонте. Обычно применяется как минимум три отдельные сети: хромсодержащая, циансодержащая и кислотно-щелочная; при наличии фторидов выделяют четвертую сеть.

Классификация сточных вод гальванических производств по составу представлена в таблице 1.

В составе стоков присутствуют также соединения, образующиеся при протекании реакций при смешении потоков от разных операций. Это создает дополнительные сложности: переменный состав, высокую токсичность и риск образования нерастворимых или газообразных продуктов.

Оценки количества тяжелых металлов, сбрасываемых со сточными водами гальванических производств в России, противоречивы, но свидетельствуют о серьезном загрязнении водных объектов и нерациональном использовании ресурсов (в среднем полезно используется только 2–3 % воды, 30–40 % цветных металлов).

Таблица 1 – Классификация сточных вод по составу

Характер сточных вод	Состав сточных вод
Кислотные (pH 2–6)	Образуются при кислотном травлении, активации, анодировании алюминия, снятии травильных шламов, гальванических покрытиях из кислотных электролитов (никелирование, кадмирование, цинкование, меднение и др.). Содержат катионы тяжелых металлов (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Sn^{2+}), легких металлов (Al^{3+} , Ti^{4+}), анионы (SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^-), поверхностно-активные вещества, блескообразователи, смачиватели, ингибиторы, красители.
Щелочные (pH 8–11)	Возникают при химическом и электрохимическом обезжиривании, щелочном травлении алюминия, фосфатировании, покрытиях из щелочных электролитов (цинкование, меднение, никелирование). Содержат катионы тяжелых и цветных металлов (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Al^{3+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+), анионы (SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , SiO_3^{2-}), ПАВ, масла, блескообразователи.
Цианосодержащие (pH 1,3–5)	После меднения, цинкования, кадмирования, серебрения в цианистых электролитах. Содержат свободный цианид (NaCN , реже KCN), цианидные комплексы металлов, компоненты щелочной среды и ПАВ.
Фторидсодержащие (pH 2–5)	После травления, оловянирования, покрытия сплавом олово-свинец. Содержат катионы металлов (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Sn^{2+}) и анионы (F^- , HBF_4^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}).
Хромосодержащие (pH 1,3–5)	После хромирования, хроматирования, пассивации, осветления, травления стали и медных сплавов, анодирования алюминия. Основные загрязнители – соединения шестивалентного хрома (Cr(VI)) в виде $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и др.), катионы тяжелых металлов (Cr^{3+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+}), анионы (SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^-).

Особенностью гальванического производства является образование двух основных категорий стоков: разбавленные промывные воды (основной объем) и концентрированные отработанные растворы (электролиты). Разбавленные стоки требуют больших объемов очистки, а концентрированные – локальной регенерации для извлечения ценных компонентов.

При прямом сбросе в водные объекты или централизованные системы такие стоки создают высокую антропогенную нагрузку, поскольку загрязняющие вещества (тяжелые металлы, цианиды, Cr(VI)) обладают стойкостью, биоаккумуляцией и токсичностью даже в низких концентрациях.

В гальваническом производстве загрязнение окружающей среды проявляется в поступлении в водные объекты токсичных соединений, нарушении естественных экологических систем и ухудшении качества воды.

Опасные виды загрязнения сточных вод от гальванических производств включают: высококонцентрированные отработанные растворы (отдельная канализация обязательна для предотвращения перегрузки общих очистных сооружений); смешанные стоки при аварийных сбросах или неисправностях разделительных сетей (риск выделения токсичных газов, например, HCN или Cl₂); стоки с высокой минерализацией (требуют отдельных систем транспортировки); стоки от производства печатных плат и металлизации пластмасс (дополнительные загрязнители - органические соединения).

Такая структура загрязнений обуславливает необходимость применения наилучших доступных технологий уже на стадии предотвращения образования стоков (минимизация уноса, многокаскадные промывки, водооборот) и их раздельной очистки.

1.3 Анализ существующих методов и технологий очистки сточных вод гальванических производств

Очистка сточных вод гальванического производства осуществляется с использованием химических (реагентных), электрохимических, мембранных, ионообменных и комбинированных методов. Выбор конкретного метода определяется типом стоков (кислотные, щелочные, цианосодержащие, хромсодержащие, фторидсодержащие), концентрацией загрязняющих веществ (в первую очередь ионов тяжелых металлов, цианидов и Cr(VI)), требованиями к степени очистки и возможностью возврата очищенной воды в цикл. Эффективность систем очистки зависит от правильной группировки стоков и раздельного канализования, что позволяет повысить степень извлечения ценных компонентов.

Реагентные методы остаются наиболее распространенными для первичной очистки. Они основаны на переводе ионов тяжелых металлов в малорастворимые соединения (гидроксиды, основные карбонаты или сульфиды) путем нейтрализации сточных вод щелочными реагентами: едким натром, известковым молоком ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), кальцинированной содой (Na_2CO_3) или доломитом. При нейтрализации кислых стоков известковым молоком ионы цинка, меди и других металлов осаждаются в виде основных карбонатов, которые менее растворимы, чем гидроксиды, и начинают выпадать при более низких значениях pH. Для цианосодержащих стоков применяют окисление активным хлором (хлорная известь, гипохлорит натрия) в щелочной среде (pH 10,5–12,5) с последующим гидролизом цианатов до карбонатов и аммония. Восстановление Cr(VI) до Cr(III) проводят сульфитом, бисульфитом или пиросульфитом натрия в кислой среде (pH 2–2,5). Более глубокая очистка достигается сульфидным осаждением (при строгом дозировании, чтобы избежать избытка токсичных сульфидов) или ферритизацией – сорбцией примесей на гидроксиде железа(III) с образованием ферритов, которые легко отделяются магнитной сепарацией и обладают низкой растворимостью даже в кислотах и щелочах.

Электрохимические методы включают электрокоагуляцию, электрофлотацию и электролиз. При электрокоагуляции (преимущественно для хромосодержащих стоков) в межэлектродном пространстве происходит образование ионов Fe^{2+} за счет растворения стальных анодов, которые восстанавливают Cr(VI) до Cr(III) и коагулируют гидроксиды металлов. Процесс сопровождается подщелачиванием среды и адсорбцией примесей на хлопьях гидроксидов железа. Электрофлотация использует пузырьки водорода и кислорода, выделяющиеся при электролизе воды с нерастворимыми электродами, для флотации скоагулированных частиц; эффективность повышается при добавлении флокулянтов (полиакриламид 30 мг/л). Метод электролиза эффективен для извлечения металлов (Cu, Ni, Zn,

Cd и др.) из промывных вод и обезвреживания растворов цианидов (свыше 200 мг/л) или Cr(VI) (свыше 2 г/л) на анодах из PbO₂ или магнетита.

Мембранные методы (ультрафильтрация, обратный осмос, электродиализ) позволяют возвращать до 95–98 % воды в технологический цикл и концентрировать загрязнения для последующей утилизации. Обратный осмос и ультрафильтрация основаны на селективном прохождении молекул воды через полупроницаемые мембраны под давлением (6–10 МПа для обратного осмоса, 0,1–0,5 МПа для ультрафильтрации).

Ионообменные методы применяются для селективного извлечения металлов (Zn, Cu, Ni, Cr и др.) и цианидов с высокой степенью очистки (до 0,01–0,05 мг/л). Процесс основан на обмене ионов между раствором и синтетическими смолами (сульфокатиониты КУ-2, карбоксильные КБ-4, сильноосновные аниониты АВ-17). Очистку проводят в последовательных катионитовых и анионитовых фильтрах (параллельно- или противоточных), регенерацию – растворами кислот (2–8 %) или щелочей (2–6 %). Позволяет возвращать 90–95 % воды и утилизировать металлы из элюатов.

Комбинированные схемы объединяют несколько методов для достижения максимальной эффективности и извлечения металлов (до 99,5–99,9 %). Примером является двухступенчатая электрофлотация (реагентная предварительная обработка + электрофлотация) или реагентная нейтрализация с последующей мембранной доочисткой.

Сравнительный анализ основных методов очистки сточных вод гальванического производства представлен в таблице 2.

Из таблицы видно, что существующие технологии позволяют не только обезвреживать высокотоксичные стоки, но и извлекать ценные металлы, минимизировать объемы шлама и организовывать водооборот, что соответствует требованиям наилучших доступных технологий и снижает антропогенную нагрузку на водные объекты.

Таблица 2 – Сравнительный анализ основных методов очистки сточных вод гальванического производства

Метод	Степень очистки по металлам, %	Преимущества	Недостатки	Относительная стоимость	Область применения
Реагентный	90–98	Простота, низкие капитальные затраты	Большой объем шлама (5–10 кг/м ³), вторичное загрязнение	Низкая (начальная)	Основная очистка
Электрокоагуляция	98–99,9	Минимальный расход реагентов, компактность	Потребление электро-энергии	Средняя	Средние и крупные цеха
Электрофлотация	93–99,8	Низкая влажность шлама (92–95 %)	Требуется предварительная коагуляция	Средняя	Доочистка и обезвреживание
Ионообменный	95–99,5	Селективное извлечение металлов	Дорогостоящая регенерация смол	Высокая	Доочистка и регенерация
Мембранный (обратный осмос)	98–99,5	Возврат 95–98 % воды в цикл	Загрязнение мембран, высокое давление	Высокая	Замкнутый водооборот
Комбинированный	99,5–99,9	Максимальная эффективность и извлечение металлов	Сложность управления	Средняя–высокая	Современные предприятия

Таким образом, нормативно-правовая база предъявляет жесткие требования к гальваническим производствам: обязательное раздельное канализование стоков, соблюдение ПДК (СанПиН 1.2.3685-21), расчет нормативов допустимых сбросов (Приказ № 1118) и применение наилучших доступных технологий (ИТС 36-2024). Это делает переход на НДТ не рекомендацией, а законодательно закрепленной необходимостью.

Выбор оптимальной технологии очистки сточных вод должен осуществляться индивидуально с учетом конкретного состава стоков, требуемой степени очистки, экономической целесообразности и возможности рекуперации ценных компонентов. Внедрение замкнутых водооборотных систем на основе НДТ позволяет минимизировать сброс токсичных веществ, снизить водопотребление и извлекать тяжелые металлы для повторного использования.

2 Анализ системы очистки сточных вод при нанесении гальванических покрытий

На основе рассмотренных теоретических аспектов нормативно-правового регулирования, особенностей формирования загрязнений и сравнительной эффективности существующих методов очистки сточных вод гальванического производства необходимо провести анализ реально действующей системы очистки на конкретном промышленном объекте.

2.1 Характеристика предприятия

В качестве объекта исследования в выпускной квалификационной работе выбрано предприятие, расположенное на одной производственной площадке в г. Пензе. Основным видом производственной деятельности является производство малогабаритной арматуры с серийным характером производства.

На территории предприятия расположены: производственные цеха, ремонтно-механический участок, транспортный участок, гальванический участок, склады металла, штамповок, литья и заготовок, склад ГСМ, административный корпус, столовая, очистные сооружения ливневых стоков.

Производственный цикл является полным и охватывает литейный передел, термическую и кузнечнопрессовую обработку, сварочные операции, механообработку, изготовление деталей из полимерных материалов, гальваническое нанесение покрытий и деревообработку.

В соответствии с санитарной классификацией объект отнесен к IV классу опасности с нормативной санитарно-защитной зоной (СЗЗ) в 100 метров, однако фактически установленные размеры СЗЗ по ряду направлений существенно сокращены, что ужесточает требования к экологическому контролю и безопасности производственных процессов.

Карта-схема предприятия представлена в приложении А.

2.2 Характеристика водопользования и водоотведения на предприятие

2.2.1 Характеристика водопользования

Водоснабжение предприятия осуществляется из городского водопровода и артезианской скважины

Нормативное водопотребление составляет 547,902 м³/сут., 151,929 тыс. м³/год в том числе:

а) из поверхностных водных объектов артезианская скважина) на собственные нужды 133,816 м³/сут., 34,549 тыс. м³/год из них: на хозяйственно-бытовые нужды 24,0 м³/сут., 2,40 тыс. м³/год; на производственные нужды 109,816 м³/сут., 32,149 тыс. м³/год.

б) из городского водопровода 414,086 м³/сут., 117,38 тыс. м³/год из них: на собственные нужды 394,786 м³/сут., 111,601 тыс. м³/год в том числе: на хозяйственно-бытовые нужды 46,88 м³/сут., 11,768 тыс. м³/год; на производственные нужды 347,906 м³/сут., 99,833 тыс. м³/год; передано воды вторичным водопотребителям на хозяйственно- бытовые нужды 19,30 м³/сут., 5,779 тыс. м³/год. Обратное водоснабжение составляет 1214,40 м³/сут (355,675 тыс. м³/год).

Предприятие использует воду из городского водопровода, при этом основная масса воды направляется на производственные нужды, а доля оборотного водоснабжения (1214,4 м³/сут) более чем вдвое превышает объем забора свежей воды, что свидетельствует о наличии замкнутого цикла для части технологических процессов.

Характеристика водопотребления представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристика водопотребления предприятия

Наименование показателей	Нормативно-расчетное водопотребление	
	м ³ /сут	тыс. м ³ /год
1	2	3
Забор воды всего	547,902	151,929
в том числе:		
– из артезианской скважины	133,816	34,549

Продолжение таблицы 3

1	2	3
– из городского водопровода	414,086	117,380
Использование воды на собственные нужды	528,602	150,150
<i>в том числе:</i>		
а) на хозяйственно-бытовые нужды	70,88	17,168
– из них подземных вод	24,0	2,40
б) на производственные нужды	457,722	132,982
– из них подземных вод	109,816	32,149
Передано воды другим предприятиям (арендаторам)	19,30	5,779
Расход воды в системах оборотного водоснабжения	1214,40	355,675
Расход воды в системах повторного (последовательного) водоснабжения	–	–

Анализ водопользования представлена на рисунках 1-2.



Рисунок 1 – Структура водопотребления предприятия

Из рисунка видно, что основная часть воды (77%) поступает из городского водопровода, а 23% из артезианской скважины.

Анализ направлений использования воды показывает, что 85% воды расходуется на производственные нужды, 11% – на хозяйственно-бытовые нужды и 4% передается сторонним потребителям.

В гальваническом производстве вода расходуется на технические нужды, приготовление технических растворов, промывка деталей, охлаждение, мойка оборудования и машин; хозяйственно-бытовые нужды; хозяйственно-питьевые нужды, душевые, противопожарные нужды.

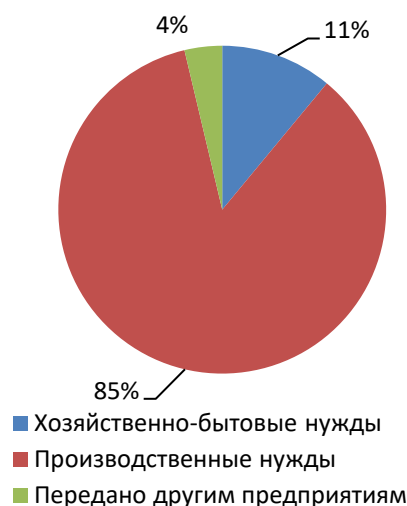


Рисунок 2 – Направления водопользования

Основные потребители воды на технологические нужды разделены в соответствии с общепринятой классификацией операций покрытий: техническая вода I категории, техническая вода II категории; вода специального назначения: особо чистая, ультрачистая.

В гальваническом производстве рекомендуется активно внедрять системы многократного использования воды, позволяющие осуществлять регенерацию воды и рекуперацию ценных компонентов.

2.2.2 Характеристика водоотведения

Предприятие осуществляет сброс производственных, хозяйственно-бытовых и поверхностных сточных вод.

Нормативное водоотведение – 332,264 м³/сут (93,516 тыс. м³/год), включая сброс хозяйственно-бытовых стоков 66,18 м³/сут (17,547 тыс. м³/год, из них принятых от арендаторов 19,30 м³/сут, 5,779 тыс. м³/год) и производственных стоков 266,084 м³/сут (75,969 тыс. м³/год) в городской коллектор.

Характеристика водоотведения предприятия представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристика водоотведения предприятия

Наименование показателей	Объемы водоотведения		
	м³/час	м³/сут	тыс.м³/год
Сброс в водный объект	198,0	136,5	6,711
Сброс в городскую канализацию – всего	–	332,264	93,516
<i>в том числе:</i>			
– хозяйственно-бытовые стоки (собственные + от арендаторов)	–	66,18	17,547
из них принято от арендаторов	–	19,30	5,779
– производственные стоки (после станции нейтрализации)	–	266,084	75,969
Количество сбрасываемых стоков в канализацию города	–	322,82	93,196
Способы очистки сточных вод и проектная производительность очистных сооружений	Загрязненные воды от участка гальваники поступают на станцию нейтрализации, после очистки отводятся в горколлектор		
Условия обработки и утилизации осадков сточных вод из очистных сооружений	Шлам со станции нейтрализации передается на утилизацию		

Характеристика водоотведения предприятия представлена на рисунках 3–4.



Рисунок 3 – Характеристика водоотведения

Из рисунков видно, что 93% сточных вод отводится в систему городской канализации, в то время как сброс в водные объекты составляет 7%. В структуре стоков преобладают производственные сточные воды (81%), доля хозяйственно-бытовых стоков составляет 19%.



Рисунок 4 – Характеристика сточных вод

Вода, расходуется на производственные нужды, такие как: охлаждение термопластавтоматов, охлаждение выпрямителей, скруббер, охлаждение сварочного аппарата, закалочная ванна, приготовление эмульсии для охлаждения режущего инструмента металлорежущих станков, котельная, охлаждение машин литья под давлением (подпитка 10%), охлаждение индукционных печей (подпитка 10%), охлаждение маслоагрегатов (подпитка 8%), испытательные стенды (подпитка 5%, 5%, 5%), охлаждение установки ТВЧ (подпитка 8%), охлаждение компрессора (подпитка 5%), заправка автомашин и также арендаторы.

Хозяйственно-бытовые сточные воды от цехов: административно-хозяйственного персонала, душевых сеток, от мытья полов, столовой и кафе «Светлячок» сбрасываются в хозяйственно-бытовую систему канализации промышленного предприятия и далее производится сброс в городской коллектор.

Вода, загрязненная в процессе от литейного цеха, механосборочного цеха (№ 2, № 3, № 4), ремонтно-энергетического отдела, инструментального хозяйства, транспортно-складского хозяйства, строительного цеха – без очистки поступает по внутривозвращающей сети канализации промышленного предприятия на городские очистные сооружения.

Воды от травления цветных металлов, никелирования, цинкования, фосфотирования, электрохимического полирования, хромирования, химического оксидирования, меднения, сернокислого лужения поступает на станцию нейтрализации, а затем в городской коллектор.

На станцию нейтрализации вода поступает с участка гальваники (цех №2). Среди технологических сточных вод, содержащих вредные загрязнения, сточные воды травильных и гальванических отделений занимает особое место в связи с тем, что в них содержатся растворенные неорганические соединения хрома, цинка, меди, являющиеся высокотоксичными.

По содержанию загрязнений сточные воды делятся на:

- щелочные – от обезжиривания изделий, травления и других операций;
- кислотные – от предварительного травления изделий, кислого меднения, никелирования, кислого цинкования и других операций;
- аммиакальные – от процессов цинкования, никелирования, травления;
- содержащие ПАВ – после различных операций с использованием ПАВ или снятие остатков смазочных материалов.

По режиму сброса и концентрации сточных вод все сточные воды делятся на две группы:

I группа – постоянно поступающие промышленные сточные воды, образующиеся при промывке изделий в проточных ваннах после обработки их в основных;

II группа – отработанные концентрированные растворы, отбрасываемые периодически из основных ванн.

Промывные сточные воды, образующиеся в результате промывки деталей после основных, вспомогательных и отделочных операций. Состав и концентрация загрязнений в промывочных ваннах изменяются в широком диапазоне.

Периодичность сброса отработанных растворов определяется требованиями технологии нанесения покрытий, некоторые технологические растворы заменяют на свежие ежедневно, другие через несколько дней, месяцев.

Отработанные концентрированные растворы содержат большое количество взвешенных веществ, ионы тяжелых металлов, органические загрязнения. Колебания концентраций основных загрязнений в отработанных растворах будут находиться в пределах, установленных для применяемых составов электролитов.

Хозяйственно-бытовые стоки сбрасываются в городской коллектор без очистки. Производственные стоки после станции нейтрализации, пройдя очистку электрокоагуляционным методом на локальных очистных сооружениях, отводятся в городской коллектор.

Характеристика состава воды в поверхностном водоеме представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристика вод, используемых для сброса сточных вод

Наименование показателей	Фоновые показатели, мг/л		ПДК веществ мг/л
	В створе выше выпуска сточных вод	Ниже выпуска сточных вод в расчетном створе	
БПК _{полн}	4,1	4,1	3,0
Взвешенные вещества	12,0	11,5	+0,15 к фону
Азот аммонийный	0,5	0,75	0,5
Сульфаты	14,4	21,0	100
Хлориды	56,0	68,5	300
Медь	0,05	0,05	0,001
Цинк	Нет	Нет	0,008
Никель	Нет	Нет	0,001
Хром общ.	Нет	Нет	0,0015
Железо общее	0,20	0,35	0,007

Приведенные данные показывают, что в створе выше выпуска сточных вод уже наблюдается превышение предельно-допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения по БПК₅ (4,1 мг/л при ПДК 3,0 мг/л), меди (0,05 мг/л при ПДК 0,001 мг/л) и железу общему (0,20 мг/л при

ПДК 0,007 мг/л). После выпуска сточных вод ниже по течению концентрации аммонийного азота возрастают с 0,5 до 0,75 мг/л, что превышает ПДК в 1,5 раза, а содержание железа увеличивается до 0,35 мг/л, превышая норматив уже в 50 раз.

При этом концентрации цинка, никеля и хрома остаются ниже предела обнаружения как выше, так и ниже выпуска. Таким образом, водный объект уже до сброса имеет значительное фоновое загрязнение медью, железом и органическими веществами, а сброс сточных вод предприятия дополнительно ухудшает качество воды по аммонийному азоту, сульфатам, хлоридам и железу.

Наиболее критическими загрязнителями, требующими особого контроля, являются медь (превышение ПДК в десятки раз) и железо, а также аммонийный азот. Даже при соблюдении нормативов сброса самих сточных вод качество воды в приемнике не соответствует рыбохозяйственным ПДК, что может потребовать разработки более жестких природоохранных мероприятий или пересмотра категории водопользования.

Приемником производственных сточных вод является ручей Прокоп, впадающий в пойменное болото и далее в р. Суру, правый приток Волги. Согласно представленным данным, концентрации загрязняющих веществ в сточных водах на выпуске в ручей Прокоп не превышают ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения ни по одному контролируемому показателю, за исключением БПК₅.

Средние концентрации загрязняющих веществ, поступающих в водный объект со сточными водами за 2022-2024 гг. представлены в таблице 6.

Анализ данных таблицы показывает, что качество сточных вод, сбрасываемых в водный объект, нестабильно и по ряду показателей не соответствует нормативам для водоемов рыбохозяйственного назначения. В течение всего рассматриваемого периода наблюдается устойчивое превышение ПДК по азоту аммонийному (в 1,8–2,6 раза) и по железу (в 1,9–4,5 раза).

Таблица 6 – Средние концентрации загрязняющих веществ поступающих в водный объект со сточными водами за период 2022-2024 гг.

Наименование загрязняющего вещества	Концентрации загрязняющего вещества, мг/л			
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	ПДК
Взвешенные вещества	2,5	10,6	5	10,0 / +0,25 к фону
Сухой остаток	226	175	145,5	1000
БПК _{полн.}	2,4	2,03	3,9	2,0
Хлориды	15,1	8,2	13,4	300
Сульфаты	31,3	7,1	2	100
Азот аммонийный	0,92	1,3	0,95	0,5
Железо	0,32	0,45	0,19	0,1
Медь	0,001	0,09	0,009	0,001
Свинец	–	0,0035	0,001	0,006
Цинк	0,01	0,235	0,015	0,01
Натрий	–	8,0	11,5	120

Наибольшую опасность представляет 2023 год, когда зафиксированы критические превышения: по меди – в 90 раз (0,09 мг/л при ПДК 0,001 мг/л), по цинку – в 23,5 раза (0,235 мг/л при ПДК 0,01 мг/л). В 2024 году концентрации большинства тяжелых металлов снизились (медь – до 0,009 мг/л, цинк – до 0,015 мг/л), однако по меди и цинку сохраняется незначительное превышение (в 9 и 1,5 раза соответственно), а концентрация железа (0,19 мг/л) по-прежнему почти вдвое выше нормы. Показатель БПК₅ в 2022 и 2024 гг. превышает ПДК (2,0 мг/л) в 1,2–1,95 раза, что указывает на поступление органических загрязнений. Вместе с тем концентрации взвешенных веществ, сухого остатка, хлоридов, сульфатов, свинца и натрия находятся в пределах установленных нормативов.

2.3 Анализ технологического процесса нанесения гальванических покрытий с точки зрения образования сточных вод

Технологический цикл гальванического участка представляет собой многостадийную последовательность операций, каждая из которых сопровождается формированием специфических жидких отходов. Характер

операций, применяемые реагенты и режимы промывок определяют состав, концентрацию и степень опасности образующихся сточных вод.

Химические материалы, используемые в производстве (годовое потребление): никель сернокислый – 0,59 т; медь сернокислая – 0,67 т; цинк сернокислый – 0,66 т; кислота серная – 0,862 т; натрия гидроокись – 0,79 т; кислота уксусная – 0,283 т; натрия гипофосфит – 0,325 т; кислота азотная – 1,355 т.

Участок выполняет обезжиривание, травление, хромирование, меднение, цинкование и химическое никелирование. Ниже рассмотрено, какие сточные воды генерирует каждая стадия.

Обезжиривание (образование щелочных стоков)

Поверхность деталей загрязнена маслами, консервационными смазками и механическими частицами. Их удаление проводят в щелочных растворах, содержащих: едкий натр (10–50 г/л) для омыления жиров, кальцинированную соду (20–30 г/л), фосфаты (10–50 г/л) и до 4 г/л ПАВ-эмульгаторов.

Сточные воды после обезжиривания (образуются при промывке деталей): высокий pH (8–11); эмульгированные жиры и масла; фосфаты, силикаты, поверхностно-активные вещества; повышенное ХПК за счет органики.

Отработанные обезжиривающие растворы сливаются периодически (концентрированная смесь загрязнителей). Промывные воды образуются непрерывно, имеют невысокие концентрации, но большой объем, требующий очистки.

Травление (образование кислотных и фторидсодержащих стоков)

Для удаления окалины и оксидных пленок применяют кислотные растворы:

- черные металлы травят в смеси серной и соляной кислот (до 200 г/л);
- высоколегированные стали – с добавлением азотной и фтористоводородной кислот;
- медь и ее сплавы – азотной кислотой;

– алюминий – фосфорной, фтористоводородной или кремнефтористой.

Вводятся ингибиторы для защиты основного металла.

Сточные воды после травления (pH 2–6): катионы металлов, перешедших в раствор (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Al^{3+} и др.); анионы используемых кислот (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^-); ингибиторы и продукты их разложения.

Особо опасны фторидсодержащие стоки (травление алюминия и легированных сталей) – содержат токсичные фторид-ионы и требуют отдельной обработки. Отработанные травильные растворы – высококонцентрированные, сбрасываются периодически; промывные воды – непрерывный поток разбавленных кислых стоков.

Цинкование (кислые сульфатные электролиты)

Электролит: сернокислый цинк (до 300 г/л), сернокислый натрий (до 100 г/л), сернокислый аммоний (до 50 г/л), декстрин (до 10 г/л).

Сточные воды: промывные стоки содержат Zn^{2+} , сульфаты, аммонийный азот, декстрин. Слабокислая реакция. Ионы цинка токсичны, требуют реагентного осаждения.

Никелирование (сульфатные электролиты с органическими добавками)

Электролит: сернокислый никель (до 350 г/л), хлористый никель (до 60 г/л), борная кислота (до 40 г/л), блескообразующие (сахарин, фталимид, 1,4-бутиндиол, формалин), антипиттинговые добавки (лаурилсульфат натрия).

Сточные воды: Ni^{2+} , сульфаты, хлориды, борная кислота, стойкие органические компоненты. Ni^{2+} высокотоксичен и канцерогенен. Трудноокисляемые органические добавки усложняют очистку, требуя комбинированных методов.

Хромирование (электролит с шестивалентным хромом)

Электролит: хромовый ангидрид (150–400 г/л), серная кислота (1,5–4 г/л), процесс при 60 °С, добавки (хромин, хромоксан и др.).

Сточные воды: главная опасность – Cr^{6+} (хроматы, дихроматы) – чрезвычайно токсичен, канцерогенен. Промывные воды содержат Cr^{6+} , Cr^{3+} ,

сульфаты. Обязательно восстановление Cr^{6+} до Cr^{3+} перед нейтрализацией. Отработанные электролиты – концентрированный источник хрома.

Меднение (кислые электролиты)

Электролит: сульфат меди (до 250 г/л), серная кислота (до 80 г/л), хлористый натрий (до 60 г/л), блескообразующие добавки (до 10 г/л).

Сточные воды: Cu^{2+} , избыточная кислота, хлориды, органические добавки. Медь токсична для водной биоты, склонна к биоаккумуляции. Отработанные растворы требуют рекуперации меди.

Химическое никелирование (фосфорсодержащие стоки)

В составе раствора – гипофосфит натрия (0,325 т/год).

Сточные воды: богаты фосфорсодержащими соединениями (фосфиты, фосфаты), отличаются повышенной минерализацией.

Общая характеристика потоков сточных вод

В корпусе гальванопокрытий установлены 29 технологических ванн и 41 ванна промывки (общий объем 500 л). Конфигурация оборудования формирует два принципиально различающихся потока:

1. Постоянно образующиеся промывные воды – до 90–95 % объема. Концентрации загрязнений относительно невелики, но состав разнообразен: Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{6+} , Cr^{3+} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^- , фосфаты, ПАВ, органические добавки.

2. Периодически сбрасываемые отработанные технологические растворы (электролиты, обезжиривающие, травильные растворы) – 5–7 % объема, но концентрации в десятки и сотни раз выше; их вклад в общую загрязненность – определяющий.

Экологическая классификация сточных вод участка

– кислотно-щелочные (обезжиривание, травление, кислые электролиты) – тяжелые металлы, масла, ПАВ, фосфаты;

– хромсодержащие (хромирование, пассивация) – обязательно присутствие Cr^{6+} ;

– фторидсодержащие (травление алюминия, легированных сталей) – токсичные фториды;

– фосфорсодержащие (химическое никелирование) – фосфиты и фосфаты.

Циансодержащие стоки отсутствуют, так как цианистые электролиты не применяются.

Технологический процесс гальванического участка предопределяет образование многокомпонентных токсичных сточных вод, требующих строгого раздельного канализования и локальной очистки с учетом специфики каждой группы загрязнителей. Высокие концентрации тяжелых металлов и присутствие стойких органических веществ делают необходимым применение комбинированных методов обезвреживания – реагентного осаждения, электрокоагуляции, восстановления Cr^{6+} и доочистки.

Блок-схема технологического процесса нанесения гальванических покрытий представлена в приложении А.

2.4 Анализ эффективности очистки сточных вод

Очистные сооружения, предназначенные для обезвреживания химически загрязненных стоков гальванического участка, спроектированы по аналогии с комплексами, эксплуатировавшимися на Гатчинском механическом заводе и казанском предприятии «Сантехприбор». В основе технологического процесса лежит метод электрокоагуляции; расчетная пропускная способность линии составляет 205,5 м³/сут. Обязательным условием согласования проекта стало применение на гальваническом участке ступенчатых противоточных ванн промывки деталей.

Поток сточных вод от гальванического производства самотеком направляется в приемный усреднитель, изготовленный из нержавеющей стали. Геометрические параметры емкости: диаметр – 3 м, высота – 2 м, полезный объем – 14 м³. Из усреднителя стоки забираются насосом марки

1,5Х-6Л-1 (производительность 12 м³/ч, напор 14 м) и подаются по напорному трубопроводу из нержавеющей стали Х18М10Т (диаметр 95×10 мм) непосредственно в электрокоагулятор. Последний выполнен из нержавеющей стали и имеет габариты 3700×1000×100 мм.

Электрокоагуляционная установка дает возможность получить высокую степень очистки сточных вод, перед сбросом их в канализацию, от хрома, никеля, железа, меди, цинка.

Электрокоагуляционная установка предназначена для очистки промышленных стоков от соединений хрома, никеля, железа, кадмия, цинка, а также от взвешенных веществ. Производительность установки 12,8 м³/час.

Установка обеспечивает: осаждение тяжелых металлов в виде гидроокислов; выделение в осадок в виде коллоидных частиц взвешенных веществ; нейтрализацию кисло- щелочных промышленных стоков; полное восстановление шестивалентного хрома в трехвалентный. Концентрация загрязнений, обрабатываемых установкой следующая: хром шестивалентный до 80 мг/л; катионы никеля, железа, меди, цинка до 50 мг/л; нефтепродукты до 500 мг/л; взвешенные вещества до 500 мг/л.

Конструктивно электрокоагулятор состоит из двух секций: вертикального пластинчатого электролизера с нижним подводом жидкости и последующим движением вверх, а также осветлителя. Ключевые технические характеристики оборудования:

Характеристика оборудования электрокоагулятора: активная поверхность пластин электрокоагулятора (пяти батарей) – 1744 дм² (18 м²); максимальная сила постоянного тока – 3200 А; рабочее напряжение – 12 В; плотность тока – 2,2-2,5 А/дм²; число батарей электрокоагулятора – 10 шт.; удельный расход электроэнергии 1,2 кВт·ч/м³ стоков; источник постоянного тока - выпрямитель типа ВАКГ – 3200 А, 6/12 – 4 шт.; емкость электрокоагулятора – 3,7 м³; емкость усреднителя – 14 м³; емкость отстойников – 50 м³ №1, №2, №3 в том числе: для чистых отстоенных вод –

40 м³, емкость для ила – 10 м³, емкость для осадков – 25 м³; насосы 1,5 Х26Л-2 производительностью 12 м³/час – 2 шт.

После выхода из электрокоагулятора очищенная вода самотеком движется через промежуточный отстойник объемом 5 м³ (размером 2000×1700 мм, глубина 1500 мм), откуда перетекает в один из основных отстойников (50 м³, диаметр 5,8 м, высота 2 м), где отстаивается 2–3 часа. Осветленная вода после лабораторного контроля, подтверждающего соблюдение допустимых концентраций, направляется во внеплощадочную заводскую канализацию и далее на городские очистные сооружения. Накапливающийся осадок через донный патрубок периодически спускается в специальный накопитель (объем 25 м³, выполнен из стали, диаметр 4,3 м, высота 2 м) и вывозится ассенизационной техникой. Осадок из отстойников по мере накопления через трубопровод в нижней части, отводится в отстойник для осадка, объемом 25 м³, выполненный из стали Д-4,3 м, высотой 2 м. Осадок из отстойника вывозится ассенизационной машиной.

Анализ эффективности очистки сточных вод представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Эффективность очистки сточных вод

Наименование веществ	Вход, мг/л	Выход, мг/л	ПДК, мг/л	Эффективность, %
pH	7,0	8,5	6,5–8,5	–
Cr ⁶⁺	70,0	Нет	0,0015	100%
Ni	0,42	Нет	0,001	100%
Zn	2,0	0,023	0,008	98%
Cu	4,5	0,028	0,001	99%
Fe общ.	21	1,1	0,007	95%

Технология очистки сточных вод, реализуемая на предприятии эффективно осаждают тяжелые металлы, но не обеспечивает соблюдение нормативов ПДК для сброса в водоем рыбохозяйственного назначения. Полученные концентрации цинка, меди и особенно железа значительно превышают допустимые значения.

Анализ системы водопользования, водоотведения и очистки сточных вод на предприятии, осуществляющем гальваническое нанесение покрытий

показал, что производство характеризуется высокой водоемкостью и образует многокомпонентные токсичные сточные воды, содержащие ионы тяжелых металлов (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$), сульфаты, хлориды, нитраты, фториды, фосфаты, ПАВ и органические добавки.

Очистка стоков гальванического участка реализована методом электрокоагуляции (производительность установки 12,8 м³/ч). Анализ показал, что электрокоагулятор обеспечивает высокую степень удаления тяжелых металлов: Cr^{6+} и Ni – 100 %, Cu – 99 %, Zn – 98 %, Fe – 95 %. Однако остаточные концентрации существенно превышают предельно допустимые для водоемов рыбохозяйственного назначения: цинк – 0,023 мг/л (ПДК 0,008), медь – 0,028 мг/л (ПДК 0,001), железо – 1,1 мг/л (ПДК 0,007). Кроме того, за период 2022–2024 гг. зафиксированы устойчивые превышения по аммонийному азоту (в 1,8–2,6 раза) и железу (в 1,9–4,5 раза).

На основе анализа сформулированы ключевые недостатки действующей системы:

1. Недостаточная эффективность очистки – электрокоагуляция не справляется с нормированием аммонийного азота, железа, а в отдельные годы – меди и цинка.

2. Высокое водопотребление и нерациональное использование воды – доминирует прямоточная промывка деталей, отсутствуют ступенчатые каскадные ванны и системы улавливания электролитов, что приводит к значительному уносу ценных компонентов и образованию большого объема разбавленных токсичных стоков.

3. Проблема обращения с гальваношламом

4. Несоответствие требованиям наилучших доступных технологий (НДТ) – существующая схема не в полной мере соответствует положениям ИТС 36-2024 «Обработка поверхностей электрохимическими методами», который ориентирует предприятия на внедрение малоотходных, ресурсосберегающих и замкнутых технологий (многократное использование промывных вод, рекуперация металлов, мембранная доочистка) [14].

3 Разработка мероприятий по повышению эффективности очистки сточных вод гальванического производства с учетом требований наилучших доступных технологий

В основе разработки мероприятий по повышению эффективности очистки сточных вод гальванического производства лежат требования актуализированного информационно-технического справочника ИТС 36-2024 «Обработка поверхностей электрохимическими методами» [14].

3.1 Анализ проблем существующей системы водоотведения и очистки сточных вод

Проведенный анализ системы водопользования и очистки сточных вод гальванического участка предприятия позволил выявить ряд ключевых проблемных аспектов.

Недостаточная эффективность существующей технологии очистки. Анализ эффективности электрокоагуляционной установки показал, что при высоком уровне удаления тяжелых металлов она не обеспечивает стабильное нормирование загрязняющих веществ. Фиксируются многократные превышения ПДК по меди и цинку, а также устойчивое превышение по азоту аммонийному и железу.

Высокое водопотребление и нерациональное использование воды. На предприятии доминирует прямоточная система водоснабжения. Полезно используется лишь 2–3 % воды, остальной объем превращается в загрязненные сточные воды, что противоречит принципам НДТ, закрепленным, в том числе, ИТС 36-2024. Использование одноступенчатой прямоточной промывки деталей и недостаточное внедрение ванн улавливания приводят к высокому уносу дорогостоящих электролитов и значительному объему разбавленных высокотоксичных сточных вод.

Проблема обращения с гальваношламом. Образующийся на станции нейтрализации гальваношлам в количестве 5,84 т/год относится к III классу опасности. В настоящее время шлам передается на утилизацию сторонней организации, а его предварительная обработка (обезвоживание) производится недостаточно эффективно. Высокая влажность осадка увеличивает его объем и транспортные расходы на вывоз. Расчет шлама с гальванопроизводства производится в соответствии со СНиП 2.04.03-85 [16].

Количество влажного осадка, образующегося при нейтрализации сточных вод, рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{100 \times M}{100 - W}, \quad (1)$$

где M – масса сухого вещества, кг;

W – влажность осадка, %.

Количество влажного железосодержащего шлама рассчитывается по формуле:

$$B_{Fe} = \frac{100 \times M_{Fe}}{100 - W}, \quad (2)$$

где M_{Fe} – масса сухого гидроксида железа, кг;

W – влажность осадка, %.

Количество влажного осадка от других загрязнений рассчитывается по формуле:

$$B_{Дз} = \frac{100 \times C_{уд} \times Q}{100 - W}, \quad (3)$$

где $C_{уд}$ – удельное количество шлама на 1 м^3 стоков, кг/м^3 ;

Q – годовой объем сточных вод, $\frac{\text{м}^3}{\text{год}}$;

W – влажность осадка, %.

Общее количество влажного осадка считается по формуле:

$$B_{\text{Общ}} = B_{Fe} + B_{Дз}, \quad (4)$$

где B_{Fe} – количество влажного железосодержащего шлама, т;

$B_{Дз}$ – количество влажного осадка от других загрязнений, т.

По формуле (2) количество влажного железосодержащего шлама равно:

$$B_{Fe} = \frac{100 \times 770}{100 - 80} = 3,85 \text{ т}$$

По формуле (3) количество осадка от других загрязнений равно:

$$B_{Дз} = \frac{100 \times 0,0318 \times 12,550}{100 - 80} = 1,99 \text{ т}$$

По формуле (4) общее количество влажного осадка равно:

$$B_{Общ} = 3,85 + 1,99 = 5,84 \text{ т}$$

Сначала шлам собирается в уплотнителе осадка $V = 3,3 \text{ м}^3$, вместимостью 4,6 т. Затем осушивается вакуум-фильтром и собирается в 4 контейнера объемом по $0,85 \text{ м}^3$, общей вместимостью 4,56 т. По договору гальваношлам вывозится на утилизацию.

Несоответствие требованиям НДТ. Существующая технологическая схема не в полной мере соответствует положениям НДТ. Основываясь на положениях ИТС [14], существующая схема нуждается в модернизации для соответствия наилучшими доступными технологиями по данному направлению.

3.2 Обоснование и выбор перспективных технологических решений в контексте НДТ

Анализ проблем и выбор перспективных решений для системы очистки сточных вод гальванического участка представлен в таблице 8.

На основе ИТС 36-2024 для проектируемой системы обоснован следующий многоступенчатый подход: 1) предварительная очистка исходного стока (усреднение + каскадная промывка + электрокоагуляция); 2) глубокая мембранная доочистка с извлечением тяжелых металлов; 3) обработка концентрата и обращение с гальваношламом [14].

Таблица 8 – Анализ проблем и выбор мероприятия

Выявленная проблема	Ссылка на пункты НДТ (ИТС 36-2024)	Обоснованное технологическое решение	Ожидаемый эффект
1. Недостаточная эффективность очистки	Раздел 6 «НДТ»; п. 6.2 «Очистка сточных вод»; подраздел 6.2.3 «Электрохимические методы»	Модернизация узла предварительной очистки: напорный электрокоагулятор с реверсированием полярности; применение титансодержащих коагулянтов	Стабилизация качества очистки; снижение превышений ПДК до нормативных значений
2. Высокое водопотребление	Раздел 4 «Ресурсопотребление и образование отходов»; п. 4.1 «Водопотребление»; подраздел 4.1.2 «Маловодные технологии промывки»	Оптимизация промывки: каскадные противоточные ванны (2–3 ступени); ванны улавливания	Снижение расхода воды в 3–5 раз; уменьшение уноса электролитов
3. Недостаточная глубина очистки от растворенных примесей	Раздел 6 «НДТ»; п. 6.2.5 «Мембранные методы обработки воды»	Внедрение мембранной доочистки: двухступенчатая схема (ультрафильтрация → обратный осмос)	Качество пермеата – ультрачистая вода; возврат 95–98% воды в производство
4. Проблема обращения с гальваношламом	Раздел 6; п. 6.3 «Обработка и утилизация гальваношламов»; подраздел 6.3.2 «Механическое обезвоживание»	Обезвоживание на камерном фильтр-прессе	Снижение влажности до 70–75%; сокращение объема шлама в 5–10 раз
5. Отсутствие селективного извлечения ценных компонентов	Раздел 6; п. 6.2.4 «Ионообменные методы»	Ионообменная обработка: селективные смолы для извлечения тяжелых металлов	Возврат воды в оборот; извлечение ценных металлов для переработки
6. Несоответствие требованиям НДТ (ИТС 36-2024)	Раздел 1 «Область применения»; весь раздел 6 (перечень НДТ)	Комплексная модернизация: каскадная промывка + электрокоагуляция + УФ/ОО + ионообмен + камерный фильтр-пресс	Переход к замкнутой системе водооборота; соответствие актуальным требованиям ИТС 36-2024

Предлагается внедрение модернизированного напорного электрокоагулятора с автоматической системой реверсирования полярности электродов для устранения их пассивации. Применение стальных анодов с

использованием титансодержащих коагулянтов повышает эффективность на стадии осаждения гидроксидов металлов и обеспечивает более глубокое извлечение ионов меди, никеля, цинка и хрома.

Для полного извлечения ионов тяжелых металлов после электрокоагуляции и отстаивания, предлагается система мембранной фильтрации. Оптимальной является двухступенчатая схема: ультрафильтрация (для удаления коллоидных частиц и взвешенных веществ) с последующей обратным осмосом, позволяющей получить воду высокого качества и возвращать до 95-98 % воды в производственный цикл [17].

Внедрение систем многократного противоточного использования промывных вод и замкнутых циклов регенерации электролитов (для никелирования, меднения, хромирования). Для обработки концентрированных отработанных растворов может использоваться метод ионообмена, позволяющий селективно извлекать и утилизировать ценные примеси (медь, никель, цинк) и возвращать очищенную воду в оборот.

Для гальваношлама III класса опасности, образующегося в количестве 5,84 т/год, необходимо внедрение эффективного оборудования для механического обезвоживания – камерного фильтр-пресса. Обезвоженный шлам с влажностью 70-75% значительно сокращает объем отходов, подлежащих утилизации, и снижает затраты на их вывоз.

3.3 Разработка предлагаемых мероприятий по повышению эффективности очистки сточных вод

На основе анализа и обоснования выбора технологий в рамках НДТ разработан комплекс конкретных мероприятий для реконструкции системы очистки сточных вод гальванического участка.

Для внедрения системы глубокой доочистки и замкнутого водооборота необходимо произвести расчеты двухступенчатой мембранной установки ультрафильтрации.

Объем производственных сточных вод за сутки ($Q_{сут}$) равен 266,084 м³/сут. Часовой расход ($Q_ч$), рассчитывается по формуле:

$$Q_ч = \frac{Q_{сут}}{24}, \quad (5)$$

где $Q_{сут}$ – объем производственных сточных вод за сутки, м³/сут;

24 – количество часов в сутках, ч.

Ультрафильтрация (УФ) является первой ступенью очистки и предназначена для удаления взвешенных веществ, коллоидных частиц, макромолекул и микроорганизмов из сточных вод.

Удельный поток ($J_{уф}$): для ультрафильтрации сточных вод гальванических производств, учитывая их состав, принимается консервативное значение удельного потока $J_{уф} = 60$ л/(м²·ч).

Коэффициент выхода пермеата ($R_{уф}$): для УФ систем обычно достигается высокий выход пермеата. Принимается $R_{уф} = 0,95$ (95%).

Расход пермеата УФ ($Q_{уф_перм}$) (объем воды, прошедший через УФ мембраны) рассчитывается по формуле:

$$Q_{уф_перм} = Q_ч \times R_{уф}, \quad (6)$$

где $Q_ч$ – часовой расход, м³;

$R_{уф}$ – коэффициент выхода пермеата, %.

Расход концентрата УФ ($Q_{уф_конц}$) (объем воды, не прошедший через УФ мембраны и содержащий концентрированные загрязнения) рассчитывается по формуле:

$$Q_{уф_конц} = Q_ч \times (1 - R_{уф}), \quad (7)$$

где $Q_ч$ – часовой расход, м³;

$R_{уф}$ – коэффициент выхода пермеата, %.

Необходимая площадь мембран УФ ($S_{уф}$) рассчитывается исходя из часового расхода исходной воды и удельного потока по формуле:

$$S_{уф} = \frac{Q_ч \times 1000}{J_{уф}}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{ч}}$ – часовой расход, м³;

$J_{\text{уф}}$ – консервативное значение удельного потока, л/(м²·ч).

Количество модулей УФ ($N_{\text{мод_уф}}$) рассчитывается по формуле, принимая, что один стандартный УФ модуль имеет площадь поверхности около 50 м² (например, полуволоконные мембраны):

$$N_{\text{мод_уф}} = \lceil \frac{S_{\text{уф}}}{S_{\text{мод_уф}}} \rceil, \quad (9)$$

где $S_{\text{уф}}$ – необходимая площадь мембран УФ, м²;

$S_{\text{мод_уф}}$ – площадь стандартного УФ модуля, м².

По формуле (5) часовой расход равен:

$$Q_{\text{ч}} = \frac{266,084}{24} = 11,087 \text{ м}^3$$

По формуле (6) расход пермеата УФ равен:

$$Q_{\text{уф_перм}} = 11,087 \times 0,95 = 10,532 \text{ м}^3/\text{ч}$$

По формуле (7) расход концентрата УФ равен:

$$Q_{\text{уф_конц}} = 11,087 \times (1 - 0,95) = 0,556 \text{ м}^3/\text{ч}$$

По формуле (8) необходимая площадь мембран УФ равна:

$$S_{\text{уф}} = \frac{11,087 \times 1000}{60} = 184,78 \text{ м}^2$$

По формуле (9) количество модулей УФ равно:

$$N_{\text{мод_уф}} = \lceil \frac{184,78 \text{ м}^2}{50 \text{ м}^2/\text{модуль}} \rceil = 4 \text{ модуля}$$

Обратный осмос (ОО) является второй ступенью очистки и предназначен для глубокого обессоливания воды, удаления ионов тяжелых металлов и других растворенных солей.

Удельный поток ($J_{\text{оо}}$): для обратного осмоса, учитывая, что на вход поступает пермеат УФ, но все еще присутствуют растворенные соли, принимается $J_{\text{оо}} = 15 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Целевой расход пермеата ОО ($Q_{\text{оо_перм}}$): для обеспечения 95% возврата воды в технологический цикл, объем пермеата ОО должен составлять 95% от исходного часового расхода сточных вод и рассчитывается по формуле:

$$Q_{oo_perm} = Q_{\text{ч}} \times 0,95, \quad (10)$$

где $Q_{\text{ч}}$ – часовой расход, м³;

Селективность мембран (R): для современных обратноосмотических мембран селективность по солям составляет 98% и выше. Принимается мембрана $R = 0,98$.

Необходимая площадь мембран ОО (S_{oo}) рассчитывается исходя из расхода пермеата УФ (который является питанием для ОО) и удельного потока ОО по формуле:

$$S_{oo} = \frac{Q_{\text{уф_перм}} \times 1000}{J_{oo}}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{уф_перм}}$ – целевой расход пермеата, м³/ч;

J_{oo} – консервативное значение удельного потока, л/(м²·ч).

Количество мембранных элементов ОО ($N_{\text{эл_оо}}$) производится по формуле (при использовании стандартных мембранных элементов площадь поверхности одного элемента составляет примерно 37 м²):

$$N_{\text{эл_оо}} = \left[\frac{S_{oo}}{S_{\text{эл_оо}}} \right], \quad (12)$$

где S_{oo} – необходимая площадь мембран ОО, м²;

$S_{\text{эл_оо}}$ – площадь поверхности одного элемента, м².

Эти элементы будут размещены в напорных корпусах для формирования обратноосмотической установки.

Солесодержание пермеата ($C_{\text{перм}}$) рассчитывается исходя из солесодержания исходной воды (после УФ, которое практически не меняется по солям) и селективности мембран по формуле:

$$C_{\text{перм}} = C_{\text{исх}} \times (1 - R), \quad (13)$$

где $C_{\text{исх}}$ – солесодержание исходной воды, мг/л;

R – селективность мембран, %.

Рабочее давление ($P_{\text{раб}}$): для систем обратного осмоса, работающих с водой после УФ и имеющих солесодержание до 200 мг/л, рабочее давление обычно составляет 10-15 бар. Принимается $P_{\text{раб}} = 12$ бар.

Мощность насоса высокого давления ($P_{нас}$) рассчитывается по формуле:

$$P_{нас} = \frac{Q_{уф_перм} \times P_{раб}}{36 \times \eta} \quad (14)$$

где $Q_{уф_перм}$ – расход питания ОО (пермеат УФ), м³/ч;

$P_{раб}$ – рабочее давление, бар;

36 – коэффициент перевода единиц;

η – КПД насоса (принимается 0,7).

По формуле (10) целевой расход пермеата ОО равен:

$$Q_{оо_перм} = 11,087 \times 0,95 = 10,532 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Таким образом, весь пермеат УФ (10,532 м³/ч) должен быть переработан системой ОО для достижения целевого возврата.

По формуле (11) необходимая площадь мембран ОО равна:

$$S_{оо} = \frac{10,532 \times 1000}{15} = 702,17 \text{ м}^2$$

По формуле (12) количество мембранных элементов ОО равно:

$$N_{эл_оо} = \left\lceil \frac{702,17}{37} \right\rceil = 19 \text{ элементов}$$

По формуле (13) солесодержание пермеата равно:

$$C_{перм} = 145,5 \times (1 - 0,98) = 2,91 \text{ мг/л}$$

Полученное значение 2,91 мг/л свидетельствует о высоком качестве очищенной воды, что позволяет использовать ее для самых ответственных технологических операций.

По формуле (14) рабочее давление равно:

$$P_{нас} = \frac{10,532 \times 12}{36 \times 0,7} = 5,02 \text{ кВт}$$

Опираясь на результаты расчетов, можно сделать следующие выводы:

Эффективность очистки: предложенная двухступенчатая мембранная установка (УФ + ОО) обеспечивает высокую степень очистки сточных вод гальванического производства. Солесодержание пермеата ОО составляет 2,91 мг/л, что ниже исходного значения (145,5 мг/л) и соответствует требованиям к ультрачистой воде, пригодной для использования в самых ответственных технологических процессах [17].

Замкнутый водооборот: система позволяет возвращать до 95% очищенной воды (252,78 м³/сут) обратно в технологический цикл, что снижает водопотребление предприятия и соответствует принципам НДТ.

Минимизация сбросов: объем сточных вод, подлежащего сбросу в городскую канализацию, составляет 13,30 м³/сут, что значительно меньше исходного объема сточных вод.

Внедрение камерного фильтр-пресса для механического обезвоживания шлама после электрокоагуляции соответствует современным требованиям НДТ, обеспечивая максимальную степень обезвоживания. Для выбора оптимального камерного фильтр-пресса необходимо провести расчеты.

Расчет образования сухого вещества в сутки (C_0) производится по формуле:

$$C_0 = C_{\text{ст}} \times Q_{\text{сут}}, \quad (15)$$

где $C_{\text{ст}}$ – прирост сухого вещества, кг/м³;

$Q_{\text{сут}}$ – расход сточных вод (м³/сут).

Для расчета сухого вещества за цикл ($C_{\text{цикл}}$) нужно определить желаемую продолжительность цикла ($t_{\text{ц}}$). Оптимальным для гальваношлама считается 8 часов. Расчет сухого вещества за цикл производится по формуле:

$$C_{\text{цикл}} = C_0 \times \frac{t_{\text{ц}}}{24}, \quad (16)$$

где C_0 – количество сухого вещества, образующегося в сутки, кг/сут;

$t_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла, ч.

В качестве целевой влажности осадка после обезвоживания ($W_{\text{к}}$) для камерного фильтр-пресса задается 75 %. Для расчета влажного осадка за цикл ($M_{\text{ос}}$) используется формула:

$$M_{\text{ос}} = \frac{C_{\text{цикл}}}{1 - W_{\text{к}}}, \quad (17)$$

где $C_{\text{цикл}}$ – количество сухого вещества за цикл, кг/цикл;

$W_{\text{к}}$ – целевая влажность осадка после обезвоживания, %.

Для осадков с труднофильтруемыми взвесями (в т.ч. гальванические шламы) удельная нагрузка на фильтрующую поверхность должна составлять 5-10 кг сухого вещества на 1 м² в сутки. Принимаем ($q_{уд}$) = 8 кг/м²·сут, стандартная площадь фильтрования (F) рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{C_0}{q_{уд}}, \quad (18)$$

где C_0 – количество сухого вещества образующегося в сутки, кг/сут;
 $q_{уд}$ – удельная нагрузка на фильтрующую поверхность, кг/м²·сут.

По формуле (15) количество сухого вещества образующегося в сутки равно:

$$C_0 = 0,055 \times 266 = 14,63 \text{ кг/сут}$$

По формуле (16) количество сухого вещества за цикл равно:

$$C_{\text{цикл}} = 14,63 \times \frac{8}{24} = 4,88 \text{ кг/цикл}$$

По формуле (17) количество влажного осадка за цикл равно:

$$M_{\text{ос}} = \frac{4,88}{1-0,75} = 19,52 \text{ кг/цикл}$$

По формуле (18) площадь фильтрования равна:

$$F = \frac{14,63}{8} = 1,83 \text{ м}^2$$

Опираясь на расчеты, потребуется оборудование с полезной площадью фильтрования 2 м². Подбираем модель ФПАКМ-2,5У.

Таким образом, для внедрения замкнутого водооборота на гальваническом участке требуется двухступенчатая мембранная установка: ультрафильтрация (4 модуля по 50 м²) и обратный осмос (19 элементов по 37 м²). Установка обеспечивает возврат 95% очищенной воды ($\approx 252,8$ м³/сут), снижение солесодержания с 145,5 до 2,91 мг/л и сокращение сброса концентрата до 13,3 м³/сут. Для обезвоживания гальваношлама обоснован камерный фильтр-пресс (модель ФПАКМ-2,5У, площадь 2,5 м²). Он снижает влажность шлама с 98–99% до 70–75%, сокращая его объем в 5–10 раз и уменьшая затраты на утилизацию.

4 Обеспечение безопасности жизнедеятельности при нанесении гальванических покрытий

Охрана труда представляет собой комплексную систему мер, направленных на защиту жизни и здоровья сотрудников во время выполнения ими профессиональных обязанностей. Эта система охватывает правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и другие мероприятия.

4.1 Нормативно-правовая база охраны труда на гальваническом предприятии

Гальванические производства, где электрохимическими методами обрабатывают металлы, сопряжены со значительными рисками из-за применения агрессивных химических реагентов и электрооборудования. Эти обстоятельства способны отрицательно влиять на здоровье персонала и создавать предпосылки для серьезных аварий.

Ключевыми законодательными актами Российской Федерации в сфере охраны труда являются:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 г. № 197-ФЗ (ТК РФ) (с изм. и доп.). Базовые определения, принципы обеспечения безопасности трудовой деятельности и ориентиры государственной политики сконцентрированы в разделе X «Охрана труда» [19].

2. Федеральный закон от 28.12.2013 г. № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» (с изменениями и дополнениями). Данный закон регламентирует процедуру проведения спецоценки условий труда и определяет круг организаций, уполномоченных ее выполнять [20].

3. Приказ Минтруда России от 11.12.2020 № 887н «Об утверждении Правил по охране труда при обработке металлов» (Зарегистрировано в

Минюсте России 30.12.2020 № 61951). В разделе LVII закреплены требования охраны труда при выполнении операций травления [21].

4. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»». Химические и биологические факторы производственной среды, а также предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны регламентированы в разделе II [22].

4.2 Анализ вредных и опасных производственных факторов при нанесении гальванических покрытий

Вредные и опасные производственные факторы при нанесении гальванических покрытий делятся на следующие основные группы:

1. Химические факторы. Наибольшую опасность представляет вдыхание ядовитых паров и аэрозолей электролитов, которые выделяются при нагреве ванн. В их состав могут входить соединения хрома, никеля, кадмия, а также пары кислот (серной, азотной). Эти вещества способны вызывать профессиональные заболевания органов дыхания, хронические отравления, а при контакте с кожей – химические ожоги и дерматиты. Например, пары хромового ангидрида могут поражать слизистую носа вплоть до перфорации носовой перегородки.

2. Физические факторы, к которым относится высокий риск поражения электрическим током, так как процесс протекает в электролитах под напряжением. Кроме того, возможно термическое воздействие от нагретых ванн, а также наличие шума и вибрации от вспомогательного оборудования.

3. Психофизиологические факторы. Для гальваника характерны значительные физические и нервно-психические перегрузки. Физическая тяжесть обусловлена необходимостью многократно поднимать и перемещать

тяжелые подвески с деталями, длительно удерживать их в ваннах при статической позе. Нервно-психическая напряженность связана с высокими сенсорными нагрузками: контролем температуры, плотности тока и химического состава электролитов по показаниям приборов, визуальной оценкой качества покрытия в агрессивной среде.

Эмоциональный стресс вызывает постоянная опасность химического ожога или поражения электротоком, а также высокая ответственность за соблюдение временных режимов осаждения. Монотонность труда усиливается из-за цикличности операций (загрузка, выдержка, промывка, выгрузка).

Рациональный режим работы с обязательными регламентированными перерывами для отдыха в санитарно-бытовых помещениях и выполнения защитных мероприятий (снятие СИЗ, обработка рук) является критическим фактором снижения утомления и профессиональных заболеваний.

Гальваническое производство часто относят к категории «А» – взрывопожароопасной. Это связано с использованием органических растворителей для обезжиривания и возможностью выделения гремучего газа (смеси водорода и кислорода) в процессе электролиза

Грамотное управление перечисленными факторами является необходимым условием сохранения здоровья работников и роста производительности.

В таблице 9 охарактеризованы опасные и вредные производственные факторы (ОВПФ) на рабочем месте гальваника и мероприятия по снижению их воздействия.

Из таблицы видно, что на рабочем месте гальваника наиболее значимыми являются химические вредные факторы (токсические пары хрома, никеля, кислот и щелочей), которые могут вызывать профессиональные заболевания, включая онкологические.

Таблица 9 – Анализ опасных и вредных производственных факторов на рабочем месте гальваника

Наименование ОВПФ	Источник ОВПФ	Последствия воздействия ОВПФ	Предлагаемые мероприятия по уменьшению воздействия факторов
Физические опасные и вредные производственные факторы			
Повышенный уровень шума на рабочем месте	Источниками шума являются шлифовальный станок, вентиляторы, источники питания и др.	профессиональная тугоухость, постепенное снижение слуха (обычно двустороннее) под воздействием производственного шум	Закупка СИЗ (беруши)
Химические опасные и вредные производственные факторы			
Токсические	Гальваностегия травление	– незащищенность от воздействия хрома и никеля, фтористоводородной кислоты могут вызвать раковое заболевание; – хронический бронхит; – интоксикацию парами кислот и щелочей.	Установить эффективную систему вытяжной вентиляции, закупка СИЗ (респираторы)
Повышенная запыленность воздуха рабочей зоны	При шлифовке деталей образуется абразивная пыль металлов	– профессиональные заболевания легких (пневмокониозы); – пылевые бронхиты; – пневмония; – астматические риниты; бронхиальная астма.	Закупка СИЗ (респираторы)
Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы			
Физические перегрузки	Работа во всех пространственных положениях, подъем или перемещение тяжестей (громоздкие детали)	– заболевания опорно-двигательного аппарата; – психические расстройства; – перенапряжение анализаторов.	Увеличение регламентированных перерывов, установка транспортного робота
Статические перегрузки	Статическая нагрузка на верхние конечности работников. Зависит от массы гальванизированных изделий, длительности непрерывной работы и др.	– заболевания нервно-мышечного аппарата плечевого пояса; – заболевания межпозвоночных дисков.	Увеличение регламентированных перерывов
Нервно-психические перегрузки	Напряжение зрения при осуществлении контроля качества нанесения покрытий	– снижение трудоспособности; – психические нарушения нервной системы.	Увеличение регламентированных перерывов

Для снижения их воздействия предлагается комплекс мер: совершенствование вентиляции, применение СИЗ (беруши, респираторы), увеличение регламентированных перерывов и частичная автоматизация (транспортный робот). Наиболее критичным остается обеспечение эффективной вытяжки для защиты органов дыхания.

4.3 Специальная оценка условий труда на предприятии

Специальная оценка условий труда на предприятии была проведена в 2025 году для должности оператор-гальваник на автоматических и полуавтоматических линиях. Процедура выполнялась в соответствии с методикой проведения специальной оценки условий труда по вредным (опасным) факторам: шум; тяжесть трудового процесса [22].

Отнесение условий труда к классу (подклассу) по шуму выполняется в зависимости от фактического превышения уровней данного фактора над предельно допустимыми значениями, которые закреплены гигиеническими нормативами условий труда.

Отнесение условий труда к классу по тяжести трудового процесса проводят по показателям: физическая динамическая нагрузка, масса перемещаемого груза, стереотипные движения, статическая нагрузка, рабочая поза, наклоны корпуса, перемещение в пространстве.

Физическую динамическую нагрузку оценивают через массу груза за одну операцию, расстояние переноса и суммарное количество операций за смену, вычисляя работу в кг×м. При разном расстоянии переноса рассчитывают суммарную механическую работу за смену.

Массу поднимаемого и перемещаемого груза определяют взвешиванием или по технологической документации. Стереотипные движения подсчитывают за 10–15 минут, затем пересчитывают на минуту и на всю смену. Статическую нагрузку определяют умножением веса груза

(или усилия) на время удержания с учетом нагрузки на одну руку, две руки или корпус с ногами; при нескольких видах нагрузки их суммируют.

Рабочую позу оценивают по хронометражу: определяют процент времени нахождения в позе от 8-часового рабочего дня. Наклоны корпуса подсчитывают за единицу времени, затем пересчитывают на все операции или всю смену. Перемещение в пространстве оценивают по количеству шагов за смену и длине шага, а итоговый класс условий труда устанавливают по показателю, имеющему наиболее высокий класс.

После выполнения специальной оценки условий труда на рабочем месте оператора-гальваника на автоматических и полуавтоматических линиях по факторам шума и тяжести трудового процесса получены следующие результаты:

1. Шум. Измеренный эквивалентный уровень звука за 8-часовую смену составил 68,5 дБА, что ниже гигиенического норматива 80 дБА. Поскольку фактическое значение соответствует допустимому уровню, согласно методике присвоен класс условий труда – 2.

2. Тяжесть трудового процесса. Для показателей физической динамической нагрузки, массы перемещаемого вручную груза, стереотипных движений, статической нагрузки, наклонов корпуса и перемещения в пространстве установлен 1-й класс условий труда; для рабочей позы – также 1-й класс. Так как измеренные величины не превышают гигиенические нормативы, присвоен класс условий труда – 1.

Таким образом, охрана труда в гальваническом производстве выступает не только как выполнение законодательных требований, но и как неотъемлемая составляющая производственной стратегии, ориентированной на сохранение здоровья персонала, рост производительности и обеспечение устойчивого функционирования предприятия.

5 Оценка эффективности предлагаемых мероприятий

Для комплексного обоснования целесообразности предложенных проектных решений необходимо произвести расчет экономической эффективности, который складывается из трех компонентов:

- предотвращенного экономического ущерба от снижения загрязнения водных ресурсов;
- экономического эффекта от ресурсосбережения;
- снижения эксплуатационных затрат на утилизацию твердых отходов.

5.1 Расчет предотвращенного экономического ущерба от загрязнения водных ресурсов

Внедрение мембранной установки позволяет практически полностью (до 98%) исключить сброс тяжелых металлов и других нормируемых загрязнителей в водные объекты. Для оценки экологического эффекта и количественного выражения предотвращенного ущерба применяется стандартная методика расчета [23].

Оценка величины предотвращенного экономического ущерба от загрязнения водной среды базируется на региональных показателях удельного экономического ущерба, которые представляют собой стоимостные оценки ущерба на единицу (1 условную тонну) приведенной массы загрязняющих веществ. Расчет производится по формуле:

$$Y_{\text{пр}} = Y_{\text{уд}} \times KЭ \times J_{\partial} \times \sum_{i=1}^N \Delta M_i, \quad (19)$$

где $Y_{\text{пр}}$ – предотвращенный экономический ущерб водным ресурсам в рассматриваемом регионе, руб./год;

$Y_{\text{уд}}$ – показатель удельного экономического ущерба (цены загрязнения) водным ресурсам, наносимого единицей (условная тонна) приведенной

массы загрязняющих веществ на конец расчетного периода в рассматриваемом регионе, принимается по равным 7098,4 руб./усл. т;

$KЭ$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости в рассматриваемом регионе (для Пензенской области равен 1,9);

J_d – индекс-дефлятор по отраслям промышленности, устанавливаемый Минэкономки Российской Федерации на рассматриваемый период и доводимый территориальными природоохранными органами до природопользователей. Для гальванического производства на 2025 год равен 103,6%;

ΔM_i – приведенная масса загрязняющих веществ, не попадающих в водные объекты в результате осуществления соответствующих природоохранных мероприятий в рассматриваемом регионе в течение расчетного периода, усл.т/год, определяется по формуле:

$$\Delta M_i = M1_i - M2_i, \quad (20)$$

где $M1_i$, $M2_i$ – приведенная масса сброса загрязняющих веществ, попадающих в водные объекты в рассматриваемом регионе, соответственно, на начало и конец расчетного периода (усл. т), определяется по формуле:

$$M1(2)_i = m1(2)_i \times NЭ_i, \quad (21)$$

где $m1(2)_i$ – масса фактического сброса i -го загрязняющего вещества или группы веществ с одинаковым коэффициентом относительной эколого-экономической опасности в водные объекты или выброса в атмосферу в рассматриваемом регионе, усл. т/год;

$NЭ_i$ – коэффициент относительной эколого-экономической опасности для i -го загрязняющего вещества или группы веществ, определяемый по справочным материалам или по формуле:

$$NЭ_i = \frac{1}{ПДК_{p-x}}, \quad (22)$$

где i – номер загрязняющего вещества или группы веществ;

N – количество учитываемых загрязняющих веществ.

В качестве базового сценария (до модернизации) используются данные предприятия за 2023 год, который, согласно анализу водоотведения, характеризовался наиболее критическими превышениями нормативов по меди, цинку, железу и аммонийному азоту.

Основные исходные данные, промежуточные вычисления и результаты расчета приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Исходные данные и расчет предотвращенного экологического ущерба

Наименование загрязняющих веществ	$m1_i$	$m2_i$	$NЭ_i$	$M1_i$	$M2_i$	ΔM_i
Взвешенные вещества	0,8053	0,0161	0,1	0,0805	0,0016	0,0789
БПК _{полн}	0,1542	0,0031	0,5	0,0771	0,0015	0,0756
Азот аммонийный	0,0988	0,0020	2	0,1976	0,0040	0,1936
Натрий	0,8736	0,0175	0,0083	0,0072	0,0001	0,0071
Железо	0,0342	0,0007	10	0,3420	0,0068	0,3352
Медь	0,0068	0,0001	1000	6,8	0,1360	6,664
Свинец	0,0003	0	166,67	0,05	0,001	0,0490
Цинк	0,0179	0,0004	100	1,79	0,0358	1,7542
Сульфаты	0,5394	0,0108	0,01	0,0054	0,0001	0,0053
Хлориды	0,6229	0,0125	0,003	0,0019	0	0,0019
$\sum M1_i$				9,3517		
$\sum M2_i$					0,1870	
$\sum \Delta M_i$						9,1648

Как видно из таблицы, основная доля предотвращенного экологического ущерба (в условных тоннах) приходится на тяжелые металлы – медь и цинк, поскольку они обладают наивысшим коэффициентом эколого-экономической опасности для водоемов.

Подставляя полученное значение суммы ΔM_i в формулу (19), определим итоговый предотвращенный экономический ущерб:

$$Y_{\text{пр}} = 7098,4 \times 1,9 \times 1,036 \times 9,1648 = 128051(\text{руб./год})$$

Таким образом, модернизация системы очистки позволит ежегодно предотвращать экологический ущерб водным объектам региона на сумму около 128 тысяч рублей, что одновременно освободит предприятие от выплаты соответствующих экологических штрафов за превышение ПДК.

5.2 Расчет экономической эффективности от ресурсосбережения

Согласно концепции НДТ, главной задачей модернизации является не просто очистка стоков до нормативных требований, но и создание замкнутого цикла водоснабжения. Внедренная на предприятии двухступенчатая мембранная система (УФ + ОО) позволяет возвращать 95% очищенной воды обратно в технологический цикл гальванического цеха.

Годовой объем производственных сточных вод предприятия, поступающих на очистку ($Q_{год}$), составляет 75969 ($\text{м}^3/\text{год}$).

Объем воды, возвращаемой в технологический цикл (пермеат) при коэффициенте выхода 95% определяется по формуле:

$$V_{возвр} = Q_{год} \times 0,95, \quad (23)$$

где $Q_{год}$ – годовой объем производственных сточных вод предприятия, поступающих на очистку, $\text{м}^3/\text{год}$.

По формуле (23) объем воды, возвращаемой в технологический цикл равен:

$$V_{возвр} = 75969 \times 0,95 = 72170,55 \text{ м}^3/\text{год}$$

Данный объем позволяет предприятию пропорционально сократить забор свежей воды из городского водопровода, а также снизить объем сброса сточных вод в городскую канализацию (сбрасывается только 5% концентрата).

Для расчета экономического эффекта используются средние тарифы для промышленных предприятий Пензенской области на расчетный период:

- тариф на холодное водоснабжение (T_6): 31,57 руб. за 1 м³ (без НДС);
- тариф на водоотведение (T_c): 32,10 руб. за 1 м³ (без НДС).

Комплексная экономия средств предприятия за счет сокращения потребления свежей воды и снижения объемов водоотведения ($\mathcal{E}_{\text{вода}}$) рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{вода}} = V_{\text{возвр}} \times (T_6 + T_c), \quad (24)$$

где $V_{\text{возвр}}$ - объем воды, возвращаемой в технологический цикл; м³/год;

T_6 - тариф на холодное водоснабжение, руб. за 1 м³;

T_c - тариф водоотведение, руб. за 1 м³.

По формуле (24) комплексная экономия средств предприятия за счет сокращения потребления свежей воды и снижения объемов водоотведения равна:

$$\mathcal{E}_{\text{вода}} = 72\,170,55 \times (32,10 + 31,57) = 4595098,92 \text{ руб.}$$

Реализация схемы замкнутого водооборота приносит колоссальный экономический эффект. Предприятие сэкономит порядка 4,6 млн рублей ежегодно исключительно на платежах за услуги городского водоканала.

5.3 Экономический эффект от снижения затрат на обращение с отходами

До проведения модернизации осадок (гальваношлам III класса опасности) после станции нейтрализации направлялся на утилизацию в ООО «Поток». Ввиду высокой влажности осадка (около 80-90%), его масса составляла 5,84 тонны в год ($M_{\text{шл}}$).

Проектом предложено внедрение камерного фильтр-пресса (модель ФПАКМ-2,5У), что обеспечивает глубокое механическое обезвоживание шлама до остаточной влажности 70–75%, это позволяет сократить объем вывозимого шлама в среднем в 5 раз.

Масса обезвоженного шлама после фильтр-пресса определяется по формуле:

$$M_{\text{шл.нов}} = \frac{M_{\text{шл}}}{5}, \quad (25)$$

где $M_{\text{шл}}$ – масса шлама в год, т.

По формуле (25) масса обезвоженного шлама после фильтр-пресса равна:

$$M_{\text{шл.нов}} = \frac{5,84}{5} = 1,168 \text{ т}$$

Средняя стоимость услуг специализированных организаций по транспортировке и утилизации 1 тонны гальваношлама III класса опасности в регионе составляет порядка 15 000 рублей ($C_{\text{утил}}$).

Экономия на утилизации отходов ($\mathcal{E}_{\text{отх}}$) рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{отх}} = (M_{\text{шл}} - M_{\text{шл.нов}}) \times 15000, \quad (26)$$

где $M_{\text{шл}}$ – масса шлама в год, т;

$M_{\text{шл.нов}}$ – масса обезвоженного шлама после фильтр-пресса, т.

По формуле (26) экономия на утилизации отходов равна:

$$\mathcal{E}_{\text{отх}} = (5,84 - 1,168) \times 15000 = 70080 \text{ руб.}$$

Установка камерного фильтр-пресса не только снижает экологические риски при хранении и транспортировке токсичных отходов, но и экономит предприятию более 70 тысяч рублей ежегодно.

Переход гальванического производства на наилучшие доступные технологии, включающие мембранную очистку (ультрафильтрация и обратный осмос) и механическое обезвоживание осадка на фильтр-прессе, полностью экономически оправдан.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведено комплексное исследование системы очистки сточных вод гальванического производства на примере действующего предприятия, расположенного в г. Пензе, которое осуществляет полный цикл нанесения гальванических покрытий при серийном выпуске малогабаритной арматуры.

Федеральные законы, постановления Правительства, приказы Минприроды, санитарные правила и справочники НДТ предъявляют жесткие требования к предприятиям. Сравнительный анализ существующих методов очистки показал, что наибольшую эффективность (степень очистки до 99,9 %) и возможность организации замкнутого водооборота обеспечивают комбинированные схемы с использованием мембранной доочистки.

При анализе системы водопользования, водоотведения и очистки сточных вод на предприятии установлено, что производство характеризуется высокой водоемкостью. Сточные воды гальванического участка содержат многокомпонентные токсичные загрязнения – ионы тяжелых металлов (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$), сульфаты, хлориды, фториды, фосфаты, поверхностно-активные вещества и органические добавки. Очистка реализована методом электрокоагуляции. Анализ эффективности показал, что электрокоагулятор обеспечивает высокую степень удаления тяжелых металлов, однако остаточные концентрации существенно превышают предельно допустимые для водоемов рыбохозяйственного назначения. Выявлены ключевые недостатки действующей системы: недостаточная эффективность очистки по ряду показателей, высокое водопотребление и доминирование прямоочной промывки деталей (полезно используется лишь 2–3 % воды), проблема обращения с гальваношламом (5,84 т/год, III класс опасности, высокая влажность), а также несоответствие требованиям НДТ.

На основе положений ИТС 36-2024 обоснован и выбран комплекс перспективных технологических решений для повышения эффективности

очистки сточных вод. Предложено внедрить каскадные противоточные ванны промывки (2–3 ступени) и ванны улавливания, что позволит снизить водопотребление в 3–5 раз и уменьшить унос электролитов. Модернизация узла предварительной очистки предусматривает применение напорного электрокоагулятора с реверсированием полярности и титансодержащих коагулянтов для стабилизации качества очистки. Для глубокой доочистки от растворенных примесей разработана двухступенчатая мембранная установка, включающая блок ультрафильтрации и блок обратного осмоса.

Для механического обезвреживания гальваношлама обосновано применение камерного фильтр-пресса с полезной площадью фильтрования не менее 2 м²; рекомендована модель ФПАКМ-2,5У (площадь 2,5 м²).

Проанализированы вредные и опасные производственные факторы. Предложены мероприятия по снижению воздействия: совершенствование вытяжной вентиляции, применение средств индивидуальной защиты (респираторы, беруши), увеличение регламентированных перерывов, частичная автоматизация (транспортный робот).

Проведена оценка эффективности предлагаемых мероприятий. Расчет предотвращенного экологического ущерба водным ресурсам по стандартной методике показал, что внедрение мембранной установки позволит ежегодно предотвращать ущерб в размере 128 051 рубля за счет снижения сброса тяжелых металлов и других загрязняющих веществ. Экономический эффект от ресурсосбережения составляет 4 595 099 рублей в год благодаря возврату очищенной воды в производственный цикл.

Таким образом, разработанный комплекс мероприятий позволяет перейти от ресурсоемкой очистки к замкнутой системе оборотного водоснабжения с глубокой регенерацией воды и рекуперацией ценных компонентов. Предлагаемые технические решения полностью соответствуют требованиям ИТС 36-2024, обеспечивают снижение антропогенной нагрузки на водные объекты до нормативных значений, сокращают водопотребление и эксплуатационные затраты.

Список использованных источников

1. Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ: [принят Гос. Думой 20.12.2001: одобр. Советом Федерации 26.12.2001] // Собрание законодательства РФ. – 2002. – № 2. – Ст. 133.
2. Об отходах производства и потребления: Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ: [принят Гос. Думой 22.05.1998: одобр. Советом Федерации 10.06.1998] // Собрание законодательства РФ. – 1998. – № 26. – Ст. 3009.
3. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения: Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ: [принят Гос. Думой 12.03.1999: одобр. Советом Федерации 17.03.1999] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1999. – № 14. – Ст. 1650.
4. Водный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ: [принят Гос. Думой 12.04.2006: одобр. Советом Федерации 26.05.2006] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2006. – № 23. – Ст. 2381.
5. О водоснабжении и водоотведении: Федеральный закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ: [принят Гос. Думой 18.11.2011: одобр. Советом Федерации 23.11.2011] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2011. – № 50. – Ст. 7358.
6. Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий: Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2398// Собрание законодательства Российской Федерации. – 2021. – № 2. – Ст. 426.
7. Об утверждении Правил создания и эксплуатации системы автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ: Постановление Правительства РФ от 13.03.2019 № 262 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2019. – № 12. – Ст. 1309.

8. О порядке определения технологии в качестве НДТ, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям: Постановление Правительства РФ от 23.12.2014 № 1458 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2015. – № 2. – Ст. 496.

9. Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения: Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 // Собрание законодательства РФ. – 2013. – № 31. – Ст. 4224.

10. Об утверждении Методики разработки НДС загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей: Приказ Минприроды России от 29.12.2020 № 1118 // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 20.04.2026).

11. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям...: утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 3. – М.: Роспотребнадзор, 2021. – 112 с.

12. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. Постановлением главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. – М.: Роспотребнадзор, 2021. – 248 с.

13. ГОСТ 9.314-90. Единая система защиты от коррозии и старения. Вода для гальванического производства и схемы промывок. Общие требования. – Введ. 1991-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 12 с.

14. ИТС 36-2024. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Обработка поверхностей электрохимическими методами : утв. Приказом Росстандарта от 24.12.2024 № 3068. – М.: Бюро НДТ, 2024. – 210 с.

15. ИТС 8-2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров)...: утв. Приказом Росстандарта от 29.04.2022 № 1043. – М.: Бюро НДТ, 2022. – 184 с.

16. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения: утв. Постановлением Госстроя СССР от 21.05.1985 № 71. – М.: Госстрой СССР, 1986. – 72 с.

17. Ветошкин, А. Г. Технические средства инженерной экологии: учебное пособие / А. Г. Ветошкин. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 424 с.

18. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Ю. М. Ласков, В. И. Калицун. – Москва: Стройиздат, 1996. – 591 с.

19. Трудовой кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 30.12.2001 № 197-ФЗ: [принят Гос. Думой 21.12.2001: одобр. Советом Федерации 26.12.2001] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2002. – № 1 (ч. 1). – Ст. 3.

20. О специальной оценке условий труда: Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ: [принят Гос. Думой 23.12.2013: одобр. Советом Федерации 25.12.2013] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2013. – № 52 (ч. 1). – Ст. 6991.

21. Об утверждении Правил по охране труда при обработке металлов: Приказ Минтруда России от 11.12.2020 № 887н. – URL: <http://pravo.gov.ru>. – (Зарегистрировано в Минюсте России 30.12.2020 № 61951).

22. Занько, Н.Г. Безопасность жизнедеятельности: учебник / Н.Г. Занько, К.Р. Малаян, О.Н. Русак; под ред. О.Н. Русака. – 15-е изд. – СПб.: Лань, 2016. – 672 с.

23. Безбородова, О.Е. Оценка экономического ущерба окружающей среде от производственной деятельности / О.Е. Безбородова, В.И. Симакин, Д.П. Грузин. – Пенза: 2007. – 158 с.