

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

(наименование института полностью)

Центр инженерного оборудования

(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Водоснабжение и водоотведение городов и промышленных предприятий

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Разработка сооружений физико-химической очистки вод
предприятий Северного промузла г. Тольятти

Обучающийся

А.В. Кузьмин

(инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

канд. техн. наук, доцент, С.Ш. Сайриддинов

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

Тольятти 2025

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Анализ систем водоотведения северного промышленного узла города Тольятти.....	6
1.1 Характеристики используемой технологической схемы физико- химической очистки вод промышленных предприятий.....	11
1.2 Описание предлагаемой технологической схемы физико- химической очистки вод промышленных предприятий.....	18
1.3 Выбор и расчет оборудования физико-химической очистки вод промышленных предприятий	19
Глава 2 Технологические решения систем водоотведения, применяемые на химическом производстве ПАО «КуйбышевАзот»	23
2.1 Основные технологические задачи цеха	25
2.2 Технологическая схема очистки промышленных сточных вод цеха переработки органических и неорганических соединений.....	30
2.3 Анализ качества стоков на предприятии ПАО «КуйбышевАзот»	34
2.4 Негативные факторы поступающих на очистку химически загрязненных сточных вод.....	41
2.5 Технологические особенности очистки химически загрязненных сточных вод	46
Глава 3 Выбор и разработка модернизации действующего оборудования очистных сооружений сточных вод ПАО «КуйбышевАзот».....	49
3.1 Технологическая схема действующей системы аэрации.....	51
3.2 Применяемое оборудование на очистных сооружениях	56
3.3 Недостатки действующего оборудования очистных сооружений	56
3.4 Обоснование выбора импульсного аэратора	58
3.5 Интеграция импульсного аэратора в существующую систему	63
3.6 Ожидаемый эффект от внедрения.....	64
Заключение	66
Список используемых источников.....	67

Введение

Актуальность и научная значимость исследования эффективности очистки промышленных сточных вод.

Исследование эффективности работы очистных сооружений промышленных вод приобретает особую важность в контексте сохранения окружающей среды и рационального использования водных ресурсов. Неконтролируемое загрязнение водоемов, вызванное сбросом, промышленных стоков, наносит существенный ущерб экосистемам с непредсказуемыми последствиями [44].

Улучшение состояния природной среды и защита водоемов от загрязнения напрямую зависят от эффективности работы очистных сооружений на предприятиях химической промышленности. Расширение и повышение производительности таких сооружений являются ключевыми факторами в решении этой задачи.

Физико-химические установки очистки, применяемые для обезвреживания промышленных сточных вод, играют важную роль в этом процессе. Они эффективно удаляют различные примеси из стоков хозяйственно-бытового характера и сложного комбинированного состава.

Актуальность темы исследования обусловлена возрастающим дефицитом водных ресурсов, являющихся основой экономического развития страны. Вода – незаменимый ресурс, играющий ключевую роль в большинстве технологических процессов.

В настоящее время антропогенное воздействие на окружающую среду, в частности, сброс промышленных сточных вод, является одним из наиболее серьезных факторов загрязнения. Разработка и внедрение эффективных технологий очистки производственных стоков – это актуальная задача, требующая комплексного подхода [3,42,47].

Отсутствие универсальных методов очистки для предприятий химической промышленности обусловлено разнообразием технологий

производства и, соответственно, составом образующихся сточных вод. Выбор оптимальной технологии очистки и необходимого оборудования осуществляется на основе анализа состава стоков.

В связи с этим вопросы очистки, обезвреживания и утилизации промышленных сточных вод приобретают первостепенное значение в обеспечении экологической безопасности и рациональном использовании водных ресурсов.

Объектом исследования являются методы физико-химической очистки вод промышленных предприятий.

Предметом исследования – технологическая схема физико-химической очистки технологических вод промышленных предприятий.

Цель исследований: Разработка технологических решений физико-химической очистки вод промышленных предприятий.

Задачи:

- Анализ методов физико-химической очистки вод промышленных предприятий.
- Разработка технологической схемы физико-химической очистки вод промышленных предприятий.
- Выбор и расчет оборудования физико-химической очистки вод промышленных предприятий.

Методы исследования.

При написании диссертации использовался аналитический метод, основанный на анализе уже существующих технологических схем очистки сточных вод промышленных предприятий химического производства.

Научная новизна исследования.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что достижение существенного повышения качества очистки сточных вод при заданных параметрах входных потоков является невозможным. А представленная технологическая система водоотведения с локальной доочисткой сточных вод демонстрирует необходимость значительных затрат ресурсов при

подготовке стоков к сливу в общую канализационную сеть. Данный процесс требует применения сложных технологий, значительного трудового вклада и длительного периода реализации. К тому же, важным аспектом является существенная стоимость процессов доочистки и подготовки сточных вод [48].

Практическая значимость исследования.

Предложенный метод импульсной аэрации интегрируется в существующую технологическую схему аэротенка и не требует энергозатрат. Импульсный ввод водовоздушной смеси в аэрируемый резервуар позволяет значительно увеличить циркуляционный расход, способствует интенсивному перемешиванию иловой смеси в резервуаре без дополнительных энергозатрат, повышая степень использования кислорода воздуха.

Личный вклад автора в исследование, изучение обобщение научной литературы, связанной с процессами очистки сточных вод химических предприятий России и Европейских стран. Изучение принципов работы технологических систем очистки сточных вод промышленных предприятий химического производства.

Апробация работы.

1. Апробация работы: результаты докладывались научно-практической конференции: «Дни науки ТГУ», Тольятти, 2024. Выступление с докладом «Особенности физико-химической очистки сточных вод промышленных (химических) предприятий».

На защиту выносятся метод импульсной аэрации сточных вод – это метод, при котором аккумулируется обрабатываемая жидкость в распределительной камере, а затем импульсно подаётся через сопло отводной трубы сифона в аэрационную трубу.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографии из 57 наименований. Общий объем работы 71 страница, включая 19 иллюстраций, 7 таблиц.

Глава 1 Анализ систем водоотведения северного промышленного узла города Тольятти

Схема водоотведения городского округа Тольятти выполнена в соответствии с техническим заданием на разработку «Схемы водоснабжения и водоотведения городского округа Тольятти на период с 2014 до 2028 года», утвержденного Генеральным директором ОАО «ТЕВИС», Н.Н.Клюшенковым и Главным управляющим директором ООО «Волжские коммунальные системы», О.Н. Маркеловым.

Письмо № 1419/4.1 от 30.04.2014 г. Департамента городского хозяйства Мэрии городского округа Тольятти, об учете предложений департамента градостроительной деятельности, направлении перечня проблемных вопросов, требующих особого внимания при разработке схемы ВиВ...».

Схема водоотведения городского округа Тольятти». разработана на основании:

- Федерального закона Российской Федерации от 7 декабря 2011 г, № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении» [40];
- Постановления Правительства РФ от 05 сентября 2013г. №782 «О схемах водоснабжения и водоотведения». «Правила разработки и утверждения схем водоснабжения и водоотведения».

Целью разработки схемы водоотведения городского округа. Тольятти, является обеспечение для абонентов доступности водоотведения с использованием централизованных и индивидуальных систем водоотведения, в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации, рационального водопользования, а также развитие централизованных систем водоотведения на основе наилучших доступных технологий и внедрения энергосберегающих технологий [5,45].

Реализация мероприятий позволит обеспечить:

- бесперебойное отведение от города сточных вод;

- повышение надежности систем водоотведения и удовлетворение потребностей потребителей;
- модернизацию и инженерно-техническую оптимизацию систем водоотведения, с учетом современных требований;
- обеспечение экологической безопасности и уменьшение техногенного воздействия на окружающую среду [8,42,47];
- подключение новых абонентов на территориях перспективной застройки.

При разработке схемы водоотведения использованы:

«Генеральный план городского округа Тольятти на 2015÷2025 г.г., утверждённый решением Думы городского округа Тольятти 07.07.2010 №335, иными муниципальными правовыми актами городского округа Тольятти Самарской области.

Проект изменений в Генеральный план городского округа Тольятти на расчетный срок до 2025 года. Утвержден ГУП институт «ТеррНИИГражданпроект», г.Самара - 2010 год, архивный номер № 1176.

Подготовка проекта внесения изменений в Генеральный план городского округа Тольятти Самарской области на расчетный срок до 2025 года. Утвержден Муниципальным автономным учреждением «Архитектура и градостроительство», г.Тольятти - 2011 год. архивный номер №1199» [39].

«Система водоотведения, являясь составной частью жилищно-коммунального хозяйства города Тольятти, образовалась и базировалась на трех основных градообразующих предприятиях это: ООО «Синтезкаучик в последствие, ООО «Тольяттикаучук» и в настоящее время ЗАО «Тольяттисинтез»; «Волжский автомобильный завод» и ОАО «Тольяттиазот». По мере строительства данных заводов и предприятий происходило развитие территория и строительство новых городских систем водоснабжения и водоотведения.

Каждое из этих предприятий имело собственные очистные сооружения канализации, на которые соответственно принимались собственные

производственные, поверхностные и бытовые сточные воды, а также бытовые сточные воды от населения прилегающих районов города и поверхностные стоки с жилой территории» [13,39].

Таким образом, в г.о. Тольятти реализована комбинированная система водоотведения, состоящая из двух централизованных районных общесплавных систем водоотведения:

- ЦСВ№1(общесплавная) с собственными очистными сооружениями Автозаводского района;
- ЦСВ№2 (общесплавная) с собственными очистными сооружениями Центрального и Комсомольского районов;
- И семь централизованных систем водоотведения дождевых сточных вод: ЦСВ№3, ЦСВ№4, ЦСВ№5, ЦСВ№6, ЦСВ№7, ЦСВ№8, ЦСВ№9 [36].

В «1990÷1995 г.г. институтом «Ростовский Водоканалпроект» разработаны проекты (407.Р4, 407.Р4 доп) «Реконструкция и расширение внеплощадочных водоснабжения и канализации Автозаводского района» предусматривающие:

- расширение системы отведения производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод на очистные сооружения канализации. Строительство третьей насосной станции №3 (РНС_№3) и 4-ой нитки напорного коллектора от РНС-3 до ОСК;
- введение в схему сооружений биологической очистки производственно-бытовых сточных вод технологии нитриденитрификации и дефосфотации, а также строительство сооружений второй ступени глубокой доочистки в составе сорбционных фильтров;
- комплекс установок ультрафиолетового обеззараживания доочищенных сточных вод взамен технологии хлорирования;
- комплекс сооружений по подготовке и механическому обезвоживанию осадка» [13,39].

«В настоящее время выполнено строительство только станции УФ – дезинфекции. Техническое состояние очистных сооружений удовлетворительное.

Сброс очищенных сточных вод после ОСК осуществляется в Саратовское водохранилище, из пруда-накопителя условно-чистых вод частично в Куйбышевское водохранилище и в качестве подпитки в оборотную систему производственного водоснабжения ОАО «АВТОВАЗ».

Существующая площадка очистных сооружений канализации ЗАО «Тольяттисинтез» расположена в Центральном районе г. Тольятти. На площадку поступают загрязненные производственно-бытовые сточные воды от Северного промузла и бытовые сточные воды от Центрального района города. Строительство и ввод в эксплуатацию действующих очистных сооружений осуществлялось по очередям.

I и II очереди очистных сооружений общей производительностью 66 272 м³/сут построены по проекту Ростовского отделения «Союзводоканалпроект» и введены в эксплуатацию соответственно в 1961 и 1967 годах. III очередь ОСК производительностью 98 282 м³/сут. построена также по проекту Ростовского отделения «Союзводоканалпроект» и введена в эксплуатацию в 1975 году. После очистки большая часть стоков (около 70 % общего объема) поступает в самотечный коллектор и далее через рассеивающий выпуск № 2 (бывший выпуск ОАО «АВТОВАЗ») в Саратовское водохранилище. В связи с истечением срока амортизации рассеивающий выпуск № 2 ОАО «АВТОВАЗ» списан с баланса и по распоряжению № 4339-1/р от 10.11.2002 г. мэра города Тольятти включен в состав муниципальной собственности г. Тольятти. Другая часть сточных вод (около 30 %) ОСК подается по напорному трубопроводу, находящемуся на балансе ОАО «КуйбышевАзот», в насосную станцию № 3 Северного промузла ОАО «Тольяттиазот» и далее через рассеивающий выпуск в Саратовское водохранилище» [13,14,39].

«В 1992 году институтом «Ростовский Водоканалпроект» был выполнен проект «Расширение и техническое перевооружение системы внеплощадочной канализации Северного промузла в г. Тольятти «Реконструкция и расширение очистных сооружений». Он был утвержден ТПО «Синтезкаучук» 15.04.92 г.

Проектом предусмотрена реконструкция и расширение действующих очистных сооружений канализации ТПО «Синтезкаучук» с увеличением их производительности до 295 701 м³/сут и повышением степени очистки сточных вод. По проекту производственно- бытовые сточные воды подвергаются полной биологической очистке и глубокой двухступенчатой доочистке в биореакторах с прикрепленной микрофлорой затем на каркасно-засыпных фильтрах. Очищенные и обеззараженные сточные воды по расширяемой системе отводятся в р. Волга ниже пос. Федоровка через рассеивающий выпуск ОАО «Тольяттиазот» в Саратовское водохранилище на 1455 км от устья реки через остров Копылово в районе п. Фёдоровка, в соответствии с решением от 12.07.2011 г. Нижне- Волжского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов (Нижне - Волжское БВУ) о предоставлении водного объекта в пользование юридическому лицу ОАО «Тольяттиазот» (Приложение Разрешения №10 на сброс загрязняющих веществ в окружающую среду (водные объекты) от 10.07.2011 г., № 406, с 15.07.2011 г. по 21.07.2016 г. (копия решения приложение №3)))» [39,42].

В 2000 году ОАО институтом «Ростовский Водоканалпроект» было разработано ТЭО «Мероприятия по сокращению сброса неочищенных дождевых и промзагрязненных сточных вод ОАО «Куйбышевазот». В ТЭО рассмотрены вопросы очистки дождевых и промзагрязненных сточных вод ОАО «Куйбышевазот». По ТЭО очищенные и обеззараженные сточные воды в количестве 15 000 м³/сут направляются в систему оборотного промводоснабжения завода. Оставшееся количество сточных вод (15 000 м³/сут – в сухой период и 25 500 м³/сут с дождем) через объединенную

насосную станцию №3 по существующей системе сбрасываются в Саратовское водохранилище (рисунок 1). ТЭО согласовано Государственной экологической экспертизой и утверждено Государственным комитетом по охране окружающей среды Самарской области приказом № 1525 от 13 декабря 2000 г. Проект не был реализован» [39].

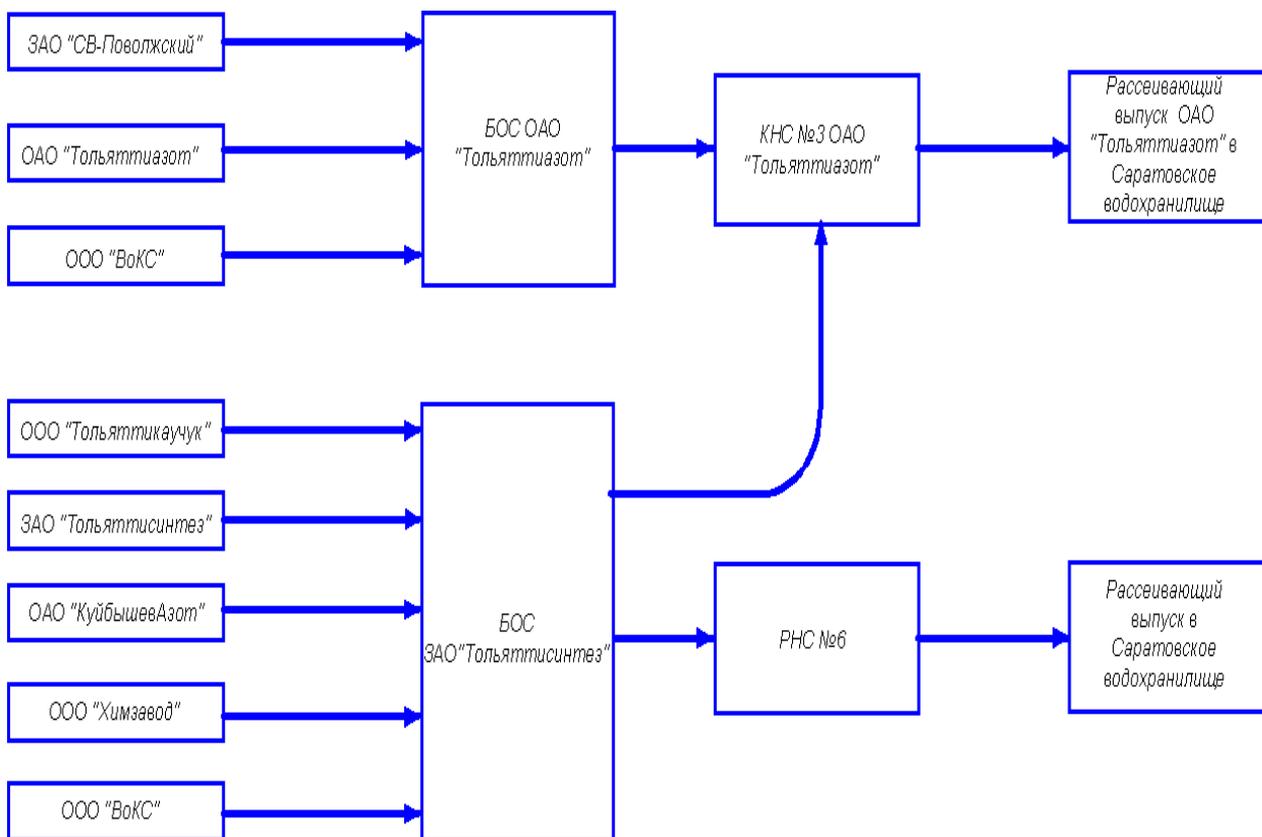


Рисунок 1 – Принципиальная схема водоотведения централизованной системы водоотведения

1.1 Характеристики используемой технологической схемы физико-химической очистки вод промышленных предприятий

«Химически загрязненные, промышленные и бытовые сточные воды предприятий северного промышленного узла: ОАО «КуйбышевАзот», ООО «Химзавод», ООО «Тольяттикаучук», а также бытовые сточные воды, транспортируемые по трубопроводам подаются в приемные камеры: I, II и III очереди БОС ЗАО «Тольяттисинтез» [26].

В состав загрязнений промышленных и бытовых сточных вод входят нефтепродукты, специфические, минеральные, бактериальные и биологические загрязнения: этил, метанол, ацетонитрил, метилстирол, изоамилен, тяжелые углеводороды C₅ и выше, фенолы, капролактамы, ПАВ (сульфанол, лейканол) карбамид, органические вещества бытового происхождения и другие вещества.

Исходя из состава загрязнений, применяются два вида очистки: механический и биологический, с последующей доочисткой.

Механическая очистка заключается в удалении из сточных вод грубодисперсных взвесей.

Процесс биологической очистки в сооружениях идет в две стадии:

Первая стадия – адсорбция на поверхности зоогелей ила загрязнений и окисление легко окисляемых органических веществ [57].

Вторая стадия – доокисление трудноокисляемых веществ.

На первой стадии, которая имеет место преимущественно в первых двух коридорах аэротенка и охватывает по времени около двух первых часов, окисляется до 40 ÷ 60% всех адсорбированных органических загрязнений [1,57].

Вторая стадия по продолжительности в несколько раз превышает первую. Она начинается в аэротенке, а заканчивается в регенераторе, где адсорбированные загрязнения полностью доокисляются и активный ил вновь приобретает физиологическую активность.

После аэротенков биологически очищенные сточные воды поступают во вторичные отстойники, где происходит разделение (отстаивание) активного ила в течение одного часа сорока двух минут и далее возврат его в регенераторы, а осветленные сточные воды подвергаются доочистке и обеззараживанию» [24,39].

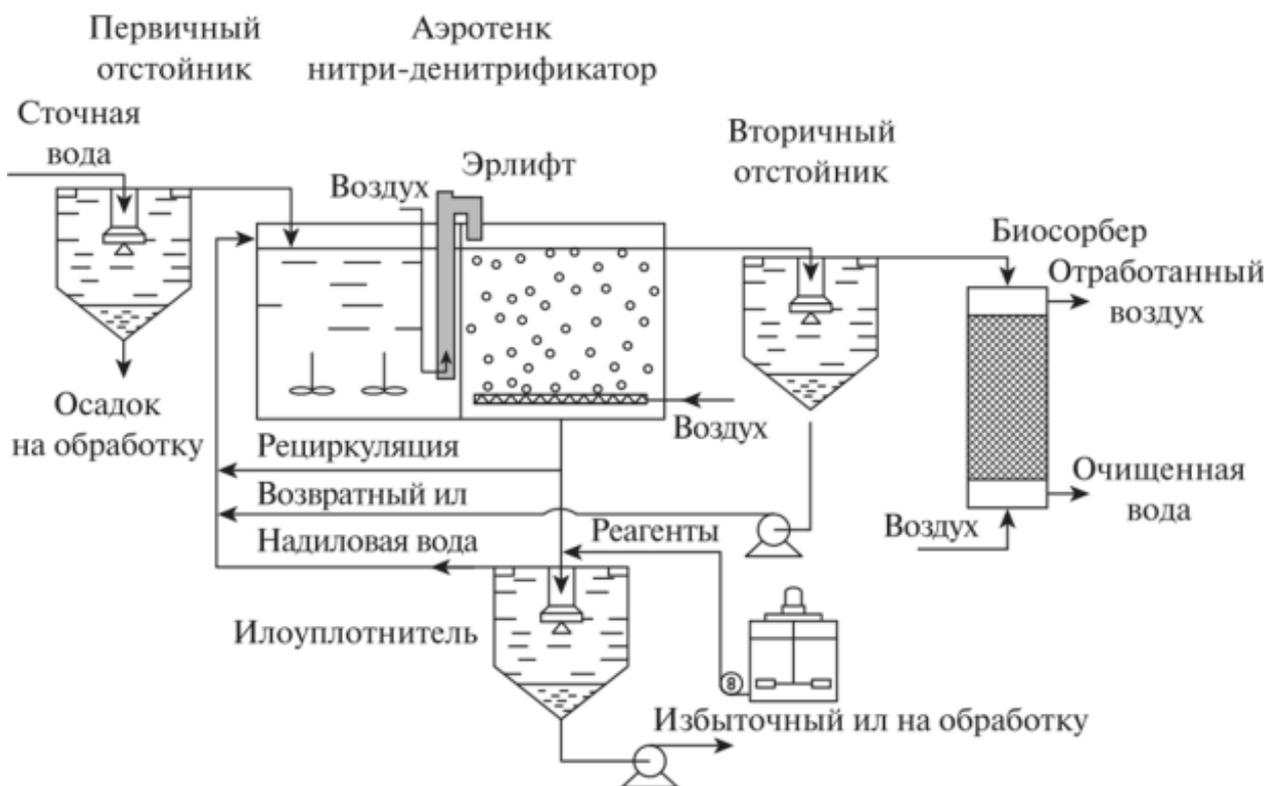


Рисунок 2 – Основная используемая технологическая схема физико-химической очистки вод промышленных предприятий

«Оборудование блока доочистки предназначено для подачи биологически очищенных сточных вод на барабанные сетки, где улавливаются взвешенные вещества на барабанных сетках размером более 1,0 мм и отфильтровывания на песчаных фильтрах взвешенных веществ размером менее 1,0 мм.

После песчаных фильтров доочищенные отфильтрованные сточные воды по трубопроводу самотеком поступают в камеру № 34, где подвергаются обеззараживанию гипохлоритом натрия. Гипохлорит натрия подается по полиэтиленовому трубопроводу от хлораторной станции.

Из камеры № 34 часть вод самотеком по трубопроводу Ду 800 мм поступает в самотечный коллектор Ду 1000 мм для сброса на насосную станцию № 6, а часть по трубопроводу Ду 1500 мм самотеком уходит в резервуар чистой воды» [39].

«Из резервуара чистой воды очищенные, обеззараженные сточные воды насосами №№ 1, 2, 3 откачиваются по двум напорным трубопроводам Ду1000 мм на насосную станцию № 3 ОАО «Тольяттиазот», а часть сточных вод насосами №№ 4,5,6 подается на промывку песчаных фильтров.

Производственные сточные воды, содержащие загрязнения в количествах превышающих допустимые для биологических очистных сооружений, на выпуске из цехов проходят локальную очистку. Все производственные сточные воды с площадки завода направляются на узел контроля и подготовки сточных вод.

Сточные воды с минеральными загрязнениями. Сточные воды с минеральными загрязнениями от установок деминерализации, химводоочистки речной воды производств аммиака и карбамида по самотечному коллектору поступают в три барьерные емкости объемом по 4500 м³ каждая (на 5-6 часовой прием сточных вод). Работа емкости предусмотрена по следующей схеме: наполнение, лабораторный контроль, выпуск сточных вод. Из барьерных емкостей сточные воды по самотечному коллектору направляются в приемный резервуар сточных вод объединенной насосной станции. Минеральные сточные воды из приемного резервуара насосами через перемычку подаются в коллектор органических вод и смешиваясь с ними, поступают в приемную камеру участка механической и биологической очистки [30].

Сточные воды с органическими загрязнениями. В состав сооружений по очистке вод с органическими загрязнениями входят:

- аванкамеры;
- промывные емкости;
- ливневая емкость;
- аварийные емкости;
- решетки-дробилки КРД-600;
- приемный резервуар» [39].

«Производственные сточные воды с органическими загрязнениями производств аммиака, карбамида, метанола по самотечному коллектору

поступают в три аванкамеры емкостью, по 4000 м³ каждая на узле контроля и подготовки сточных вод. Работа аванкамер осуществляется, по следующей схеме: наполнение, лабораторный контроль, выпуск вод. Сточные воды, удовлетворяющие требованиям биологической очистки, из аванкамер перепускаются в приемный резервуар объединенной насосной станции. Сточные воды с органическими загрязнениями, при неудовлетворительных анализах в аванкамерах, перепускаются в резервуары-накопители: две аварийные емкости объемом 10000 м³ каждая, а при их заполнении, насосами 1КН, 2КН перекачиваются из аварийных емкостей в промывные емкостью по 10000 м³ каждая» [39].

«Физико-химические методы играют значительную роль при очистке производственных сточных вод. Они применяются как самостоятельно, так и в сочетании с механическими, химическими и биологическими методами. В последние годы область применения физико-химических методов очистки расширяется, а доля их среди других методов очистки возрастает [50].

К физико-химическим методам очистки относятся коагуляция, флокуляция, сорбция, флотация, экстракция, ионный обмен, гиперфильтрация, диализ, эвапорация, выпаривание, испарение, кристаллизация, магнитная обработка, а также методы, связанные с положением электрического поля - электрокоагуляция, электрофлотация [46].

Коагуляция. Коагуляция – это сближение частиц коллоидной системы при их столкновениях в процессе теплового движения, перемешивания или направленного перемещения во внешнем силовом поле. В результате коагуляции образуются агрегаты – более крупные (вторичные) частицы, состоящие из скопления мелких (первичных). Первичные частицы в таких агрегатах соединены силами межмолекулярного взаимодействия непосредственно или через прослойку окружающей (дисперсионной) среды. Коагуляция сопровождается прогрессирующим укрупнением частиц и уменьшением их общего числа в объеме дисперсионной среды (в нашем

случае – жидкости). Слипание однородных частиц называется гомокоагуляцией, а разнородных – гетерокоагуляцией» [39].

«Сорбция. Сорбция – это процесс поглощения вещества из окружающей среды твердым телом или жидкостью. Поглощающее тело называется сорбентом, а поглощаемое – сорбатом. Различают поглощение вещества всей массой жидкого сорбента (абсорбция) и поверхностным слоем твердого или жидкого сорбента (адсорбция). Сорбция, сопровождающаяся химическим взаимодействием сорбента с поглощаемым веществом, называется хемосорбцией» [15].

«Флотация. Флотация – процесс молекулярного прилипания частиц флотируемого материала к поверхности раздела двух фаз, обычно газа (чаще воздуха) и жидкости, обусловленный избытком свободной энергии поверхностных пограничных слоев, а также поверхностными явлениями смачивания [22].

Процесс очистки производственных сточных вод, содержащих ПАВ, нефть, нефтепродукты, масла, волокнистые материалы, методом флотации заключается в образовании комплексов «частицы-пузырьки», всплывании этих комплексов и удалении образовавшегося пенного слоя с поверхности обрабатываемой жидкости. Прилипание частицы, находящейся в ней, к поверхности газового пузырька возможно только тогда, когда наблюдается несмачивание или плохое смачивание частицы жидкостью» [15].

«Экстракция. При относительно высоком содержании в производственных сточных водах растворенных органических веществ, представляющих техническую ценность (например, фенолы и жирные кислоты), эффективным методом очистки является экстракция органическими растворителями – экстрагентами. Экстракционный метод очистки производственных сточных вод основан на распределении загрязняющего вещества в смеси двух взаимонерастворимых жидкостей соответственно его растворимости в них. Отношение взаимно уравнивающихся концентраций в двух несмешивающихся (или слабосмешивающихся)

растворителях при достижении равновесия является постоянным и называется коэффициентом распределения.

Ионный обмен. Гетерогенный ионный обмен, или ионообменная сорбция – процесс обмена между ионами, находящимися в растворе, и ионами, присутствующими на поверхности твердой фазы – ионита.

Очистка производственных сточных вод методом ионного обмена позволяет извлекать и утилизировать ценные примеси (соединения, мышьяка, фосфора, а также хром, цинк, свинец, медь, ртуть и другие металлы), ПАВ и радиоактивные вещества, очищать сточную воду до предельно допустимых концентраций с последующим ее использованием в технологических процессах или в системах оборотного водоснабжения [9,25].

Электродиализ. Электродиализ – процесс сепарации ионов солей, осуществляемый в мембранном аппарате под действием постоянного электрического тока, применяемый для опреснения высокоминерализованных сточных вод» [39].

Перечень методов обработки сточных вод представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Физико-химические методы очистки сточных вод

1.2 Описание предлагаемой технологической схемы физико-химической очистки вод промышленных предприятий

«Эффективность работы очистных сооружений производственных вод всегда актуальна. Кроме того, водоемам страны наносится существенный ущерб, последствия которого непредсказуемы.

Расширение и увеличение производительности функционирования очистных сооружений на предприятиях химической промышленности, один из главных факторов улучшения состояния окружающей природной среды, защиты и сохранения водоемов от различных примесей [37,54].

Установки физико-химической очистки применяются для обезвреживания промышленных сточных вод предприятий химической промышленности. Составом физико-химических очистных сооружений являются такие стоки как, от хозяйственно бытовой деятельности и стоки сложного комбинированные. С производственной площадки предприятия для стабилизации и регулирования процесса очистки на оптимальном уровне большое значение имеют локальные очистные сооружения, которые позволяют улучшить условия работы физико-химических очистных сооружений» [4].

Поступление вод осуществляется от производства капролактама в приемную камеру, стоки с повышенным загрязнением попадают в некондиционные стоки, в которой осуществляется гидроперемешивание с реагентом. В зависимости от загрязнений схемы очистки отличаются [6].

Стоки аммоний содержащие (NH_4^+) подготавливаются и очищаются по схеме (рисунок 4): приемная камера → распределительный лоток → усреднитель → контрольные емкости → насосы → нитрификатор → вторичные отстойники → денитрификатор.



Рисунок 4 – Схема очистки аммоний содержащих стоков

Стоки нитрат содержащие подготавливаются и очищаются по схеме (рисунок 5): приемная камера → распределительный лоток → усреднитель → контрольные емкости → насосы → денитрификатор → вторичные отстойники → аэротенк → вторичные отстойники → биореакторы → насос → УФ-установка → ВОЦ производства капролактама [1].

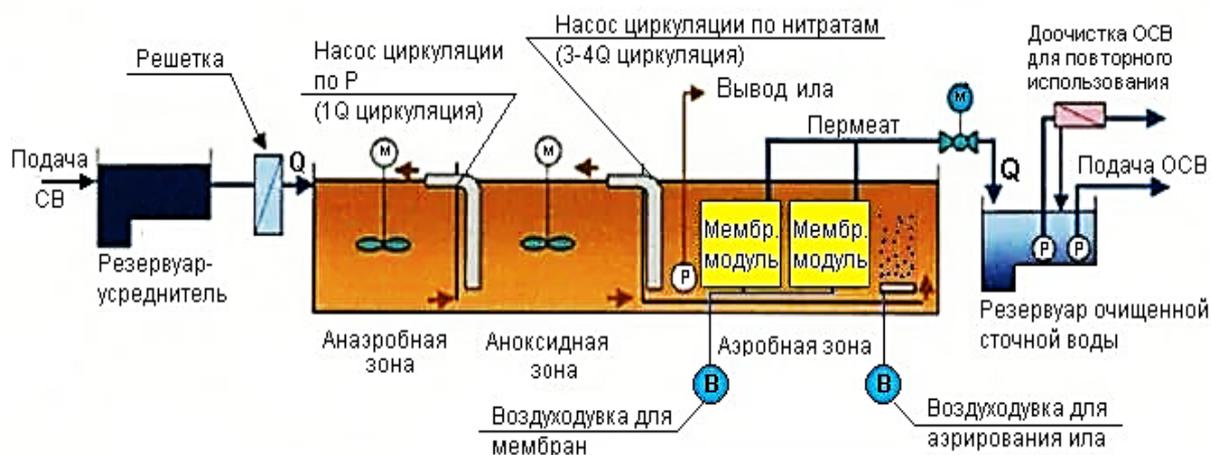


Рисунок 5 – Схема очистки нитрат содержащих стоков

1.3 Выбор и расчет оборудования физико-химической очистки вод промышленных предприятий

Физико-химическая очистка промышленных сточных вод является ключевым этапом интегрированной технологии водоочистки, направленной

на снижение нагрузки на биологическую систему и обеспечение соответствия сточных вод установленным нормативным требованиям. Сложный состав сточных вод, наличие устойчивых загрязнителей (тяжелые металлы, нефтепродукты), а также высокое разнообразие по объему и концентрациям требуют многоступенчатого подхода и точного подбора оборудования.

Основные принципы выбора и расчета оборудования:

- цель физико-химической очистки: физико-химическая стадия выполняет функцию буфера и фильтра между грубой механической очисткой и биологической обработкой, удаляя наиболее токсичные, неразлагаемые или ингибирующие вещества;
- основные этапы физико-химической очистки: коагуляция и флокуляция (применение реагентов для агрегирования и удаления коллоидных частиц, нефтепродуктов, взвешенных веществ).
- реагентное осаждение тяжёлых металлов (использование извести или сульфида натрия).
- обезвоживание осадка (ленточные или камерные фильтр-прессы).
- сорбционная очистка (активированный уголь, цеолиты) для удаления трудноудаляемых органических веществ.
- коррекция pH для оптимизации последующих биологических процессов.
- напорная или безнапорная флотация DAF для тонкодисперсных загрязнителей.

Критерии оценки технологической схемы:

- качество очистки: достижение контрольных показателей на выходе из физико-химического блока: снижение взвешенных веществ (80-90%), удаление тяжелых металлов до ПДК, уменьшение ХПК (30-50%), удаление нефтепродуктов (< 0.3 мг/л) [35];

- минимизация количества реагентов: оптимизация дозировки коагулянтов и флокулянтов с использованием автоматических систем дозирования;
- минимизация нового оборудования: предпочтение блочно-модульному оборудованию, интегрируемому в существующие схемы (вертикальные/горизонтальные отстойники с встроенной флокуляцией, универсальные станции смешивания и дозирования реагентов, модули сорбции);
- минимизация затрат на модернизацию: разработка систем с использованием имеющихся строительных объемов, надземная установка модулей с минимальным вмешательством в существующие коммуникации.

Роль физико-химической очистки в общей концепции. Физико-химическая очистка обеспечивает:

- снижение токсичности воды перед подачей в биореакторы;
- уменьшение биоудельной нагрузки на активный ил;
- предотвращение ингибирования микрофлоры;
- выравнивание состава сточных вод по температуре, рН, окисляемости.

Физико-химическая очистка сточных вод промышленных предприятий критически важна для эффективного выполнения последующих этапов: биологической денитрификации, работы мембранного биореактора (MBR) и мембранной фильтрации на стадии обратного осмоса [52].

Подбор и расчет оборудования для физико-химической очистки должны основываться на детальном анализе состава сточных вод с учетом интеграции в общую систему очистки.

Ключевыми параметрами при проектировании или модернизации являются: достижение требуемого качества очищенной воды, минимизация затрат на реагенты и оборудование, а также возможность установки в существующие производственные здания [2].

Физико-химическая очистка позволяет эффективно подготовить сток к биологической стадии, снизить общее загрязнение и повысить надёжность всей технологической цепочки очистки промышленных сточных вод [10].

Выводы по главе 1

Анализ возможных технологий очистки сточных вод содержащих азот и фосфор показал основные технологические решения в этой области. Выполнен анализ технологий и процессов очистки сточных вод на промышленных предприятиях химической промышленности.

В результате проделанной работы разработана технологическая схема физико-химической очистки вод промышленных предприятий. Рассмотренный вариант считается оптимальным на момент проведения исследований. Так же было проанализировано применяемое оборудование при используемой технологической схеме физико-химической очистки вод. Было принято решение о возможности модернизации используемого оборудования.

Глава 2 Технологические решения систем водоотведения, применяемые на химическом производстве ПАО «КуйбышевАзот»

Для данного химического предприятия предусмотрены системы с предварительно локальной очисткой.

Необходимость возникла в случае невозможности направления стоков в цикл оборотного водоснабжения или на последующие очистные сооружения без предварительной очистки, а также для извлечения ценных примесей конкретного производства.

«В связи с этим ПАО «КуйбышевАзот» осуществляет очистку промышленных и бытовых стоков в цехе №39 «Переработка органических и неорганических продуктов», как и большинство предприятий данного промышленного узла города, осуществляет отвод через насосную станцию на городские биологические очистные сооружения АО «Тольяттисинтез». После очистки большая часть стоков поступает в самотечный коллектор и далее в Саратовское водохранилище [33].

Другая часть сточных вод попадает по напорному трубопроводу через насосную станцию №3 Северного промузла и далее через рассеивающий выпуск в Саратовское водохранилище.

ПАО «КуйбышевАзот» имеет два вида стоков (рисунок 6):

- слабозагрязненные, состоящие из дождевой и талой воды, а также слив с водооборотных циклов в количестве 24000 т/сутки которые без очистки сбрасываются в водоем через систему водоотведения;
- химически грязные стоки от технологических процессов в количестве 1200 т/сутки, проходящие локальные очистные сооружения на предприятии и отправляющиеся на городские биологические очистные сооружения» [39].

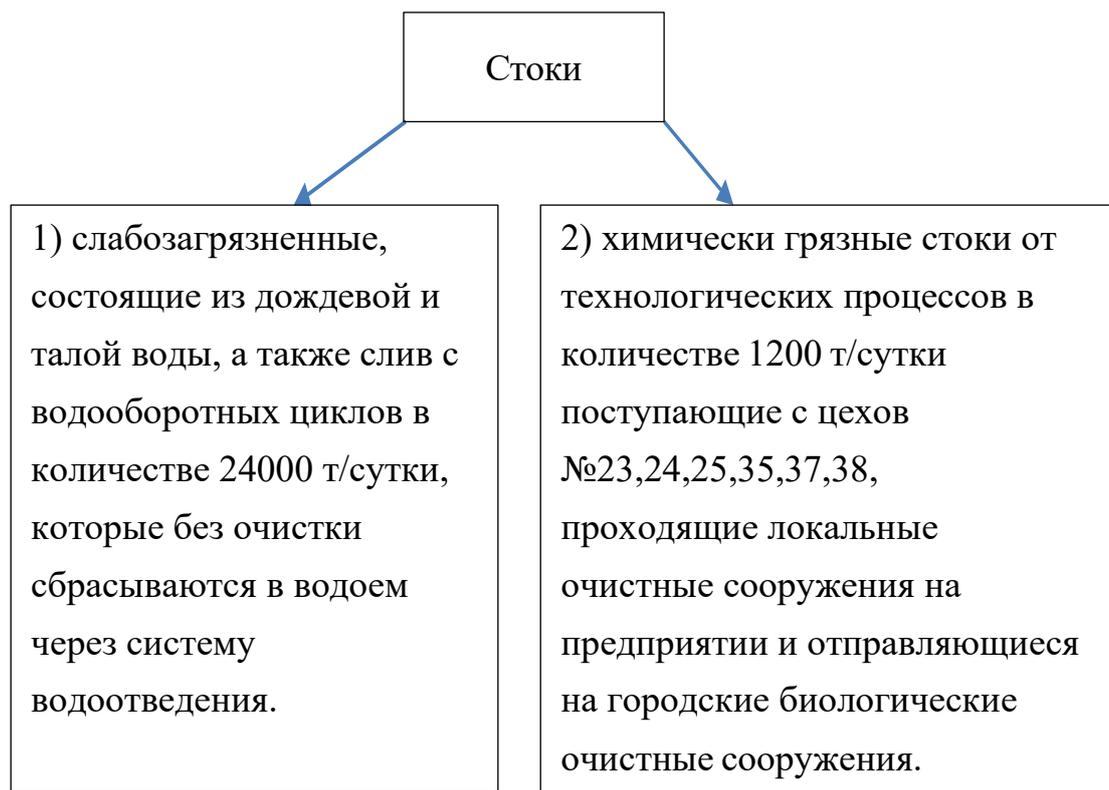


Рисунок 6 – Схема стоков ПАО «КуйбышевАзот»

«Производство капролактама, как любой органический синтез, представляет собой в экологическом отношении проблемный процесс: на 1 тонну получаемого продукта образуется около 12 м³ сточных вод с весьма сложным составом загрязнений. Поэтому необходима предварительная очистка стоков производства до их отправки на городские биоочистные сооружения. Именно для этого и был создан в структуре производства капролактама цех №39. Очистные сооружения цеха №39 введены в эксплуатацию в 1989 г.» [34,39]. Назначение – переработка органических и неорганических соединений производства капролактама на установке нитриденитрификации прмстоков производства капролактама (НДФ), по технологической схеме биологической очистки сточных вод методом нитриденитрификации азотных соединений (рисунок 7).

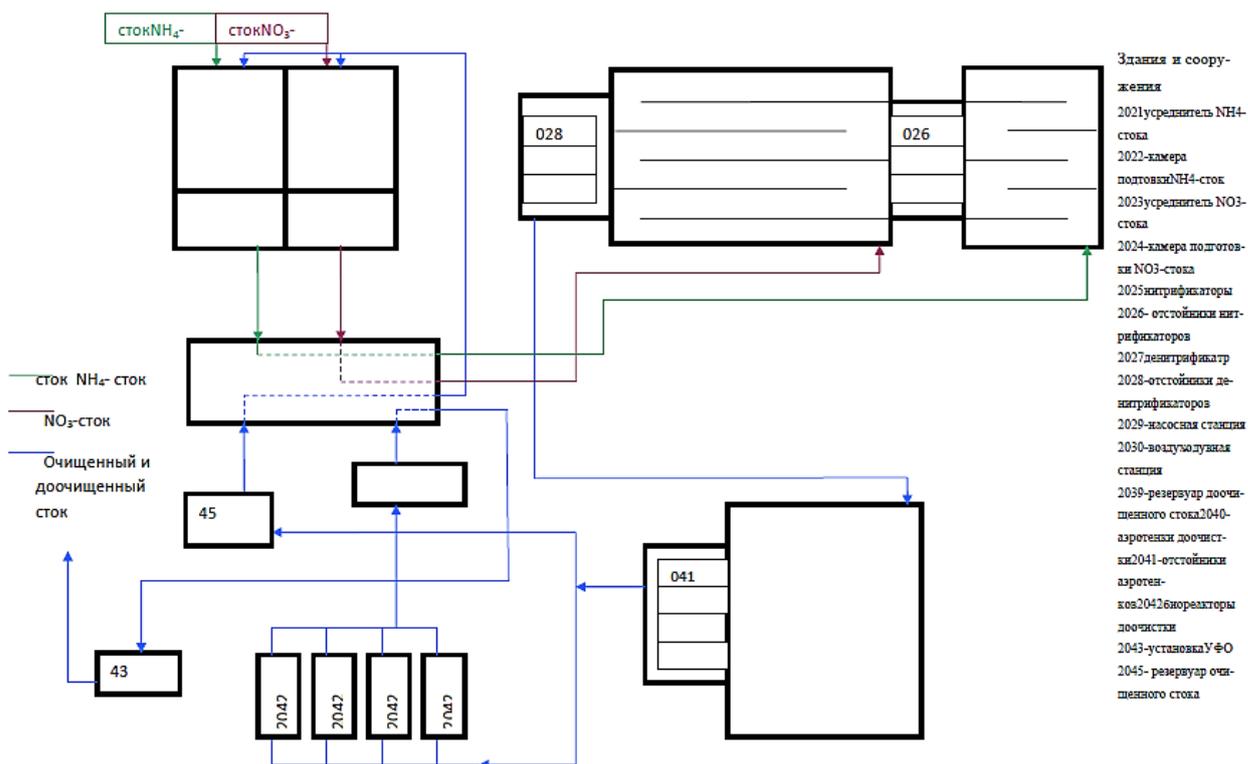


Рисунок 7 – Схема очистных сооружений. Цех №39

Установка нитриденитрификации промстоков производства капролактама состоит из одной технологической нитки. «Метод очистки промстоков основан на минерализации органических загрязнений при помощи биохимических процессов, на биологическом окислении аммонийного азота до нитратного и последующего биохимического восстановления нитратного азота до свободного за счет окисления органического вещества кислородом нитратов» [7,49].

2.1 Основные технологические задачи цеха

Цех по очистке сточных вод промышленного предприятия выполняет важную функцию в обеспечении экологической безопасности производства и соблюдении нормативных требований к сбросу сточных вод. Его основными задачами являются обеспечение стабильной работы всех этапов очистки, достижение высокого качества очищенной воды, а также внедрение

инновационных подходов и повышение технического уровня производственного процесса. В рамках функционирования цеха можно выделить две ключевые технологические задачи, которые определяют его структуру, состав оборудования и подходы к эксплуатации [28].

Регулирование процесса сброса стоков через установку нитриденитрификации.

Одной из центральных задач цеха является обеспечение эффективного регулирования состава и объема сбрасываемых сточных вод. Для этого применяется технология нитрификации-денитрификации, которая представляет собой двухстадийный биологический процесс, направленный на удаление соединений азота, в первую очередь аммонийного (NH_4^+) и нитратного (NO_3^-) азота. Эта технология жизненно важна для снижения негативного воздействия на водные экосистемы и соответствия санитарным и экологическим нормам [34].

Нитрификация. На первой стадии под действием аэробных бактерий (*Nitrosomonas* и *Nitrobacter*) происходит последовательное окисление аммония сначала в нитрит (NO_2^-), а затем в нитрат. Процесс требует строго контролируемого поступления кислорода и оптимальной температуры воды. Эффективность нитрификации зависит от параметров среды, таких как pH, температура, наличие токсичных веществ и концентрация растворённого кислорода. Именно в этой зоне формируются условия для преобразования токсичных форм азота в менее опасные.

Денитрификация. Вторая стадия – анаэробное восстановление нитратов до элементарного азота (N_2), который выводится в атмосферу в виде газа. Для запуска этого процесса требуется отсутствие кислорода и наличие легкоокисляемого органического субстрата (например, метанола или уксусной кислоты). Используемые микроорганизмы, в основном рода *Pseudomonas*, осуществляют восстановление нитратов, что позволяет минимизировать содержание азота в очищенных сточных водах (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры работы установки нитриденитрификации

Показатель	Единица	Оптимальное значение
Время удержания в нитрификаторе	ч	6–8
Концентрация DO (растворённый O ₂)	мг/л	2,0–3,0
Температура	°С	20–30
рН среды	-	6,5–7,5
Снижение NH ₄ ⁺	%	≥ 90
Эффективность удаления N _{общ}	%	75–85

Задача цеха — обеспечить устойчивый и сбалансированный режим работы установки нитриденитрификации, минимизируя колебания параметров входящего потока, автоматизируя контроль дозировки реагентов и управляя режимами аэрации и перемешивания. При этом используются датчики кислорода, системы мониторинга температуры, а также датчики уровня и концентрации азотсодержащих соединений. Регулирование осуществляется по показаниям в реальном времени, что обеспечивает высокий уровень надёжности и своевременное вмешательство в случае отклонений.

Кроме того, установка нитриденитрификации должна быть адаптирована к переменному составу промышленных стоков, что требует гибкости технологической схемы, наличия буферных ёмкостей и возможности ручного или автоматического переключения режимов.

Повышение технического уровня производства на основе совершенствования технологии очистки.

Современное предприятие не может ограничиваться только поддержанием работоспособности оборудования. Необходим постоянный процесс модернизации и внедрения инноваций, которые позволяют значительно повысить эффективность, сократить затраты и соответствовать ужесточающимся экологическим требованиям. Вторая ключевая задача цеха

заключается в повышении технического уровня технологического процесса за счёт применения передовых методов очистки, современного оборудования и систем управления.

Технологические направления модернизации:

- внедрение мембранных технологий. Применение мембранных биореакторов (MBR) позволяет значительно улучшить качество разделения иловой смеси, добиться почти полной задержки взвешенных веществ и уменьшить микробиологическое загрязнение. Мембранные установки компактны, энергоэффективны и позволяют достичь высокого уровня автоматизации [11];
- использование систем обратного осмоса. На завершающей стадии доочистки всё чаще применяются установки обратного осмоса, которые удаляют растворённые соли, тяжелые металлы и остаточные органические соединения. Это позволяет получить воду, пригодную для повторного использования (технические нужды, оборотное водоснабжение), что способствует экономии ресурсов и снижению объема сброса;
- автоматизация процессов управления. Современные очистные сооружения оснащаются автоматизированными системами управления технологическим процессом (АСУ ТП). Они позволяют дистанционно управлять работой насосов, дозирующих устройств, регуляторов и систем аэрации. Программное обеспечение обеспечивает архивирование данных, автоматическое формирование отчетов, контроль аварийных ситуаций и прогнозирование работы системы на основе математических моделей;
- интеграция с цифровыми платформами (SCADA-системами). Использование SCADA даёт возможность осуществлять централизованное управление и контроль за всеми участками очистных сооружений, в том числе визуализацию всех

технологических параметров, адаптацию работы оборудования под реальные нагрузки и прогнозируемые поступления;

- энергоэффективность и экологичность. При выборе оборудования и технологии приоритет отдается решениям, которые позволяют снизить потребление электроэнергии, минимизировать использование реагентов и обеспечить утилизацию образующихся отходов – в частности, использование выпарных установок или шламонакопителей для концентратов обратного осмоса [11].

Комплексный эффект от реализации задач.

Выполнение двух ключевых технологических задач – управления сбросом через нитриденитрификацию и постоянного повышения технического уровня цеха — обеспечивает:

- достижение стабильного и высокого качества очистки сточных вод;
- снижение эксплуатационных затрат;
- гибкость адаптации к изменяющимся условиям производства;
- повышение экологической ответственности предприятия;
- соответствие международным стандартам экологической безопасности [28].

Кроме того, модернизация позволяет использовать очищенную воду повторно, что особенно актуально в условиях дефицита пресной воды, а также существенно уменьшает антропогенную нагрузку на водоемы.

Таким образом, основные технологические задачи цеха по очистке сточных вод заключаются не только в контроле за текущими параметрами и предотвращении нарушений нормативов, но и в непрерывном совершенствовании применяемых технологий. Только комплексный и прогрессивный подход, объединяющий биологические, физико-химические, мембранные и цифровые технологии, может обеспечить экологическую устойчивость промышленного предприятия в условиях современных реалий.

2.2 Технологическая схема очистки промышленных сточных вод цеха переработки органических и неорганических соединений

Очистка сточных вод, образующихся в результате переработки органических и неорганических соединений, представляет собой многоступенчатый процесс, направленный на снижение содержания вредных примесей, обеспечение экологической безопасности и соблюдение нормативов сброса. Такие сточные воды характеризуются высокой концентрацией органических веществ, минеральных солей, токсичных соединений (в том числе азотсодержащих, сульфатов, тяжелых металлов), значительными колебаниями по составу и объему, что требует применения сложных технологических решений.

В данной главе рассмотрена типовая технологическая схема очистки сточных вод, реализуемая в цехе переработки органических и неорганических соединений, с описанием основных стадий и элементов.

Поступление сточных вод.

«Сточные воды поступают на очистные сооружения по промышленным трубопроводам из различных участков цеха: аппаратурной зоны, участков промывки, синтеза, транспортировки, а также из санитарно-бытовых помещений. На этом этапе осуществляется первичный учет объема, температуры, кислотности и химического состава воды» [51].

Сточные воды могут поступать отдельными потоками (органический, неорганический, условно чистый) или в виде смешанного потока — в зависимости от конфигурации производственного процесса.

Направление потоков.

В соответствии с заранее определенной программой водоочистки, сточные воды поступают в блок приемно-распределительных емкостей, где происходит разделение и перенаправление по технологическим цепочкам. На этом этапе могут использоваться:

- автоматизированные заслонки;
- насосные станции;
- гравитационные распределительные лотки.

Разделение потока обеспечивает оптимизацию нагрузки на отдельные узлы схемы: например, воды с повышенным содержанием азота подаются на блоки нитрификации/денитрификации, а воды с высоким содержанием механических примесей — на предварительную механическую очистку.

Усреднители.

Усреднители служат для выравнивания состава и расхода сточных вод, смягчения пиковых нагрузок и стабилизации температурного режима. Это емкости объемом от нескольких сотен до нескольких тысяч кубометров, оснащенные:

- перемешивающими устройствами;
- датчиками рН и температуры;
- системой регулирования подачи воды на следующие стадии.

Усреднение позволяет обеспечить стабильность в работе чувствительных процессов — особенно нитрификации и биореакторов.

Контрольные емкости.

После усреднителей сточные воды поступают в контрольные емкости, в которых:

- берутся пробы для анализа (рН, ХПК, БПК, концентрация азота, фосфора, металлов);
- осуществляется автоматическая коррекция состава (нейтрализация, подача реагентов);
- регулируется подача в аэротенки по заданной программе.

Это позволяет обеспечить точную дозировку кислорода, углеродных субстратов и других реагентов в биологических блоках.

Аэротенки-нитрификаторы.

На этом этапе реализуется первая биологическая стадия — окисление аммонийного азота в нитриты и нитраты (процесс нитрификации). Аэротенки-нитрификаторы работают в аэробных условиях и оснащены:

- аэрационными системами (мелкопузырьковые диффузоры);
- датчиками растворенного кислорода;
- системой рециркуляции активного ила.

Бактерии *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* обеспечивают биохимическое превращение азота. Оптимальная температура – 20–30°C, концентрация DO – 2–3 мг/л.

Отстойники нитрификаторов.

После аэротенков смесь подается во вторичные отстойники, где происходит отделение активного ила от очищенной воды. Ил частично возвращается в аэротенки, частично – направляется на уплотнение. Очищенная вода поступает на следующую стадию – денитрификацию.

Аэротенки-денитрификаторы.

Данная стадия – анаэробное восстановление нитратов до молекулярного азота. В процессе участвуют факультативно-анаэробные микроорганизмы (*Pseudomonas*, *Bacillus*), которым необходим источник углерода – обычно добавляется уксусная кислота, этанол или метанол. Аэрация отсутствует, обеспечивается перемешивание и поддержание температуры 25–35°C.

Отстойники денитрификаторов.

После денитрификации происходит повторное отстаивание воды. Осадок утилизируется или возвращается в зону активного ила. Очищенная вода, в которой уже снижено содержание азота и органики, направляется на доочистку.

Аэротенки доочистки.

На этом этапе завершается удаление остаточной органики, БПК и взвешенных веществ. Доочистка осуществляется в аэробных условиях. Это

обеспечивает дополнительную минерализацию органики и стабилизацию состава сточных вод перед финальной стадией.

Аэротенки доочистки оснащены:

- системами кислородной аэрации;
- программным управлением циклов очистки;
- дозаторами питательных веществ (при необходимости).

Отстойники доочистки.

В этих отстойниках завершается гравитационное отделение остаточного активного ила. Осветлённая вода направляется на блок биореакторов, а осадок поступает в систему обработки осадков.

Биореакторы.

В биореакторах происходит глубокая биологическая доочистка с участием аэробных и анаэробных микроорганизмов. Используются мембранные биореакторы (MBR), сочетающие биологическую очистку и мембранную фильтрацию [56]. Это позволяет достигать:

- почти полного удаления взвешенных веществ (до 99%);
- удаления остаточной органики и микрозагрязнителей;
- высокой степени прозрачности воды.

УФ-обеззараживание.

Очищенная вода подвергается ультрафиолетовому обеззараживанию, устраняя остаточную микрофлору (бактерии, вирусы). Это экологически безопасная и энергоэффективная альтернатива хлорированию.

УФ-обеззараживание происходит в проточных установках с кварцевыми лампами. Система автоматически регулирует дозу облучения в зависимости от прозрачности и расхода воды.

Сброс очищенных сточных вод.

После всех этапов очищенная вода либо:

- сбрасывается в водоём в соответствии с нормативами ПДК;

- повторно используется на предприятии (в оборотном водоснабжении, в технологических нуждах);
- поступает на установку обратного осмоса – в случае особых требований к качеству.

Сгущение осадков.

Осадок, образующийся на различных стадиях, направляется в сгущающие установки (гравитационные или механические). Цель – уменьшение объема за счёт удаления воды. Содержание сухого вещества возрастает до 4–6%.

Сушка осадков.

Сгущенный осадок подвергается термической сушке в ленточных или барабанных установках. После сушки содержание сухого вещества достигает 85–90%, что позволяет:

- снизить объем и массу отходов;
- упростить транспортировку;
- использовать осадок как вторичное сырьё или топливо (в зависимости от состава).

Технологическая схема очистки сточных вод в цехе переработки органических и неорганических соединений является многоступенчатой, модульной и адаптивной. Она включает в себя этапы механической, физико-химической, биологической, мембранной и УФ-очистки, а также обработку осадков. Такая структура позволяет обеспечить высокую эффективность удаления загрязняющих веществ, стабильную работу оборудования и соответствие самым строгим экологическим стандартам.

2.3 Анализ качества стоков на предприятии ПАО «КуйбышевАзот»

«Основными источниками образования сточных вод являются: производство капролактама и производство аммиачной селитры.

Поступающие хим. Загрязненные сточные воды представлены на рисунке

8.

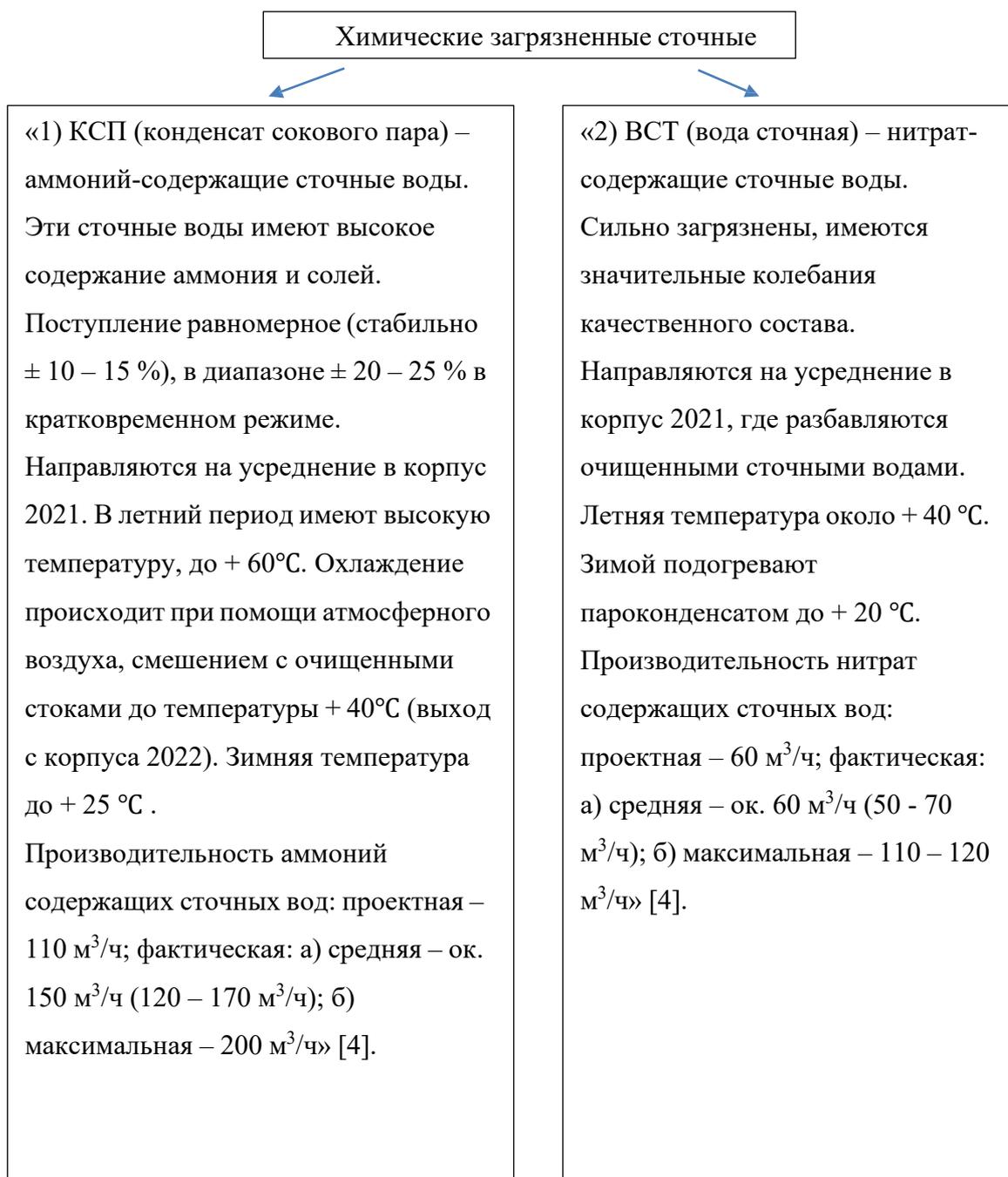


Рисунок 8 – Схема потоков химически загрязненных сточных вод

Химические количественные характеристики поступающих стоков и очищенной воды на НДСФ в соответствии с технологическим регламентом приведены на рисунке 9 и 10.

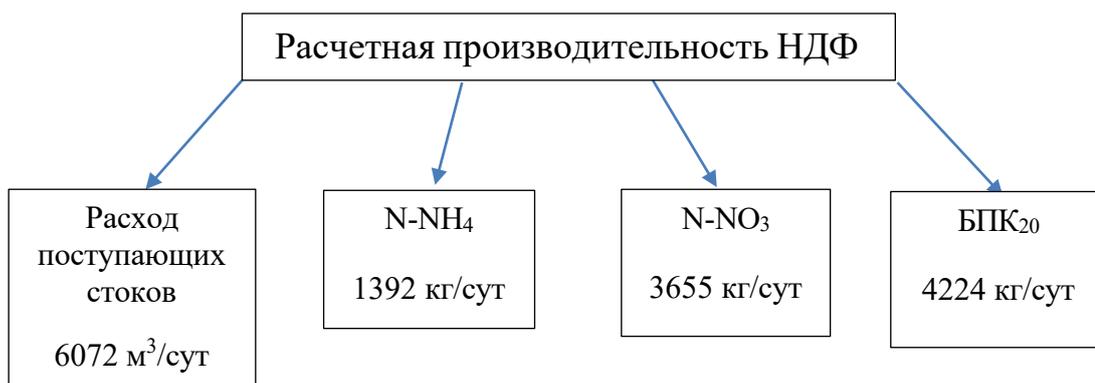


Рисунок 9 – Общие химические характеристики поступающих стоков на НДФ



Рисунок 10 – Общая характеристика остаточных загрязнений в стоках после очистки

В таблице 2 указаны химические характеристики исходных поступающих стоков, поступающих на очистные сооружения.

Таблица 2 – «Исходное сырье, материалы, полупродукты, химические элементы поступающие на очистные сооружения в сточных водах от производств» [1]

«Наименование сырья, материалов, полупродуктов»	Источник поступления	Регламентируемые показатели	Норматив
Аммоний содержащий сток	цех №25 получения сульфата аммония цех №37 получения капролактама цех №24 получения капролактама цех №3 получения аммиачной селитры	рН	н/б 11
		N-NH ₄	н/б 400 мг/дм ³
		N-NO ₃	н/б 100 мг/дм ³
		Сульфаты	н/б 500 мг/дм ³
		Капролактамы	н/б 0,78 мг/дм ³
		Взвешенные вещества	н/б 300 мг/дм ³

Продолжение таблицы 2

«Наименование сырья, материалов, полупродуктов»	Источник поступления	Регламентируемые показатели	Норматив
		БПК ₅	н/б 200 мгО/дм ³
		ХПК	н/б 340 мгО/дм ³
Нитрат содержащий сток	цех №38 получения гидроксиламинсульфата цех №23 получения кальцинированной соды цех №24 получения капролактама цех №37 получения капролактама цех №22 получения циклогексанона цех №35 получения циклогексанона	рН	н/м 2
		N - NH ₄	н/б 20 мг/дм ³
		N - (+)	Доза в течение 2-х часов не более 3000, среднее 1660 мг/дм ³
		ХПК	н/б 10000 мгО/дм ³
		Капролактама	н/б 100 мг/дм ³
		Циклогексанол	н/б 20 мг/дм ³
		Циклогексанон	н/б 20 мг/дм ³
		Смолы	н/б 100 мг/дм ³
		БПК ₅	1000 ÷ 6000 мг О/дм ³
		Взвешенные вещества	н/б 300 мг/дм ³
Водно-щелочной сток	цех №35 получения циклогексанона	-	По требованиям технологического регламента 200000 - 350000 мгО ₂ /л
Ортофосфорная кислота	ГОСТ 10678-76 или аналог	-	Массовая доля ортофосфорной кислоты не менее 73%
Содовый раствор	цех №23 получения кальцинированной соды	-	Массовая доля общей щелочности в пересчете на углекислый натрий 5÷10%
Углекислый газ производство аммиака	АМ-70 цеха №11	-	Давление 0,2 ÷ 0,69 кгс/см ² объемная доля н/м 97%» [1].

«Расчетные количественные химические характеристики сточных вод, поступающих на очистные сооружения для каждого потока, представлены на рисунке 11 и 12.

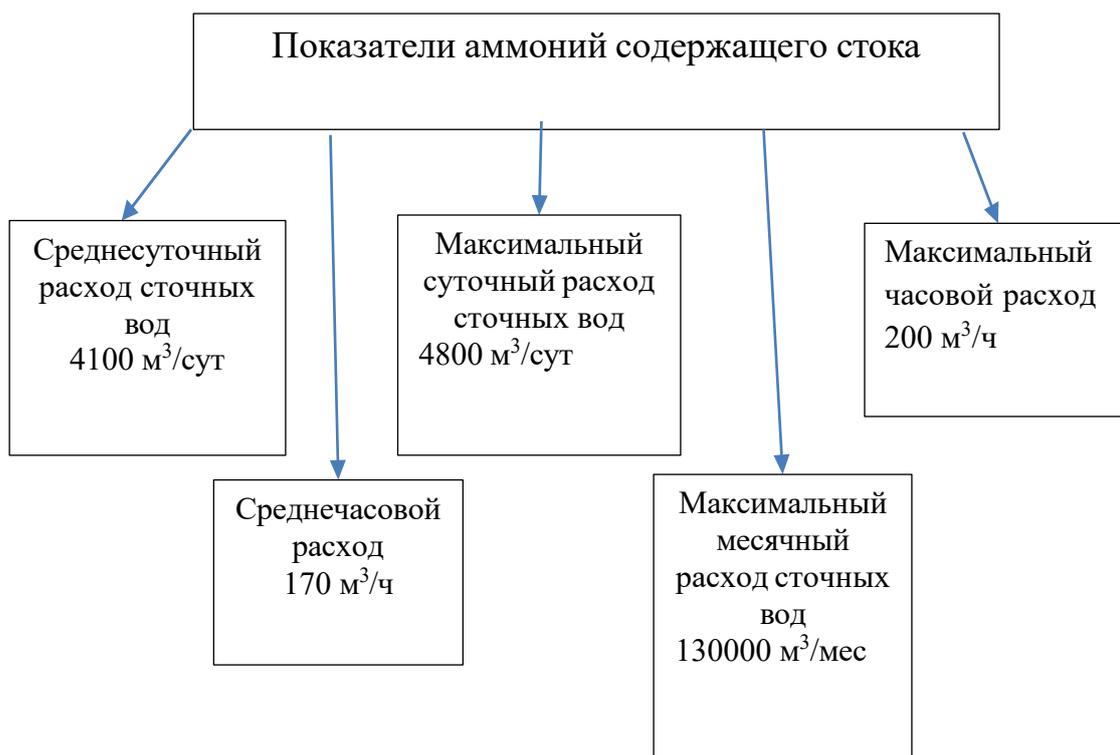


Рисунок 11 – Расчетные количественные показатели аммоний содержащего стока (КСП)

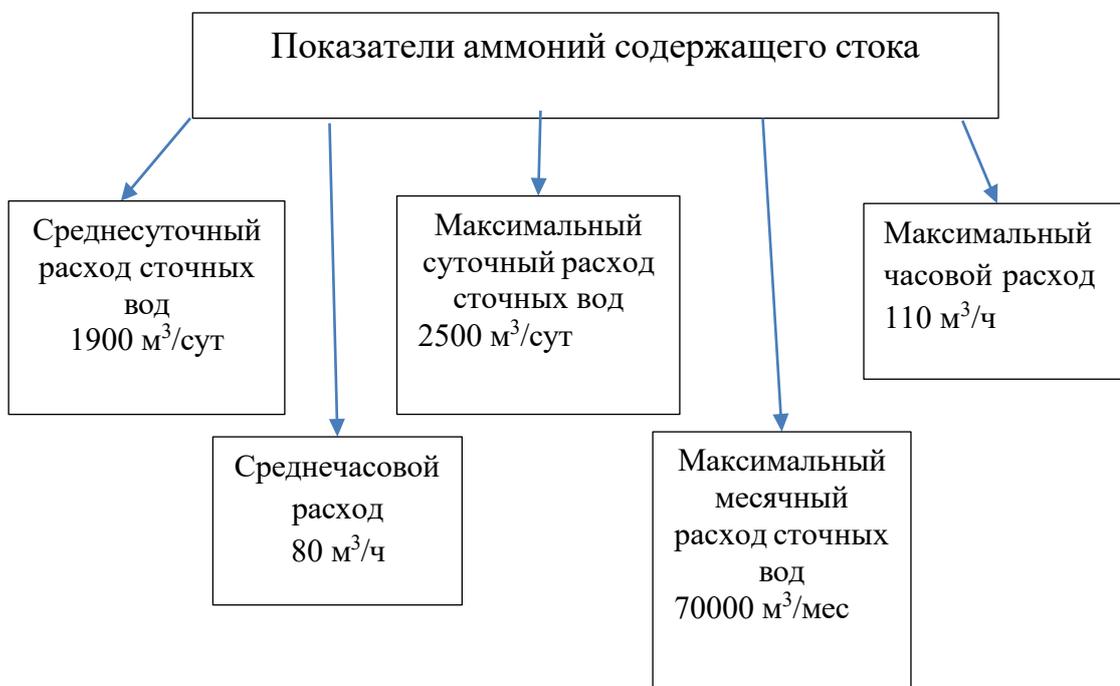


Рисунок 12 – Расчетные количественные показатели нитрат содержащего стока (ВСТ)» [3]

«Качество хим. загрязненных сточных вод (концентрация нормируемых загрязнений) должно отвечать проекту данного очистного сооружения и удовлетворять нормам, которые представлена на рисунке 13» [3,17].

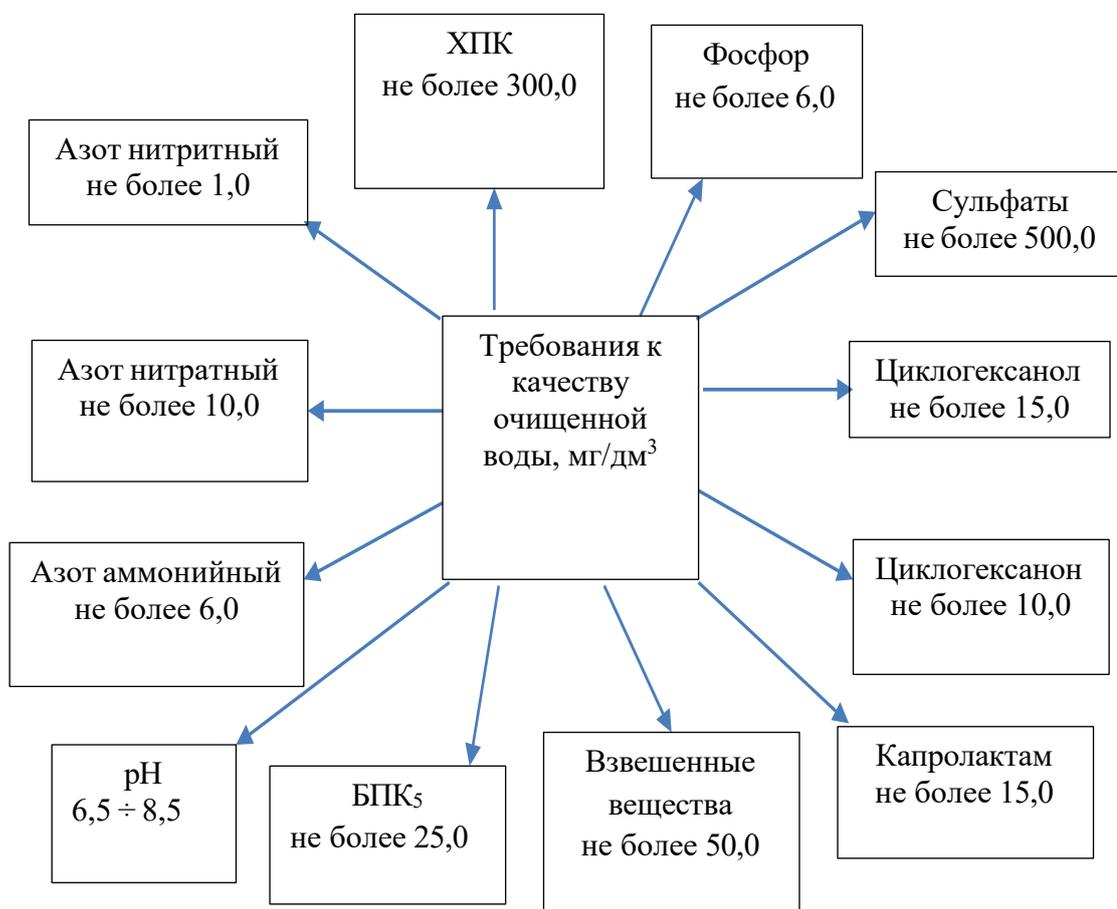


Рисунок 13 – Нормативные требования к качеству очищенной воды

«Поступающие химические загрязненные сточные воды – аммоний содержащий сток (NH₄) и нитрат содержащий сток (NO₃). Данные хим. загрязненные стоки поступают от производства капролактама, цеха №3. Их химические характеристики описаны в таблице 3» [1].

Таблица 3 – Состав загрязненных стоков КСП И ВСТ на входе в очистные сооружения

«Место отбора»	Компонент	Единица измерения	Значение	Регламент
Аммоний содержащий сток, поступление				
К. 22	рН	-	8,35	8,5
К 22	Азот аммонийный	мг/л	115,7	400,0
К 22	Азот нитратов	мг/л	43,9	100,0
К 22	ХПК	мгО ₂ /л	455,1	340,0
Нитрат содержащий сток, поступление				
К 23	рН	-	8,8	2,0
К 23	ХПК	мг О ₂ /л	8584,6	10000
К 23	Азот аммонийный	мг/л	26,9	20,0
К 23	Азот нитратов	мг/л	49,5	1 660,0
К 23	Азот нитритов	мг/л	941,0	100,0
К 23	Капролактam	мг/л	143,2	100,0
К 23	Циклогексанон	мг/л	628,1	20,0
К 23	Циклогексанол	мг/л	628,1	20,0» [3].

«Химические показатели сточной воды, прошедшей биологическую очистку на данной установке» [29] представлены на рисунке 14.

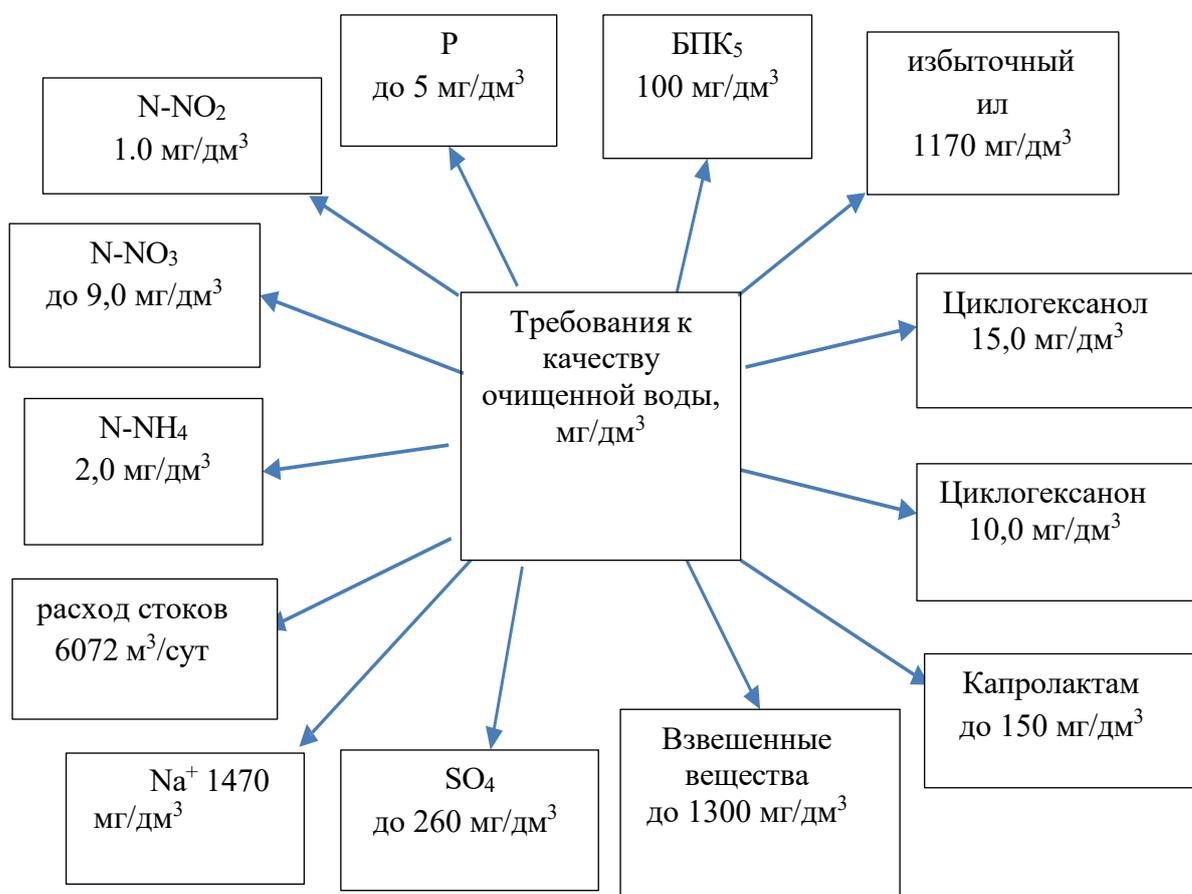


Рисунок 14 – Химические характеристики сточных вод после очистки

2.4 Негативные факторы поступающих на очистку химически загрязненных сточных вод

Химически загрязненные сточные воды, образующиеся при переработке органических и неорганических соединений, характеризуются комплексом негативных факторов, способных существенно усложнить процесс очистки. Ниже представлены основные из них, а также влияние на технологию очистки и возможные пути компенсации [19].

Высокая температура стоков в летний период.

В летний сезон температура промышленных сточных вод может достигать значений до $+60\dots+65\text{ }^{\circ}\text{C}$, особенно если источником являются горячие технологические процессы. Такая высокая температура влияет на:

- кинетику микробиологических процессов. Отдельные микроорганизмы оптимально работают при $25\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температурах выше $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ процесс нитрификации и денитрификации резко замедляется или полностью прекращается [55];
- растворимость газов. Повышенная температура снижает растворённость кислорода, что усложняет обеспечение достаточного уровня аэробных процессов;
- повышенную коррозию оборудования, особенно трубопроводов, насосов, теплообменных систем;
- термический шок оборудования. Быстрые изменения температуры создают механические напряжения и ускоряют износ конструктивных элементов.

Меры снижения влияния:

- предварительное охлаждение (например, через теплообменник, рекуператор) для снижения до оптимальных $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- буферные ёмкости с усреднением температурного режима;

- использование термоустойчивых аэрационных систем и теплоизоляции оборудования.

Высокая степень загрязнённости, выраженная в ХПК, преимущественно нитратосодержащих.

Высокие значения ХПК (химического потребления кислорода) указывают на значительную нагрузку органикой, включающую устойчивые нитратосодержащие соединения. Это несёт ряд проблем:

- увеличенное потребление кислорода, повышенные энергозатраты на аэрацию;
- эффективность БПК-процессов снижается из-за ограниченной растворимости кислорода;
- образование вторичных побочных продуктов при сбросе большого количества окисляемых веществ.

Компенсационные меры:

- использование предварительной физико-химической очистки: коагуляция, флотация, осаждение;
- флокулянты, угольная и сорбционная фильтрация;
- разделение нитратных и органических потоков, применение специализированных нитрит-денитрификаторов.

Высокие концентрации соединений азота (аммоний и нитрат).

Высокие концентрации аммония и нитратов требуют адаптированных биологических схем:

- для нитрификаторов требуются длительные времена пребывания, восполнение азота сбрасываемых потоков;
- денитрификация требует подовой подачи удобного субстрата и жесткого поддержания анаэробных зон;
- возникает риск загрязнения внешних вод аммонием при сбросе неподготовленных потоков.

Подходы:

- увеличение времени гидравлического удержания в нитрификаторах и денитрификаторах;
- использование технологий предварительной аэрации и отделения потока с высоким содержанием азота;
- дополнительная углеродная подпитка (метанол, ацетат).

Высокое солесодержание (минерализация).

Солевой состав сточных вод характеризуется повышенной удельной электропроводностью:

- соли ингибируют жизнедеятельность бактерий, особенно нитрифицирующих;
- металлоподобные ионные реакции лимитируют эффективность коагуляции;
- образование осадков и отложений в оборудовании;
- сниженный КПД электродеполяризации, особенно электродезинфекция.

Методы снижения:

- установка сорбционных модулей или сорбирующих картриджей (Na-zeolit, активированный уголь);
- обратный осмос, ион-замещение в потоке (применяется на финальных этапах);
- применение бактерий, устойчивых к Salinity (*Halomonas spp*).

Специфические загрязнители (капролактамы, циклогексанон и др.).

Присутствие капролактама, циклогексанона, смол и других специфических загрязнителей в высоких концентрациях представляет серьёзную угрозу для технологической схемы:

- нарушают структуру микрофлоры, подавляют биоразложение;
- требуют специализированных реагентов или катализаторов;
- не всегда удаляются обычными коагулянтами – требуют селективных технологий (сорбенты, катализаторы, биоремедиация).

Решения:

- установка прецизионных химических блоков (с использованием O_3 , пероксида водорода, UV-оксидация);
- биологическая деполимеризация с использованием анаэробных штаммов;
- после физико-химической обработки применение биофльтрации.

Высокая щелочность и резкие колебания рН.

Сточные воды характеризуются повышенной рН (10–12) либо резкими его перепадами:

- щелочная среда интенсифицирует коррозию металлов;
- нарушается баланс кислотно-основных реакций, критичен для процесса коагуляции;
- денитрификация часто зависит от нейтральной среды.

Контроль:

- использование буферов (диоксид углерода, растворы серной либо соляной кислоты);
- автоматическое регулирование рН в контрольных ёмкостях;
- изоляция сегментов с высоким рН.

Значительные колебания состава и расхода.

Состав сточных вод варьируется как по концентрационным параметрам, так и по объёму:

- нарушается пропорция питательных веществ (углерод-азот-фосфор);
- обуславливаются часовые и сезонные моменты с резкими сбросами;
- вызывают неэффективность биологических стадий.

Стабилизирующие подходы:

- использование больших усреднителей;
- дозирование реагентов и кислотно-щелочное регулирование по SCADA;

- применение бустерных насосов с переменной подачей и обратной связью.

Несбалансированность состава (нарушенный ВПК : N : P = 100 : 5 : 1).

Нарушения соотношения БПК:N:P вызывают:

- неспособность микрофлоры перерабатывать органику;
- ограниченный синтез макромолекул, ингибирование биоочистки;
- генерирует необходимость дозирования фосфора или углерода.

Компенсационные меры:

- обеспечение дозирования Фосфорных удобрений ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, суперфосфат);
- использование субстратов (глюкоза, метанол) для балансировки;
- контроль мессел ординации питательных элементов.

Высокая цветность сточных вод.

Перед очисткой необходимо устранение цвета:

- цвет влияет на эффективность УФ-обеззараживания — снижает пробиваемость УФ-лучей;
- представляет этап демонстрации превышения предельно допустимых норм сброса.

Устранение:

- активированный уголь, иные сорбенты;
- предварительная коагуляция со специализированными реагентами;
- противоположная УФ-обработка.

Химически загрязнённые сточные воды требуют внедрения комплексной системы адаптивного водоподготовительного цикла:

- стабилизация входящих потоков: буферные ёмкости с нормированием температуры, объёма, состава;
- разделение потоков: органические, азотсодержащие, насыщенные солями и высокощелочные струи;

- компенсация рН и солевого состава: дозирование кислот, реагентов, ион-обмен на последовательных этапах;
- интеграция современных блоков фф-обработки: УВ, О₃, каталитические и биофильтрационные ступени;
- гибкое дозирование, автоматическое управление и мониторинг.

Таким образом, очистка химически загрязнённых сточных вод характеризуется множеством негативных факторов — температурные нагрузки, высокая степень загрязнений, солесодержание, рН-флуктуации, цветность и несбалансированность питательных веществ. Эффективная технология очистки должна структурно подавлять каждый из этих факторов, обеспечивая стабильное качество очищенной воды и устойчивую работу оборудования. Ключевым является адаптивное, гибкое управление на основе современных методов водоподготовки и высокой степени автоматизации [3,21].

2.5 Технологические особенности очистки химически загрязнённых сточных вод

Технологические особенности очистки химически загрязнённых сточных вод:

- применение недостаточно очищенных сточных вод для разбавления поступающих стоков приводят к зашламованности усреднителей и контрольных емкостей;
- конструкция отстойников не лучшим образом приспособлена для отведения ила, что снижает массу перекачиваемого возвратного ила (рисунок 15);
- при высоких концентрациях загрязнений не предусмотрена регенерация активного ила;
- сооружения доочистки в биореакторах с прикрепленной микрофлорой не эффективны;
- не предусмотрена подача воздуха в усреднители.

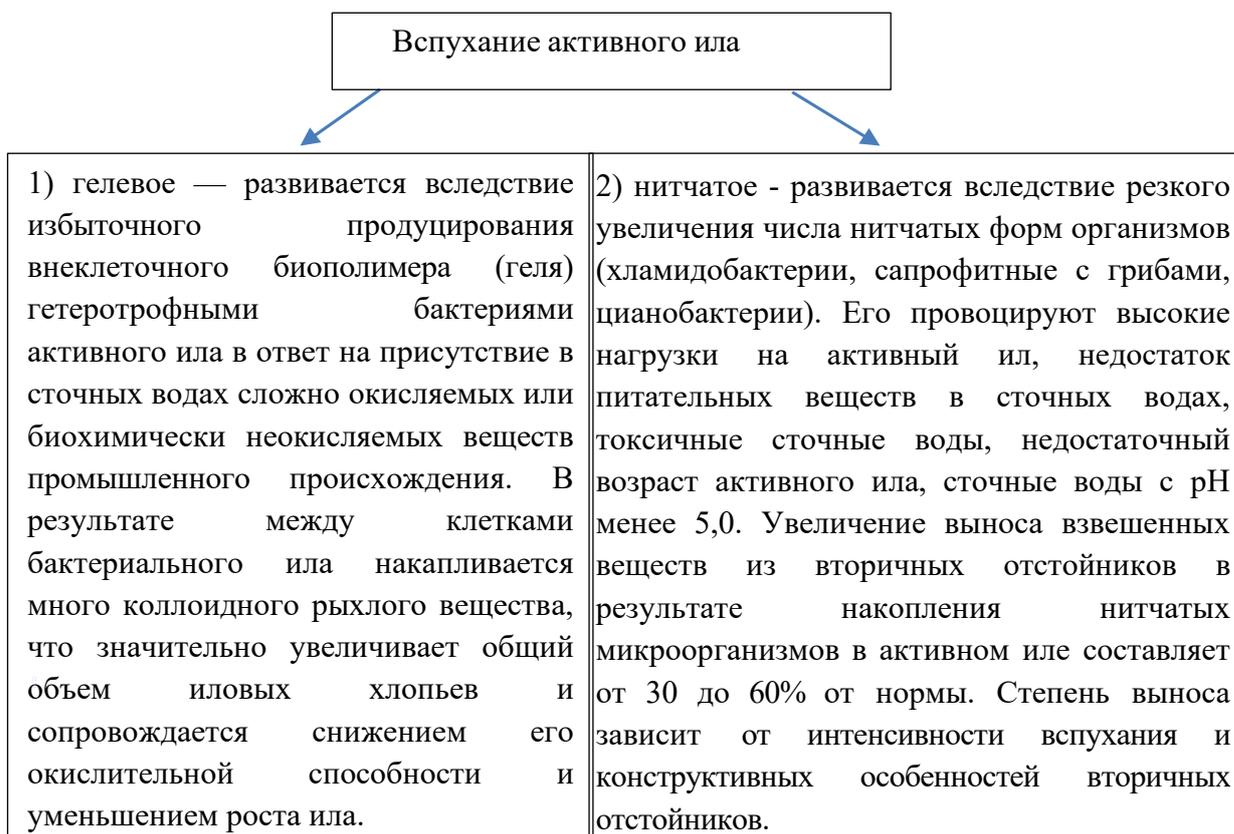


Рисунок 15 – Качественные показатели изменения активного ила

Причины некачественных аэрационных условий представлены на рисунке 16.

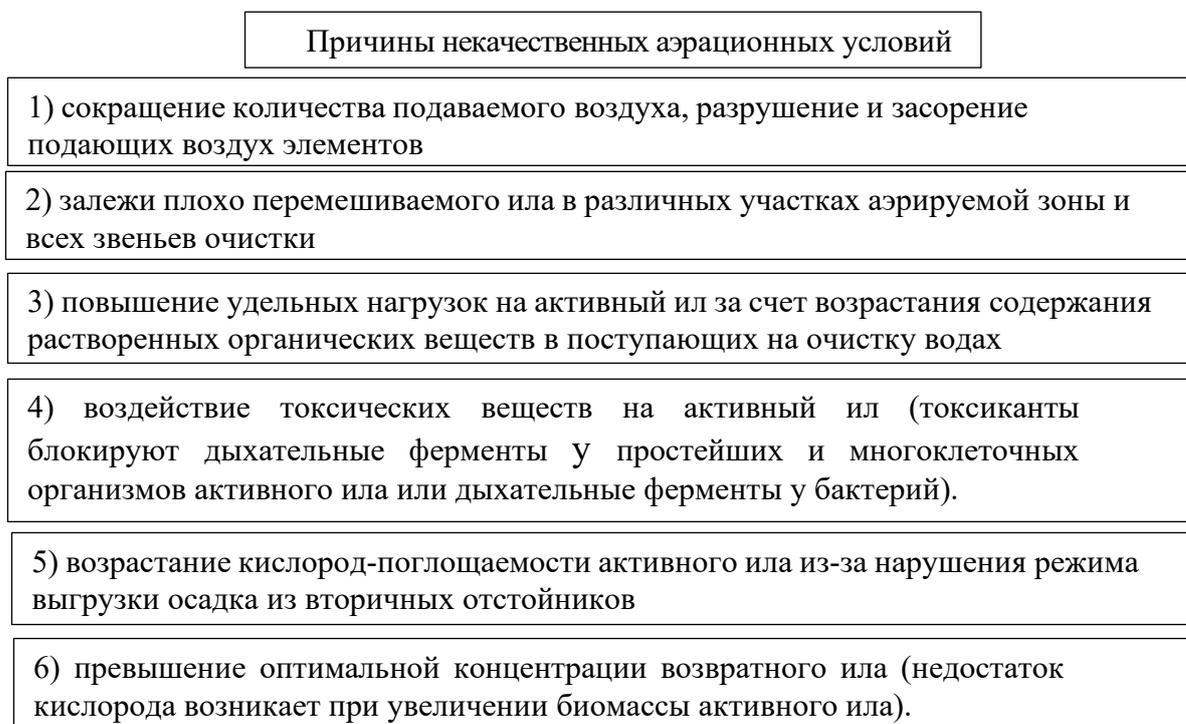


Рисунок 16 – Причины некачественной аэрации

Выводы по главе 2

На основании полученных данных количественных и качественных показателей состава сточных вод. Было установлено, что на ПАО «КуйбышевАзот» при поступлении на очистные сооружения выявлены следующие превышения по загрязняющим веществам:

- «Аммоний содержащий сток: ХПК в 1,3 раза.
- Нитрат содержащий сток: рН в 4 раза; азот нитритов в 9 раз; Азот аммонийный в 1,3 раза; капролактам в 10 раз» [4].

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что достижение существенного повышения качества очистки сточных вод при заданных параметрах входных потоков является невозможным. А представленная технологическая система водоотведения с локальной доочисткой сточных вод демонстрирует необходимость значительных затрат ресурсов при подготовке стоков к сливу в общую канализационную сеть. Данный процесс требует применения сложных технологий, значительного трудового вклада и длительного периода реализации. К тому же, важным аспектом является существенная стоимость процессов доочистки и подготовки сточных вод [23].

В виду выше сказанного рассмотрим метод импульсной аэрации сточных вод – это метод, при котором «аккумулируется обрабатываемая жидкость в распределительной камере, а затем импульсно подаётся через сопло отводной трубы сифона в аэрационную трубу. Предложенный метод считается наиболее эффективным, так как не требует энергозатрат на создание условий напорного истечения рабочей жидкости. Импульсный ввод водовоздушной смеси в аэрируемый резервуар с расходом, значительно превышающим циркуляционный расход, способствует интенсивному перемешиванию иловой смеси в резервуаре без дополнительных энергозатрат, повышая степень использования кислорода в воздухе. Импульсный аэратор состоит из распределительных камер, в каждой из которых установлен сифонный стакан с воздушной трубкой сифона и воздушным стаканом-регулятором с гидрозатвором, отводных труб сифона с соплом, аэрационных труб с конусной насадкой, циркуляционного насоса с трубопроводом подачи обрабатываемой жидкости» [4].

Глава 3 Выбор и разработка модернизации действующего оборудования очистных сооружений сточных вод ПАО «КуйбышевАзот»

«Производство капролактама, как любой органический синтез, представляет собой в экологическом отношении проблемный процесс: на 1 тонну получаемого продукта образуется около 12 м³ сточных вод с весьма сложным составом загрязнений. Поэтому необходима предварительная очистка стоков производства до их отправки на городские биоочистные сооружения. Именно для этого и был создан в структуре производства капролактама цех № 39. Очистные сооружения цеха № 39 введены в эксплуатацию в 1989 г. Назначение – переработка органических и неорганических соединений производства капролактама на установке нитриденитрификации промстоков производства капролактама (НДФ), по технологической схеме биологической очистки сточных вод методом нитриденитрификации азотных соединений» [1,27].

«Установка нитриденитрификации промстоков производства капролактама состоит из одной технологической нитки. Метод очистки промстоков основан на минерализации органических загрязнений при помощи биохимических процессов, на биологическом окислении аммонийного азота до нитратного и последующего биохимического восстановления нитратного азота до свободного за счет окисления органического вещества кислородом нитратов» [2,27].

Заключительная глава диссертационного исследования подводит итоги анализа действующей системы очистки сточных вод ПАО «КуйбышевАзот» и предлагает пути её модернизации для повышения эффективности и снижения эксплуатационных затрат. В ходе работы были изучены технологические процессы, найдены ключевые проблемы и предложены инновационные решения, направленные на оптимизацию работы очистных сооружений.

Производство капролактама сопровождается образованием высококонцентрированных сточных вод, содержащих органические и неорганические соединения. Действующая система очистки, основанная на биологической нитри-денитрификации, имеет ряд существенных недостатков (Таблица 4), которые снижают её эффективность и увеличивают затраты [6,27].

Таблица 4 – Основные недостатки действующей системы очистки

Оборудование	Недостатки	Последствия
Компрессоры	Высокое энергопотребление, шум, частые поломки	Увеличение эксплуатационных расходов
Аэротенки	Неравномерная аэрация, «мёртвые зоны»	Снижение эффективности очистки
Отстойники	Заиливание, неравномерное осаждение ила	Необходимость частого обслуживания
Система рециркуляции	Гидравлические перегрузки, дисбаланс илового режима	Ухудшение качества очищенной воды

В качестве основного метода модернизации рассмотрен импульсный способ аэрации, который обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными системами [12].

Сравнение традиционной и импульсной аэрации:

Традиционная аэрация:

- постоянная подача воздуха → высокие энергозатраты.
- неравномерное распределение кислорода.
- риск засорения аэраторов.

Импульсная аэрация:

- циклическая подача воздуха → снижение энергопотребления;
- интенсивное перемешивание → отсутствие «мертвых зон»;

- автоматизированное управление процессом;

Внедрение предложенных решений позволит:

- снизить энергопотребление на 20–30%.
- повысить степень очистки сточных вод;
- уменьшить эксплуатационные затраты;

Обеспечить устойчивую работу системы при изменении состава стоков.

В будущем целесообразно рассмотреть:

- интеграцию цифровых систем мониторинга (IoT, датчики качества воды);
- использование гибридных технологий (мембранная фильтрация + биологическая очистка).

3.1 Технологическая схема действующей системы аэрации

Технологическая схема действующей аэрационной системы очистки сточных вод представлена на рисунке 17. Эта схема отражает последовательные этапы биологической очистки стоков с применением процессов нитрификации, денитрификации и доочистки, осуществляемых в специально оборудованных аэротенках, отстойниках и биореакторах [55].

Система аэрации предназначена для биологической очистки сточных вод, преимущественно органического и азотсодержащего происхождения. Основной технологии является использование аэробных и анаэробных микроорганизмов, способных окислять и минерализовать загрязняющие вещества. Основной задачей системы является:

- снижение содержания органических загрязнений (БПК, ХПК);
- удаление аммонийного и нитратного азота;
- осветление и стабилизация состава сточных вод перед обеззараживанием и выпуском;
- поступление сточных вод и усреднение.

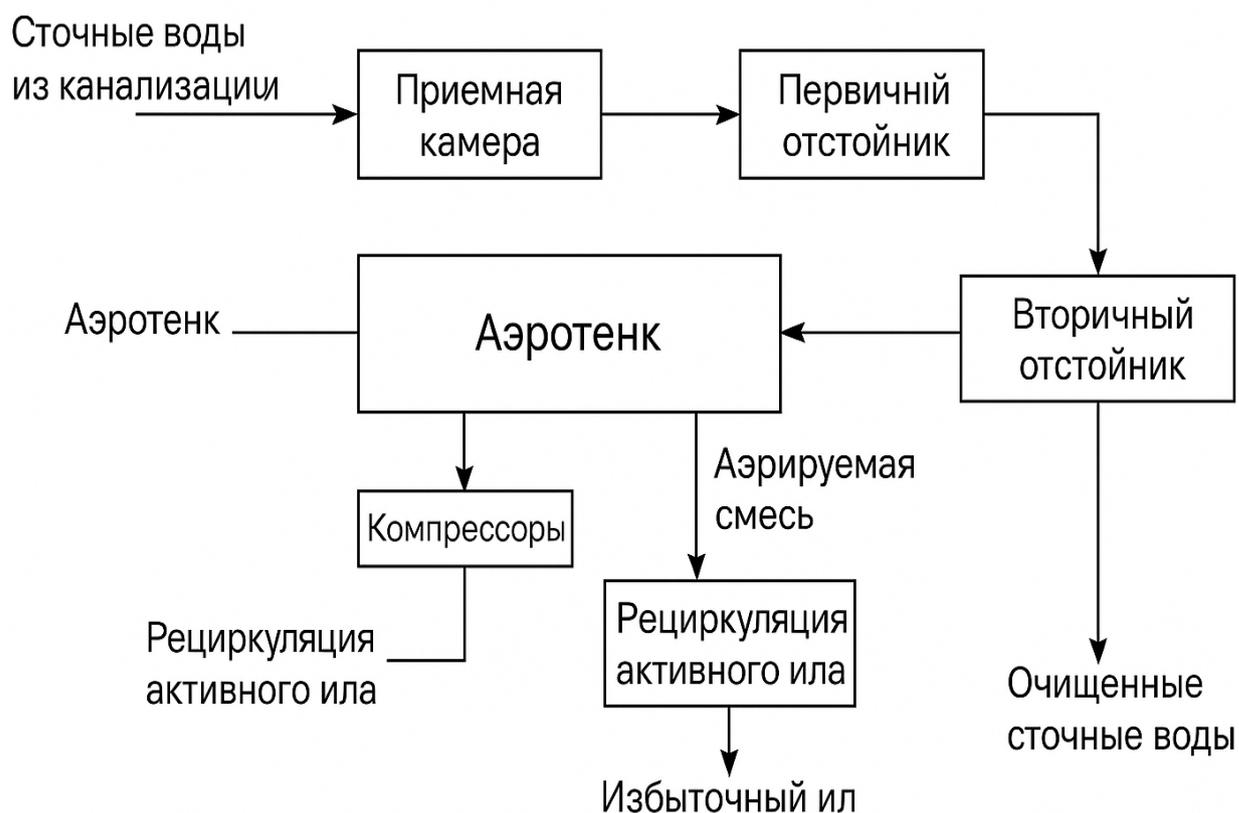


Рисунок 17 – Технологическая схема аэрационной системы сточных вод

На первом этапе сточные воды поступают в усреднители, где обеспечивается выравнивание по составу, объему и температуре. Это особенно важно в условиях переменного поступления стоков и нестабильного химического состава:

- усреднители оборудованы мешалками и датчиками уровня;
- объем резервуаров позволяет гасить пики концентраций и расхода;
- обеспечивается начальное насыщение кислородом и стабилизация рН.

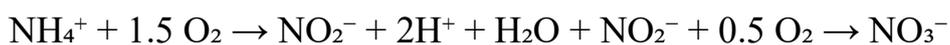
Аэротенки-нитрификаторы.

После усреднения вода подается в аэротенки-нитрификаторы. Здесь происходит основной биохимический процесс окисления аммонийного азота до нитритов и далее до нитратов [49]. Основные процессы:

- аэрация: подача воздуха обеспечивает кислородный режим;

- нитрификация: осуществляется автотрофными нитрифицирующими бактериями (Nitrosomonas, Nitrobacter);
- регулируемая подача активного ила, поддержание необходимой концентрации микрофлоры;
- температурный контроль – важный фактор эффективности.

Пример химических реакций:



Отстойники нитрификаторов.

Из аэротенков иловая смесь поступает в отстойники. Здесь осуществляется отделение активного ила от осветленной воды. Цель:

- обеспечить возврат ила обратно в аэротенки;
- осветление жидкости;
- возможность удаления избыточного ила.

Аэротенки-денитрификаторы.

Осветлённая вода, насыщенная нитратами, поступает в денитрификаторы – резервуары с анаэробными зонами, где осуществляется восстановление нитратов до молекулярного азота. Здесь происходит:

Денитрификация: Heterotrophic denitrifiers (Pseudomonas, Paracoccus) используют органические вещества как доноры электронов;

Анаэробный режим: исключена подача кислорода;

При необходимости добавляется углерод (например, метанол) как источник питания бактерий;

Удаление $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2 \uparrow$.

Отстойники денитрификаторов.

Как и в предыдущем случае, здесь также происходит отстаивание иловой смеси. Ил возвращается в денитрификационную зону, обеспечивая поддержание микрофлоры.

Аэротенки доочистки и отстойники доочистки.

Следующий этап – доочистка, которая представляет собой дополнительную стадию биологической обработки. Основные задачи:

- удаление остаточной органики;
- деструкция остаточных продуктов жизнедеятельности;
- финальная стабилизация состава стоков.
- отстойники доочистки завершают этот этап, обеспечивая дополнительное осветление воды.

Биореакторы (мембранные или капсульные).

Дополнительная стадия, повышающая качество очистки до уровня, соответствующего ПДК по ряду компонентов. Биореакторы могут включать:

- мембранные модули (MBR) – фильтрация через поры 0.04–0.1 мкм;
- капсульные модули с иммобилизованными бактериями;
- высокое качество фильтрации, удаление взвесей и микрозагрязнителей.

УФ-обеззараживание.

На заключительном этапе происходит обеззараживание осветленной воды с помощью УФ-излучения. УФ-обработка уничтожает бактерии, вирусы, яйца гельминтов и прочие патогены без внесения дополнительных химикатов:

- используются лампы низкого давления ($\lambda = 254$ нм);
- модули герметично защищены от воздействия внешней среды;
- контроль интенсивности излучения и мутности воды – критичен.

Сброс очищенной воды.

После обеззараживания вода направляется на сброс в водоем либо на повторное использование в технологических целях. В большинстве случаев соблюдаются нормативы:

- БПК₅ < 3–5 мг/л;
- Азот аммонийный < 0.4 мг/л;
- Фосфаты < 0.5 мг/л;
- Мутность < 1–2 мг/л;
- Патогены отсутствуют.

Сгущение и сушка осадков.

Побочным продуктом является активный ил, который требует утилизации. Для этого предусмотрены:

- сгущение ила в специальных ёмкостях (до 3–6% сухого вещества);
- механическая сушка (вентиляция, ленточные прессы);
- в дальнейшем осадки могут подвергаться компостированию, сжиганию или вывозу на полигоны [16].

Сводные параметры системы аэрации представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Сводная таблица параметров системы аэрации

Этап	Описание	Основные параметры
Усреднитель	Стабилизация состава	$V = 500 \text{ м}^3$, $\text{pH} = 6.5\text{--}8.5$
Аэротенк-нитрификатор	Окисление NH_4^+	$\text{DO} = 2.0\text{--}3.0 \text{ мг/л}$, $T = 25\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$
Отстойник	Разделение ила	Время = 1.5 ч
Денитрификатор	Удаление NO_3^-	Анаэробная зона, углерод = 10–20 мг/л
Биореактор	Фильтрация	Мембраны: UF 0.04 мкм
УФ-обеззараживание	Дезинфекция	Доза: 40 мДж/см ²
Осадкоудаление	Сгущение и сушка	Концентрация: до 25% СВ

Таким образом, действующая система аэрации представляет собой многоступенчатую, интегрированную технологию очистки сточных вод, способную обеспечивать высокое качество очистки. Комплекс аэротенков, отстойников, биореакторов и блоков обеззараживания обеспечивает соответствие самым строгим нормативам по сбросу, в том числе по азоту, органике и патогенам. Эффективность системы поддерживается современными автоматизированными модулями контроля и регулирования.

3.2 Применяемое оборудование на очистных сооружениях

Приёмная камера – сюда поступают промышленные сточные воды. Камера служит для равномерного распределения потока и предварительного удаления крупных загрязнителей.

Первичный отстойник – здесь оседают тяжелые нерастворимые вещества. Это первая стадия механической очистки.

Аэротенк – главный биологический реактор. В нём происходит насыщение сточных вод кислородом и разложение органических веществ микроорганизмами активного ила.

Компрессоры – поддерживают подачу воздуха в аэротенк для создания условий аэрации, необходимых микроорганизмам.

Вторичный отстойник – осаждаёт активный ил, отделяя его от очищенной воды. Часть ила возвращается обратно в аэротенк для поддержания биомассы (рециркуляция).

Рециркуляция активного ила – механизм возвращения части осевшего ила из вторичного отстойника в аэротенк, обеспечивая стабильную биологическую очистку.

Избыточный ил – часть ила, не возвращаемая в систему, удаляется на утилизацию или последующую переработку.

Очищенные сточные воды – финальный продукт системы — вода, прошедшая биологическую очистку и пригодная для повторного использования или сброса в водоём [12].

3.3 Недостатки действующего оборудования очистных сооружений

Компрессоры.

Недостатки:

- высокое энергопотребление — компрессоры работают постоянно для подачи воздуха, что увеличивает затраты;

- повышенный уровень шума и вибраций;
- требуют частого технического обслуживания (фильтры, смазка, замена частей);
- низкий КПД при глубоком погружении или засорении трубопровода;
- аэротенки.

Недостатки:

- большие размеры → требуется значительная площадь, особенно на старых предприятиях с ограниченной территорией;
- образование «мертвых зон» – в некоторых зонах плохо перемешиваются сточные воды и ил;
- ограниченные возможности управления скоростью и глубиной аэрации;
- традиционные аэраторы (пузырьковые, трубчатые).

Недостатки:

- засоряются со временем – особенно при высокой нагрузке загрязнений;
- неравномерное распределение кислорода по объему аэротенка;
- низкая эффективность при изменении состава сточных вод.

Отстойники (первичные и вторичные).

Недостатки:

- осаждение ила может быть неравномерным при изменении расхода воды;
- образование иловых отложений и заиливания;
- необходимость периодической очистки от накопившихся осадков.

Системы рециркуляции активного ила.

Недостатки:

- требуют дополнительного оборудования (насосы, трубопроводы);
- возможны сбои при нарушении баланса между возвращаемым и избыточным илом;

- чувствительны к гидравлическим перегрузкам и колебаниям состава сточных вод [20];

Общие недостатки традиционной системы:

- низкая гибкость. Система плохо адаптируется к колебаниям состава стоков (например, при запуске новых производственных линий);
- высокие капитальные и эксплуатационные затраты;
- сложность модернизации. Внедрение новых технологий часто требует полной перестройки отдельных узлов;
- ограниченная автоматизация. Без современных датчиков и систем управления сложно отслеживать качество очистки в реальном времени.

3.4 Обоснование выбора импульсного аэратора

«Современные системы биологической очистки сточных вод предъявляют высокие требования к эффективности, надежности и экономичности технологического оборудования. Одним из ключевых узлов таких систем является аэрация — подача кислорода, необходимого для жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, осуществляющих минерализацию органических и азотсодержащих загрязнений. Традиционные методы аэрации, основанные на использовании мелкопузырьковых диффузоров, воздуходувок и компрессорных установок, обладают рядом серьезных недостатков: высоким энергопотреблением, неравномерностью насыщения кислородом, частыми засорами и трудоемким обслуживанием» [18,53].

В условиях нарастающих экологических требований, необходимости снижения эксплуатационных затрат и обеспечения стабильности технологического процесса особую актуальность приобретает внедрение инновационных устройств — в частности, импульсных аэраторов, функционирующих по сифонному принципу.

Принцип действия импульсного аэратора: Импульсный аэратор – это устройство, обеспечивающее периодическую, циклическую подачу воздуха в рабочую зону аэротенка. Основу его работы составляет сифонный эффект, за счёт которого осуществляется самовсасывание и выброс воздуха в воду без необходимости применения постоянного внешнего источника давления. В момент запуска создаётся область разрежения, позволяющая засасывать воздух, который затем импульсно подается в аэротенк. Пауза между импульсами позволяет снизить нагрузку на систему и исключает постоянную работу воздуходувок.

Технически импульсный аэратор состоит из:

- накопительной камеры (с резервом воздуха или воды);
- вертикального патрубка (сифона);
- выпускного сопла или насадки;
- механизма регулировки цикла подачи.

Данный принцип реализован в конструкции по патенту РФ № 2685814 С1, в котором заложены инновационные решения по формированию вихревого потока и повышению коэффициента массопередачи.

Сравнение с традиционными аэраторами.

Таблица 6 – сравнение с традиционными аэраторами.

Параметр	Традиционная система	Импульсный аэратор
Способ подачи воздуха	Постоянный	Импульсный (циклический)
Тип аэрации	Мелкопузырьковая	Крупнопузырьковая, турбулентная
Энергозатраты	Высокие	Ниже на 20–30%
Риск «мёртвых зон»	Высокий	Исключён (турбулентные потоки)
Обслуживание и засоры	Частое, трудоёмкое	Минимальное
Устойчивость к загрязнению	Низкая	Высокая

Одним из наиболее заметных преимуществ импульсного аэратора является способность создавать турбулентный поток, который эффективно перемешивает содержимое аэротенка и способствует равномерному распределению кислорода. Это существенно повышает эффективность биоокисления и исключает возникновение зон с недостаточным насыщением, в которых происходит гибель микрофлоры или застаивание ила.

Энергоэффективность.

Согласно эксплуатационным данным и результатам внедрения опытных установок, применение импульсного аэратора позволяет снизить потребление электроэнергии на 20–30 % по сравнению с классической системой мелкопузырьковой аэрации. Это достигается за счёт:

- пульсирующего режима подачи: работа осуществляется в тактовом режиме, что сокращает суммарное время функционирования компрессоров;
- отсутствия постоянного противодействия в системе;
- исключения необходимости в дополнительных воздуходушках большой мощности.

При эксплуатации на промышленных очистных сооружениях сокращение затрат на энергоресурсы становится критически важным фактором, особенно при круглосуточной работе оборудования.

Надежность и простота эксплуатации.

Одной из слабых сторон традиционных аэрационных систем является высокая подверженность засорению диффузоров, особенно при наличии взвешенных веществ, жиров и нерастворимых соединений в сточных водах. Импульсный аэратор полностью исключает использование мелкопузырчатых элементов, что делает его менее чувствительным к загрязнению и значительно уменьшает потребность в техническом обслуживании.

К тому же, простая конструкция устройства облегчает монтаж и демонтаж, снижает затраты на эксплуатационный персонал и увеличивает срок службы всей системы аэрации.

Гидродинамические преимущества.

Импульсная подача воздуха в жидкость создает кратковременные вихревые и кавитационные зоны, благодаря чему:

- усиливается процесс массопередачи кислорода;
- разрушаются флокулы оседающего ила;
- предотвращается формирование донных отложений;
- создаются условия для самоочищения стенок и дна аэротенков.

Таким образом, импульсный аэратор не только насыщает воду кислородом, но и обеспечивает активное перемешивание содержимого, выполняя двойную функцию – аэрации и гидродинамической активации.

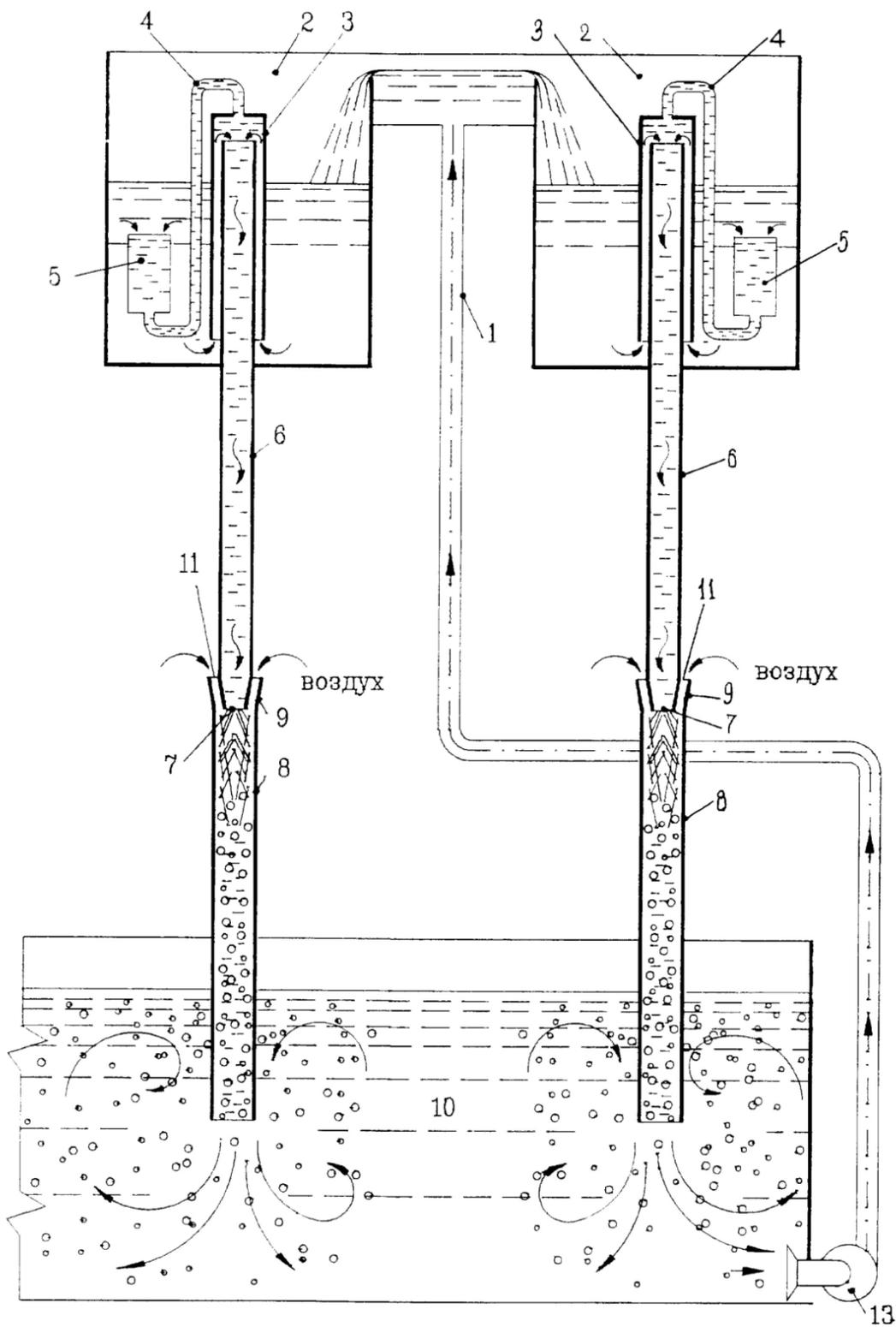
Патентная основа и инновационность.

Применение конструкции по патенту RU 2685814 C1 даёт правовую и техническую основу для внедрения разработанного решения. Патент охватывает инновационные элементы:

- способ формирования импульса за счёт гравитационного разряда;
- стабилизацию интервалов импульсной подачи;
- оптимизацию формы выпускного сопла для усиления турбулентности.

Наличие патента подтверждает оригинальность конструкции и открывает возможности для серийного применения устройства в составе различных технологических линий очистки сточных вод.

Таким образом, обоснование выбора импульсного аэратора основывается на его энергоэффективности, высокой технологической надёжности, простоте эксплуатации и способности устранять недостатки традиционных систем. Он обеспечивает эффективную подачу воздуха, исключает «мёртвые зоны», снижает потребление электроэнергии и минимизирует эксплуатационные расходы. Применение такого оборудования в составе биологических очистных сооружений позволяет улучшить качество очистки, повысить устойчивость системы к переменным нагрузкам и обеспечить соответствие современным экологическим требованиям (Рисунок 18).



«1 – трубопровод подачи циркуляционной обрабатываемой жидкости; 2 – распределительная камера; 3 – сифонный стакан; 4 – воздушная трубка сифона; 5 – воздушный стакан-регулятор с гидрозатвором; 6 – отводная труба сифона; 7 – сопло; 8 – аэрационная труба; 9 – конусная насадка; 10 – аэрируемый резервуар; 11 – кольцевая щель подсоса атмосферного воздуха; 12 – циркуляционный насос; 13 – воздушная трубка, размещенная в нижней части отводной трубы» [31]

Рисунок 18 – Схема импульсного аэратора из патента RU 2685814 C1

3.5 Интеграция импульсного аэратора в существующую систему

Импульсные аэраторы монтируются вместо традиционных трубчатых аэраторов в аэротенках (Рисунок 19).

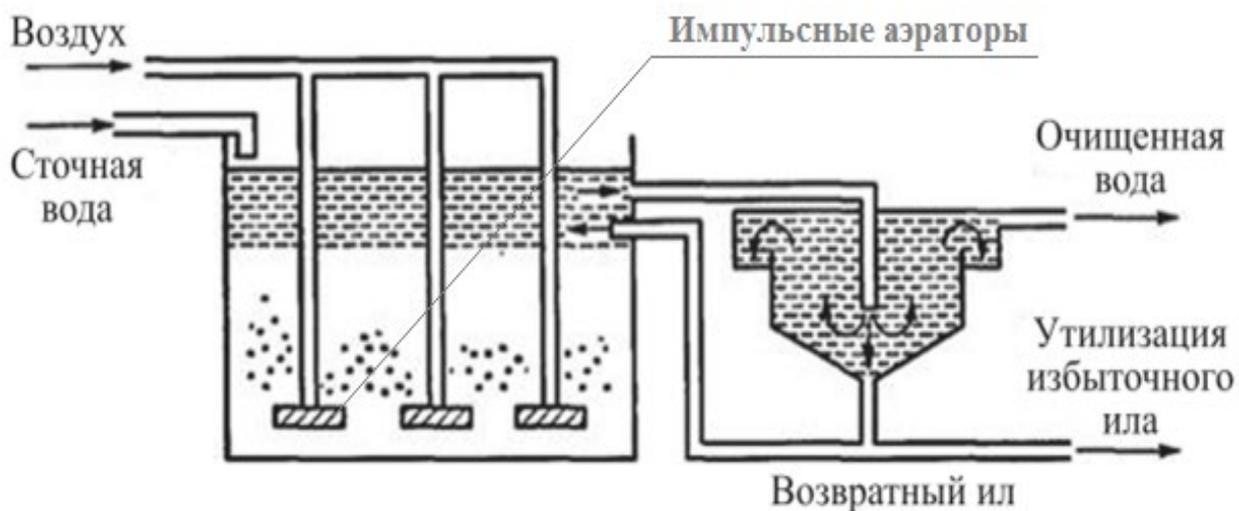


Рисунок 19 – Принципиальная схема размещения импульсного аэратора в аэротенке

Технология монтажа:

- демонтаж старых аэраторов – удаление трубчатых/дисковых диффузоров;
- установка распределительных камер – подключение к подающему трубопроводу;
- настройка сифонного механизма – регулировка частоты импульсов (обычно 5–10 циклов/мин);
- подключение к системе управления – интеграция с датчиками кислорода и расхода.

Ключевые преимущества:

- энергоэффективность – отсутствие постоянной работы компрессоров;

- самоочистка – импульсный поток предотвращает засорение;
- гибкость – регулировка частоты импульсов под изменяющуюся нагрузку.

3.6 Ожидаемый эффект от внедрения

После модернизации система очистки ПАО «КуйбышевАзот» получит (таблица 7):

- снижение энергопотребления на 25% (за счёт отказа от постоянной аэрации);
- увеличение степени очистки по ХПК и азоту на 15–20%;
- сокращение эксплуатационных затрат (меньше обслуживания, нет износа диффузоров).

Таблица 7 – Сравнительная показатели эффективности

Параметр	Традиционная аэрация	Импульсная аэрация
Энергопотребление, кВт·ч/м ³	0.8–1.2	0.5–0.7
КПД использования O ₂ , %	40–50	60–75
Частота обслуживания	Ежемесячно	Раз в 6 месяцев

Рекомендации:

- провести пилотные испытания на одном аэротенке;
- разработать автоматизированную систему управления импульсными циклами.

Выводы по главе 3:

Внедрение импульсных аэраторов в технологическую схему очистных сооружений ПАО «КуйбышевАзот» технически реализуемо и экономически целесообразно. Устройства совместимы с существующей инфраструктурой, а их работа подтверждена патентами и промышленными испытаниями. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию режимов импульсной подачи с использованием AI-алгоритмов.

Обобщены результаты исследования, подтверждена эффективность предложенных решений и определены направления для дальнейшего развития системы очистки сточных вод. Полученные данные могут быть использованы не только на ПАО «КуйбышевАзот», но и на других промышленных предприятиях со схожими технологическими процессами.

Заключение

В ходе проведённого исследования была разработана и обоснована технологическая схема физико-химической очистки сточных вод промышленных предприятий на примере ПАО «КуйбышевАзот». Проведённый анализ качественных и количественных характеристик сточных вод показал значительные превышения нормативов по ряду загрязняющих веществ, включая капролактамы, нитриты, аммонийный и нитратный азот, ХПК и рН. Это свидетельствует о необходимости модернизации существующей системы очистки, поскольку при текущих нагрузках достичь требуемого качества очистки невозможно без внедрения новых технологических решений.

Особое внимание было уделено обоснованию использования импульсного аэратора, отличающегося энергоэффективностью, отсутствием необходимости в постоянной подаче сжатого воздуха и способностью обеспечивать равномерное перемешивание без образования мёртвых зон. Метод импульсной подачи воздуха доказал свою эффективность как с технологической, так и с экономической точки зрения.

Предложенное техническое решение адаптировано к существующей инфраструктуре предприятия, подтверждено патентом и промышленными испытаниями, и может быть масштабировано на аналогичные промышленные объекты. Внедрение импульсных аэраторов в технологическую схему очистных сооружений технически реализуемо и экономически целесообразно. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию режимов импульсной подачи с использованием AI-алгоритмов. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшей оптимизации систем водоочистки с применением интеллектуального управления и энергоэффективных технологий.

Список используемых источников

1. А. Карелин, Д. Д. Жуков, В. Н. Журов, Б. Н. Репин. Очистка производственных сточных вод в аэротенках. М., Стройиздат, 1973- 223 с.
2. Алексеев, Л. С. Контроль качества воды. - М.: ИНФРА-М, 2004. - 159 с.
3. Безопасность водных объектов и принципы управления очистными сооружениями /Известия Самарского научного центра РАН, спец. вып.: Безопасность. Технологии. Управление /Андреев И.А / 2007. Том 1. С. 7 - 9.
4. Биологические и физико-химические методы очистки сточных вод / А.А. Бондарев / – М.: ВИНТИ, 2012. – 341с.
5. В.И. Баженов., А.Н. Эпов., Энергосбережение, как критерий выбора аэратора, 2013-17 с.
6. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1978. - 119 с.
7. Водная токсикология. - МГУ, Черноголовка. / Филенко О. Ф. / - 1988. - 175 с.
8. Вронский, В. А. Экология: Словарь-справочник. - Изд. 2-е. - Ростов н/Д.: Феникс, 2002. - 576с.
9. Гляденов С.Н. Очистка сточных вод: традиции и новации / Экология и промышленность России. – 2001. – № 2.
10. Голубовская Э.К. Биологические очистки сточных вод. М.: Высшая школа, 1978. - 186 с.
11. ГОСТ Р 52106-2003 Ресурсосбережение. Общие положения.
12. Гридэл Т.Е., Промышленная экология. / Т.Е. Гридэл, Б.Р. Алленби; пер. с англ. Э. В. Гирусова – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 527 с.
13. Е.П. Загорская., Очистка сточных вод на промышленных предприятиях г.Тольятти. г.Тольятти .-2012. – 3 с.

14. Жуков, А.И. Канализация промышленных предприятий. Очистка промышленных сточных вод / Жуков, А.И., Монгайт, И.Л., Родзимер, И.Д. - М.: Госстройизда, 1962, -602с.
15. Жуков, А.И. Методы очистки производственных сточных вод. - М.: Химия, 1996. - 345 с.
16. Зиятдинов, Н.Н. Системный подход к повышению эффективности биологической очистки промышленных сточных вод / Зиятдинов, Н.Н. Казань, 2001, -39с.
17. Ивчатов, А. Л. Химия воды и микробиология. - М.: ИНФРА-М, 2006. - 218 с. 53
18. Каменев, Я. Ю. Оценка эффективности режимов очистки сточных вод на основе эмиссии газов : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каменев Ярослав Юрьевич, 2014. – 147 с. – EDN UIZYKE.
19. Кафаров, В.В. Принципы создания безотходных химических производств. - М.: Химия, 1994. - 276 с.
20. Комплексное использование и охрана водных ресурсов / О.А. Юшманова / - М.: Агропромиздат, 2011. - 220 с.
21. Контроль качества воды / Л.С. Алексеев / - М.: ИН ФРА-М, 2012. - 159 с.
22. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984 г.
23. Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. - М.: Химия, 1974. - 336 с.
24. Методика технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. - М.: Стройиздат, 1977. - 303 с.
25. Методы очистки сточных вод от тяжелых металлов и нефтепродуктов. Экология производства / Ахобадзе Г. Н. / – 2011. – № 2. – С. 45- 52.

26. ОАО КуйбышевАзот. [Электронный ресурс] <http://www.kuazot.ru/>.
27. Описание технологического процесса. Цех № 39 переработки органических и неорганических соединений (Установка нитриденитрификации).
28. Охрана окружающей среды / В.С. Белова, Ф.А. Баринов / – М.: Высшая школа, 2011. - 156с.
29. Охрана производственных сточных вод и утилизация осадков / В.Н. Соколова. - М.: Стройиздат, 2012. - 340 с.
30. Очистка производственных сточных вод / С.В. Яковлев, И.В. Скирдов/ – М.: Стройиздат, 2010. – 267с.
31. Патент № 2142433 С1 Российская Федерация, МПК С02F 3/22, С02F 3/24. импульсный аэратор : № 97119357/12 : заявл. 06.11.1997 : опубл. 10.12.1999 / Н. С. Серпокрылов, Ю. И. Каменев, Я. Ю. Каменев, А. А. Марочкин. – EDN YGOUPM.
32. Попов Н.С. Немтинов В.А. Мокрозуб В.Г. Методика автоматизированного моделирования процессов самоочищения реки с малым расходом воды в условиях неопределенности // Химическая промышленность, 1992. - № 9. - С 545.
33. Постоянный технологический регламент цеха №39 установки нитри-денитрификации промстоков производства капролактама №39. Тольятти, 2013-108 с.
34. Промышленная экология: учебное пособие для студентов вузов; рец.: М.Х. - Г. Ибрагимов, В.В. Куличихин. - М.: Академия, 2009. - 521 с.
35. Санитарные нормы предельно допустимого содержания вредных веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурнобытового водопользования.
36. СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. - М.: Минздрав, 2001.
37. Смирнов Д.И., Дмитриев А.С. Автоматизация процесса очистки сточных вод химической промышленности. М.: Химия, 1972. - 166 с.

38. СНиП 2.04.02-85. Строительные нормы и правила. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: Стройиздат, 1985. 55
39. Схема водоснабжения и водоотведения городского округа Тольятти на период с 2014 до 2028 года. Система водоотведения ТОМ 1, 2 № 745-14/67-ПЗ-НК, 2014 г., 253 с.
40. Федеральный закон «О водоснабжении и водоотведении» № 416-ФЗ от 29.06.2011. (действующая ред.09.01.2015г.).
41. Федеральный Закон «Об экологической экспертизе» № 174-ФЗ от 23.11.95 г. (действующая редакция от 01.02.2015г.) [41].
42. Федеральный закон №7-ФЗ от 10.01.2002г. «Об охране окружающей среды».
43. Федеральный закон от 10 января 2002 года № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».
44. Федеральный Закон РФ от 03.06.2006 года № 74-ФЗ «Водный кодекс» (действующая ред. от 29.12.2014 г.).
45. Федеральный Закон РФ от 30.03.99 г. № 52-ФЗ « О санитарноэпидемиологическом благополучии населения».
46. Физико-химические основы процессов очистки воды / А.Ф. Никифоров, А.С. Кутергин, И.Н. Липунов, И.Г. Первова, В.С. Семенищев / Учебное пособие – 2016. – 164 с. ISBN 978-5-7996-1618-2.
47. Экология. Под ред. Тягунова Г.В, Ярошенко Ю.Г_Учебник., 2005 - 504.
48. Яковлев С.А, Воронов Ю.В.Водоотведение и очистка сточных вод/ Учебник для вузов: - М.; АСВ, 2002 – 704 с.
49. Яковлев С.В., Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. - М.: Стройиздат 1980. - 200 с.
50. Яковлев, С.В. Очистка производственных сточных вод: Учебное пособие для студентов вузов/Яковлев, СВ., Карелин, Я.А., Ласков, Ю.М., Воронов Ю.В. -М.: Стройиздат, 1979, 320с.

51. Biological treatment of coke plant effluents: from a microbiological perspective / T. Felföldi, Z. Nagymáté, L. Jurecska [et al.] // *Biologia Futura*. – 2020. – Vol. 71, No. 4. – P. 359-370. – DOI 10.1007/s42977-020-00028-2. – EDN KMKMTZ.

52. Deep Denitrification of Domestic Sewage by Sulfur-based Mixotrophic Denitrification Filter // *Tehnicki Vjesnik*. – 2024. – Vol. 31, No. 2. – DOI 10.17559/tv-20230607000704. – EDN LCWLUC.

53. Dracea, D. ADIPUR wastewater treatment optimization / D. Dracea, A. Tronac, S. Mustata // 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 июня – 05 2017 года. Vol. 17. – Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2017. – P. 39-46. – DOI 10.5593/sgem2017/51/S20.006. – EDN DYUNWF.

54. Haruvy, N. Cost assessment of various means of averting environmental damage and groundwater contamination from nitrate seepage / N. Haruvy, A. Hadas // *Agricultural Water Management*. – 1997. – Vol. 32, No. 3. – P. 307-320. – EDN AIZJWP.

55. Lenhart, S. Denitrification in the vadose zone: Modelling with percolating water prognosis and denitrification potential / S. Lenhart, F. Ortmeyer, A. Banning // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2021. – Vol. 242. – P. 103843. – DOI 10.1016/j.jconhyd.2021.103843. – EDN QJHLJP.

56. Mitrović, M. Primjena mikroorganizama u procesima uklanjanja dušikovih spojeva iz otpadnih voda / M. Mitrović, T. Rezić // *Kemija u Industriji*. – 2024. – No. 7-8. – DOI 10.15255/kui.2023.050. – EDN KGFPEY.

57. Overlooked pathways of denitrification in a sulfur-based denitrification system with organic supplementation / Ya. Y. Qiu, L. Zhang, X. Mu [et al.] // *Water Research*. – 2020. – Vol. 169. – P. 115084. – DOI 10.1016/j.watres.2019.115084. – EDN CJDJXE.