

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 628.316.13

**НАУМЧИК**  
Григорий Остапович

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
МЕТОДОМ ОЗОНИРОВАНИЯ**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация,  
строительные системы охраны водных ресурсов

Минск, 2023

Научная работа выполнена в **Учреждении образования «Брестский государственный технический университет»**

Научный руководитель:

**Белов Сергей Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов» Учреждения образования «Брестский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

**Михневич Эдуард Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Белорусского национального технического университета;

**Ющенко Виктор Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогазоводоснабжение и вентиляция» Учреждения образования «Полоцкий государственный университет»

Оппонирующая организация:

**Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель**

Защита состоится «23» ноября 2023 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, e-mail [tg\\_v\\_fes@bntu.by](mailto:tg_v_fes@bntu.by), тел. ученого секретаря +375 17 263 00 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 13 октября 2023 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.05.10  
доктор технических наук, профессор



П. И. Дячек

## ВВЕДЕНИЕ

Текстильные предприятия характеризуются одним из наиболее высоких уровней удельного водопотребления среди промышленных производств народного хозяйства Республики Беларусь. По укрупненным данным при производстве 1 тонны готовой ткани образуется: на льнокомбинатах бытовых тканей – 260...350 м<sup>3</sup> сточных вод, на хлопчатобумажных комбинатах бельевых и одежных тканей – до 270 м<sup>3</sup>, на камвольно-суконных комбинатах с цехом крашения волокна – до 478 м<sup>3</sup>, на тонкосуконных фабриках с цехом крашения волокна – до 545 м<sup>3</sup>.

Для придания тканям необходимой окраски текстильные предприятия используют различные типы красителей и поэтому одной из наиболее острых проблем охраны водного бассейна, возникающих при производстве тканей, является наличие красителей в сточных водах. Проблема заключается в том, что не весь краситель, содержащийся в красильных растворах, переходит на ткань в процессе окрашивания. Значительная его часть (от 10 % до 50 %) остается в отработанных технологических растворах и в технических водах, образующихся после промывки окрашенных изделий. Таким образом, большое количество красителя вместе с отработанными красильными растворами и промывными водами попадает в сточные воды.

Кроме красителей, в сточных водах текстильных предприятий содержатся текстильно-вспомогательные вещества (мягчители, эмульгаторы, смачиватели, выравниватели, антистатика, закрепители и т.д.), позволяющие повысить качество окраски текстильных материалов. Сточные воды текстильных производств часто содержат отделочные препараты, придающие окрашенным тканям специфические свойства: несминаемость, огнестойкость, водонепроницаемость, грязеотталкиваемость и другие. Также в сточных водах данных предприятий присутствуют остатки волокон тканей и другие загрязнения, попадающие в воду из обрабатываемых текстильных материалов. Вследствие этого, сточные воды красильных производств, кроме механических примесей, содержат высокие концентрации органических веществ.

Многие вещества, входящие в состав отделочных препаратов и текстильно-вспомогательных веществ, также как и сами синтетические красители, являются биологически трудноокисляемыми соединениями. Поэтому при поступлении в сточные воды данные соединения практически без изменений проходят через сооружения биологической очистки и попадают в поверхностные природные водные объекты, оказывая отрицательное влияние на их экосистему. Некоторые вещества, такие как формальдегид, фенолы, металлокомплексные красители и т.д., содержащиеся в сточных водах текстильных производств, являются токсичными и относятся ко 2-му классу опасности, поэтому могут приводить к нарушению процессов биологической

очистки на городских очистных сооружениях и, попадая в поверхностные водные объекты, оказывать отрицательное влияние на природную экосистему.

Традиционные локальные очистные сооружения очистки сточных вод красильных производств, работа которых основана на использовании методов коагуляции и флокуляции, зачастую не обеспечивают необходимого эффекта очистки по удалению красителей и других загрязнений.

Несмотря на большой практический интерес к этой проблеме, многие вопросы, касающиеся очистки окрашенных сточных вод текстильных предприятий, ещё недостаточно изучены. Озонирование является наиболее эффективным методом очистки данных категорий сточных вод, позволяющим удалять из них красители, трудноокисляемые и токсичные вещества. В связи с чем приобретает особую актуальность разработка соответствующего научно-методического обеспечения для применения метода озонирования с определением эффективных режимов и параметров работы технологического оборудования для его проведения.

В настоящее время вода является ценным ресурсом, который необходимо рационально использовать. Поэтому актуально применение метода озонирования для очистки сточных вод, образующихся на последних ступенях промывки окрашенных тканей, что позволит повторно их использовать на различные производственные нужды, особенно на начальных ступенях процесса промывки. При этом можно получить значительную экономию денежных средств, химических реагентов, энергетических и трудовых ресурсов.

Решению вышеперечисленных задач, имеющих важное теоретическое и практическое значение, посвящена настоящая работа.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям прикладных научных исследований Республики Беларусь в области экологической безопасности и охраны окружающей среды:

– Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19.02.2021 № 99 «О Государственной программе «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы» (глава 6, подпрограмма «Обращение со стойкими органическими загрязнителями»).

### **Цель и задачи исследований**

Цель работы – разработать ресурсосберегающую технологию очистки (доочистки) сточных вод текстильных предприятий, позволяющую достичь нормативных значений по таким показателям, как интенсивность окраски по степени разбавления, ХПК, БПК<sub>5</sub>, концентрация анионных ПАВ, концентрация

формальдегида и увеличить биологическую разлагаемость сточных вод, характеризуемую отношением показателей БПК<sub>5</sub>/ХПК.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- проанализировать стокообразование и состав производственных сточных вод, образующихся на текстильных предприятиях, и существующие методы их очистки;

- разработать методику расчета технологических параметров процесса озонирования, позволяющую обосновывать целесообразность применения озонирования для деструкции органических загрязнений, присутствующих в исследуемых сточных водах, устанавливать необходимую продолжительность контакта озона с ними и определять оптимальную дозу озона для снижения величины показателя ХПК обрабатываемых сточных вод до заданного значения;

- разработать ресурсосберегающую технологию очистки сточных вод текстильных предприятий методом озонирования, доказать эффективность применения метода озонирования для очистки (доочистки) сточных вод до нормативных значений по величине показателя ХПК, интенсивности окраски, концентрации анионных ПАВ и формальдегида;

- исследовать изменение величины биологической разлагаемости загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах текстильных производств, после обработки различными удельными дозами озона;

- обосновать применение технологии очистки сточных вод методом озонирования для обесцвечивания окрашенных промывных вод текстильных предприятий с целью их последующего использования в производственном процессе;

- выполнить экономический расчет эффективности применения предлагаемой технологии и испытать технологию обесцвечивания промывных вод текстильных предприятий методом озонирования в производственных условиях;

- определить параметры озонирования окрашенных промывных вод с введением необходимой дозы озона в две ступени, а также получить уравнение регрессии, устанавливающее взаимосвязь снижения интенсивности окраски промывных вод, образующихся при промывке окрашенных тканей, от дозы озона и соотношения его долей, вводимых на каждой ступени.

### **Объект и предмет исследования**

Объект исследования – сточные и промывные воды, образующиеся на текстильных производствах при окрашивании тканей.

Предмет исследования – процессы очистки методом озонирования сточных вод текстильных предприятий.

## **Научная новизна и значимость полученных результатов**

Разработана методика, позволяющая определять технологические параметры процесса озонирования, обосновывать целесообразность очистки озонном исследуемых сточных вод, устанавливать необходимую продолжительность контакта озона с ними и определять оптимальную дозу озона для снижения величины показателя ХПК до заданного значения, учитывающая скорость окисления веществ озонном и влияние характерных механизмов взаимодействия органических веществ с озонном.

Разработана ресурсосберегающая технология очистки (доочистки) сточных вод текстильных предприятий методом озонирования, которая обеспечивает эффективное удаление из сточных вод текстильных предприятий красителей, текстильно-вспомогательных веществ, отделочных препаратов, а также доочистку сточных вод по показателю ХПК до предельно допустимых концентраций. Установлено, что применение предлагаемой технологии приводит к увеличению биологической разлагаемости органических загрязнений, содержащихся в сточных водах текстильных производств, более чем в 2 раза. Данная технология позволяет осуществить регенерацию окрашенных промывных вод текстильных предприятий с целью их повторного использования в производственном процессе, что позволит возвращать в производство до 50 % воды, используемой при промывке окрашенных тканей.

Определены параметры озонирования окрашенных промывных вод с введением оптимальных доз озона в две ступени, а также предложено уравнение регрессии, позволяющее определять снижение интенсивности окраски промывных вод, образующихся при промывке тканей, в зависимости от дозы озона и соотношения его долей, вводимых на каждой ступени.

Разработаны два метода точного дозирования озона: в виде водного раствора и с помощью фиксированного объёма озонсодержащего газа, позволившего избегать сильного разбавления пробы при введении высоких удельных доз озона (свыше 1 мг О<sub>3</sub>/мг вещества). Разработанные методы дозирования озона позволили значительно повысить точность и достоверность исследований.

Разработан метод химического определения количества озона в водном растворе с помощью соли Мора, обладающий более высокой точностью в сравнении с йодометрическим методом определения. Уточнена зависимость равновесного соотношения концентраций озона в водной и газовой фазах от температуры.

Установлено, что в обычных условиях проведения реакции конечным продуктом окисления озонном являются простые органические кислоты. Это вызывает необходимость нейтрализации озонированных сточных вод, поэтому предложена технология нейтрализации, основанная на фильтровании

озонированных растворов через фильтры, загруженные нейтрализующей загрузкой (известняк, мраморная крошка, природный мел, доломит и т.д.).

### **Практическая значимость полученных результатов**

Полученные результаты могут быть использованы для установления целесообразности и эффективности применения озона для очистки сточных вод текстильных предприятий, определения необходимой продолжительности реакции сточных вод с озоном и оптимальной дозы озона для снижения величины показателя ХПК до заданного значения, что позволит определять необходимый объём контактных камер реакции и оптимальную производительность озонаторной установки.

Разработанная технология очистки сточных вод текстильных предприятий может использоваться при проектировании новых локальных очистных сооружений и реконструкции существующих. Предлагаемая технология позволяет обеспечить снижение показателя ХПК, эффективное удаление красителей, текстильно-вспомогательных веществ и отделочных препаратов до предельно допустимых концентраций, а также уменьшить токсикологическую нагрузку на сооружения биологической очистки городской очистной станции за счет увеличения биологической разлагаемости веществ после озонирования более чем в 2 раза.

В процессе проведения производственных испытаний на текстильном предприятии ОАО «Світанак» были получены положительные результаты, которые обосновали возможность применения технологии очистки сточных вод методом озонирования для обесцвечивания промывных вод, образующихся при окрашивании тканей и текстильных изделий, что позволяет повторно использовать обесцвеченную промывную воду в производственном процессе. Данная технология дает возможность экономить значительные ресурсы (до 50 % воды, используемой для промывки окрашенных тканей). Расчеты показали, что при повторном использовании очищенных озоном промывных вод экономия составляет около 525000 бел. руб./год при 250 рабочих днях в году.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика расчета технологических параметров процесса озонирования, позволяющая обосновывать целесообразность обработки озоном исследуемых сточных вод, содержащих органические вещества, определять необходимую продолжительность контакта озона с ними и оптимальную дозу озона для снижения величины показателя ХПК озонируемых сточных вод до заданного значения, учитывающая скорость окисления веществ озоном и влияние характерных механизмов взаимодействия органических веществ с озоном.

2. Ресурсосберегающая технология очистки (доочистки) сточных вод текстильных предприятий методом озонирования, обеспечивающая эффективное удаление красителей, текстильно-вспомогательных веществ, отделочных препаратов, а также доочистку по показателю ХПК до предельно допустимых концентраций, увеличение биологической разлагаемости загрязнений (более чем в 2 раза), содержащихся в сточных водах текстильных производств, и регенерацию окрашенных промывных вод текстильных предприятий с целью их повторного использования в производственном процессе, позволяющая возвращать в производство до 50 % воды, используемой при промывке окрашенных тканей.

3. Параметры озонирования окрашенных промывных вод с введением оптимальных доз озона в две ступени, а также уравнение регрессии, позволяющее определять снижение интенсивности окраски по степени разбавления в зависимости от дозы озона и соотношения его долей, вводимых на каждой ступени.

#### **Личный вклад соискателя**

Диссертационная работа является самостоятельно выполненным научным трудом, основанным на собственных теоретических и экспериментальных исследованиях. Автор диссертации самостоятельно выполнил аналитический обзор литературных источников по теме диссертации. Определение цели и постановка задач проводились совместно с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом Беловом С. Г.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту, приведенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Соискатель разработал методы точного дозирования озона и специальные методы химического анализа. Соискатель лично получал экспериментальные данные, занимался их обработкой, написанием научных статей, обобщением и изложением материала диссертационной работы. Автор диссертации разработал и запатентовал конструкцию пневмогидравлического диспергатора газа для осуществления высокоэффективного введения озона в обрабатываемую воду в проточном режиме. Соискатель спроектировал и собрал экспериментальную установку непрерывного действия для озонирования жидких сред, на которой отрабатывались технологические режимы озонирования модельных растворов и промывных вод текстильных производств. На данной установке соискатель провел производственные испытания на текстильном предприятии ОАО «Світанак» г. Жодино.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании результатов**

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены: на Международной научно-технической конференции «Проблемы водоснабжения, водоотведения и энергосбережения в западном регионе



Республики Беларусь» (г. Брест, 22–23 апреля 2010 г.); на Международной научно-практической конференции «Научно-технические проблемы водохозяйственного и энергетического комплекса в современных условиях Беларуси» (г. Брест, 21–23 сентября 2011 г.); на IV Международной научно-практической конференции «Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания» (г. Брест, 25–27 сентября 2013 г.); на Международном научном семинаре «Влияние промышленных сточных вод на функционирование и мощность коммунальных очистных сооружений» (г. Брест, 12 октября 2016 г.); на Международном научном семинаре «Перспективные технологии очистки природных вод для питьевого и технического водоснабжения» (г. Брест, 4 октября 2017 г.); на Региональной научно-технической конференции, посвящённой 50-летию кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов «Перспективные методы очистки природных и сточных вод» (г. Брест, 26 сентября 2019 г.).

Результаты диссертационных исследований внедрены в производство:

Акт внедрения результатов НИР в производственный процесс от 30 декабря 2016 года, полученный в результате выполнения хозяйственного договора № 16/135 от 12 ноября 2016 года «Научно-обоснованные рекомендации по подбору озонатора для доочистки городских сточных вод г. Осиповичи».

Результаты диссертационных исследований прошли апробацию в производственных условиях:

Акт производственных испытаний технологии обесцвечивания промывных вод текстильных предприятий методом озонирования с целью их последующего использования в производственном процессе от 23.08.2022 г. Испытания были проведены на ОАО «Світанак» г. Жодино.

Результаты диссертационных исследований внедрены в учебный процесс.

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты опубликованы в 24 научных работах, в том числе 18 статей в рецензируемых изданиях, включенных в Перечни ВАК Республики Беларусь и Российской Федерации, 1 статья в другом издании, 4 статьи в сборниках материалов международных и региональных конференций, 1 патент на полезную модель. Общий объем публикаций 12,84 авторских листов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объём диссертации 235 страниц. Работа содержит 100 страниц машинописного текста, 94 рисунка на 82 страницах, 14 таблиц на 4 страницах, библиографический список из 112 наименований на 8 страницах, список публикаций соискателя из 24 наименований на 3 страницах и 13 приложений на 38 страницах.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе выполнен анализ литературных источников. Проанализировано стокообразование и характерный состав сточных вод, образующихся на текстильных предприятиях, а также рассмотрены основные методы, применяемые для очистки сточных вод данных предприятий. В результате выявлены преимущества и недостатки рассмотренных методов, а также выполнен анализ эффективности каждого метода очистки для удаления характерных загрязнений, присутствующих в сточных водах текстильных производств.

В настоящее время наиболее часто для очистки сточных вод текстильных предприятий используют методы реагентной коагуляции, электрокоагуляции и флотации. Однако данные методы по некоторым показателям загрязнений (интенсивность окраски, концентрация ПАВ, формальдегида и т.д.) не позволяют достичь нормативных значений и подходят лишь для удаления основной массы загрязнений, содержащихся в сточных водах текстильных предприятий. Метод «мокрого» сжигания позволяет осуществить глубокую деструкцию органических загрязнений. Однако концентрация органических загрязнений недостаточно велика, чтобы стало целесообразным применение метода «мокрого» сжигания для очистки сточных вод текстильных производств. Это связано с тем, что в сточные воды текстильных предприятий, кроме отработанных технологических растворов, попадает большое количество промывных вод, содержащих небольшое количество органических загрязнений.

Электрохимическое окисление целесообразно применять только для очистки отработанных красильных растворов, содержащих высокие концентрации неорганических солей, преимущественно хлоридов. В результате анализа литературных источников установлено: метод электрохимического окисления не позволяет достигать высокой глубины деструкции органических красителей, находящихся в сточных водах текстильных предприятий, поскольку при исследовании деструкции различных красителей методом электрохимического окисления выявлено наличие в продуктах деструкции ароматических соединений. Для очистки промывных вод, образующихся на текстильных предприятиях в большом количестве, метод электрохимического окисления не подходит в связи со слабой электропроводностью промывных вод, обусловленной низким количеством неорганических солей и других электролитов, содержащихся в них. По этой же причине метод электрохимического окисления нецелесообразно применять для очистки смеси отработанных красильных растворов с промывными водами текстильных предприятий.

В литературных источниках отмечено, что наибольшие затруднения вызывает доочистка сточных вод, в ходе которой необходимо концентрации

загрязнений довести до заданных предельно допустимых значений. Наиболее перспективным методом для осуществления доочистки сточных вод текстильных производств является озонирование. При анализе литературных источников определена необходимость разработки ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод, образующихся на текстильных предприятиях, с использованием метода озонирования, позволяющей достичь требуемой степени очистки по основным показателям, представляющим экологическую опасность для водных объектов. В результате анализа литературных источников сформулированы и обоснованы основные задачи, которые решались при выполнении экспериментальных исследований для достижения цели диссертационной работы.

**Во второй главе** описаны приборы и методы анализа, использованные в диссертационной работе. При выполнении исследований применялся метод точного дозирования озона в виде водного раствора. В исследованиях, в которых недопустимо сильное разбавление исследуемых проб, использовался метод точного дозирования озона с помощью фиксированного объема озоносодержащего газа, позволяющий вводить удельные дозы озона свыше 1 мг  $O_3$ /мг вещества, избегая сильного разбавления обрабатываемой пробы. Описан метод химического определения количества озона в водном растворе с помощью соли Мора. Уточнена зависимость равновесного соотношения концентраций озона в водной и газовой фазах от температуры.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований по деструкции различных веществ, содержащихся в сточных водах текстильных предприятий (красителей, текстильно-вспомогательных веществ, отелочных препаратов).

Выполнены спектрофотометрические исследования деструкции органических красителей различных классов в водных растворах при взаимодействии с озоном. В результате анализа экспериментальных данных установлены удельные дозы озона, необходимые для деструкции хромофорных систем и для полной деструкции ароматических структур органических красителей различных классов. Выяснено, что азосвязь ( $-N=N-$ ), входящая в хромофорную систему азокрасителей, сравнима по стойкости к действию озона с этиленовой связью ( $>C=C<$ ), входящей в состав молекул ароматических соединений. Установлено, что в результате деструкции органических веществ высокими удельными дозами озона образуются органические кислоты, медленно окисляющиеся озоном.

При анализе литературных источников обнаружено, что органические вещества различных классов реагируют с озоном неодинаково (с различной скоростью и по разным механизмам). Вещества, содержащие в своих молекулах кратные связи, реагируют по механизму присоединения, при этом все 3 атома

кислорода молекулы озона присоединяются к окисляемому веществу. При отсутствии в веществах кратных связей реакция идет по радикальному механизму, при котором к окисляемому веществу присоединяется 1 атом кислорода из трех, содержащихся в молекуле озона. Некоторые вещества настолько медленно реагируют с озоном, что применение озона для их деструкции нецелесообразно. К таким веществам относятся органические кислоты (муравьиная, щавелевая, пропионовая, малеиновая, яблочная, лимонная и т.д.) и другие соединения с насыщенными связями (циклогексанон, нитропропан и т.д.).

В литературных источниках не обнаружено методик определения необходимой продолжительности реакции с озоном и оптимальной дозы озона, учитывающих вышеприведенные факторы, влияющие на процесс озонирования сточных вод. Поэтому разработана методика расчета, позволяющая обосновывать целесообразность применения метода озонирования для снижения величины показателя ХПК конкретного вида сточных вод, содержащих органические вещества, устанавливать необходимую продолжительность реакции с озоном, определять оптимальную дозу озона. Оценку целесообразности применения озона для снижения ХПК предложено определять в соответствии с системой расчета, которая выполняется на основе определения коэффициента озonoокисляемости, характеризующего эффективность снижения значения показателя ХПК при использовании пробной дозы озона, соответствующей радикальному механизму окисления органических веществ, т.е. доза озона при этом должна составлять  $3 \cdot \text{ХПК}$  исходного раствора ( $3 \cdot \text{ХПК}_{\text{исх}}$ ). Расчет рекомендуемой продолжительности реакции с озоном выполняется на основе анализа величины снижения показателя ХПК в различные периоды времени. Определение оптимальной дозы озона производится с учетом вклада реакций, протекающих по механизму присоединения и по радикальному механизму.

Коэффициент озonoокисляемости определяется как отношение величины снижения показателя ХПК озонированной пробы дозой озона  $D_{\text{оз}} = 3 \cdot \text{ХПК}_{\text{исх}}$  за 15 минут проведения реакции к значению ХПК исходного раствора ( $\text{ХПК}_{\text{исх}}$ ). В зависимости от величины коэффициента озonoокисляемости делается вывод о целесообразности применения метода озонирования для снижения ХПК.

Необходимую продолжительность контакта озона с обрабатываемыми сточными водами предложено устанавливать в зависимости от значения коэффициента продолжительности взаимодействия с озоном, определяемого отношением величины снижения ХПК сточной воды при продолжительности реакции с озоном 30 минут к величине снижения ХПК при продолжительности реакции – 15 минут с использованием в обоих случаях дозы озона  $D_{\text{оз}} = 3 \cdot \text{ХПК}_{\text{исх}}$ . При значении коэффициента продолжительности взаимодействия озоном

менее 1,2...1,3 необходимое время реакции равно 15 минут. При более высоких значениях коэффициента продолжительности взаимодействия с озоном время реакции принимается равным 30 минут.

Коэффициент механизма реакции, устанавливающий соотношение влияния характерных механизмов взаимодействия озона с веществами, обуславливающими показатель ХПК сточных вод, предложено определять как отношение величины снижения показателя ХПК при использовании дозы озона  $D_{\text{оз}} = \text{ХПК}_{\text{исх}}$  к величине снижения показателя ХПК дозой озона  $D_{\text{оз}} = 3 \cdot \text{ХПК}_{\text{исх}}$ . Данный коэффициент определяется для ранее установленной необходимой продолжительности контакта сточных вод с озоном (15 или 30 минут).

Оптимальная доза озона определяется как отношение значения показателя ХПК исходного раствора ( $\text{ХПК}_{\text{исх}}$ ) к коэффициенту механизма реакции.

В диссертационной работе представлены результаты расчетов по предложенной методике параметров озонирования, выполненных на основе данных озонирования органических веществ различных классов. На основе этих расчётов установлена целесообразность озонирования, определена необходимая продолжительность взаимодействия с озоном и оптимальная доза озона для исследованных растворов органических веществ.

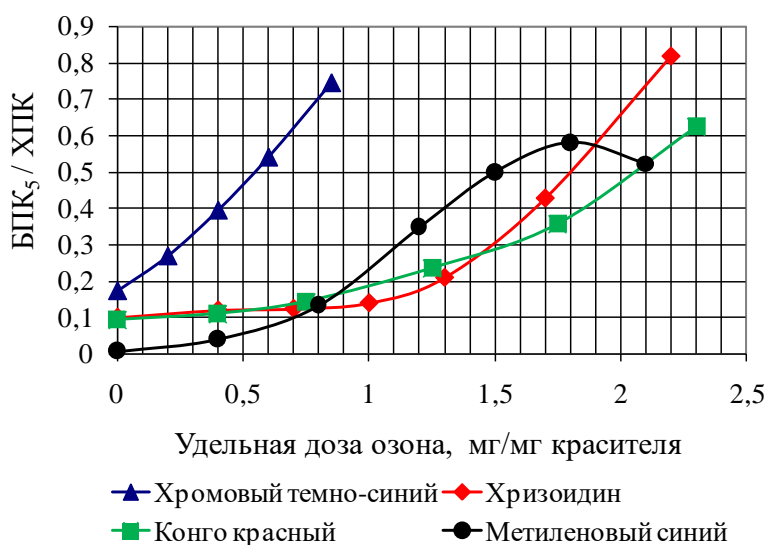
В некоторых литературных источниках отмечается возможность образования хинонов, при озонировании производственных сточных вод текстильных предприятий, которые представляют угрозу для водных экосистем. Для проверки данного утверждения выполнены исследования образования и деструкции хинонов при озонировании водных растворов. Для достижения данной цели усовершенствована методика определения хинонов в водных растворах. Установлено, что при правильно подобранной дозе озона в продуктах реакции хиноны отсутствуют.

Произведены исследования изменения величины биологической разлагаемости продуктов деструкции красителей и текстильно-вспомогательных веществ после озонирования различными удельными дозами. Установлено, что с увеличением удельной дозы озона, интенсивно уменьшается значение показателей ХПК и БПК<sub>5</sub>. При этом биологическая разлагаемость, характеризующаяся отношением БПК<sub>5</sub>/ХПК, увеличивается. В результате «биологически жесткие» вещества (слабо поддающиеся биохимическому окислению) деструктируются с образованием «биологически мягких» веществ (легко поддающихся биохимическому окислению). Это косвенно подтверждает, что в результате озонирования образуются органические кислоты, которые обладают высокой биологической разлагаемостью (свыше 0,7).

Результаты выполненных экспериментальных исследований обобщены и представлены на рисунке 1 в виде графических зависимостей, показывающих

изменение отношения показателя БПК<sub>5</sub>, определенного по методу разбавления, к показателю ХПК растворов красителей, обработанных различными удельными дозами озона.

Анализ графических зависимостей, представленных на рисунке 1, указывает на то, что озонирование растворов красителей позволяет не только значительно снизить величину показателя ХПК, но и увеличить биологическую разлагаемость, характеризуемую отношением показателей БПК<sub>5</sub> к ХПК. Значение биологической разлагаемости указывает на эффективность применения метода биологической очистки для последующего обезвреживания сточных вод на городской очистной станции.



**Рисунок 1. – Изменение отношения показателей БПК<sub>5</sub> к ХПК растворов красителей в зависимости от удельной дозы озона**

изменения отношения показателей БПК<sub>5</sub> к ХПК раствора красителя Метиленовый синий при различных удельных дозах озона. Для исходного раствора красителя данное отношение практически равно нулю, т.е. краситель Метиленовый синий является «биологически жестким» органическим веществом, слабо поддающимся биохимическому окислению. При деструкции раствора данного красителя озоном с увеличением удельной дозы образуются все более «биологически мягкие» органические вещества. При удельной дозе озона выше 1,8 мг/мг красителя наблюдается перегиб кривой, который свидетельствует о том, что при этих удельных дозах начинают образовываться более «биологически жесткие» продукты деструкции красителя. Это указывает на то, что удельная доза озона, при обработке сточных вод должна устанавливаться по результатам экспериментальных исследований.

Сточные воды, имеющие высокое значение биологической разлагаемости, эффективно очищаются на сооружениях биологической очистки, не вызывают угнетения микроорганизмов в аэротенках и биофильтрах, а в случае случайного попадания данных сточных вод в окружающую водную среду их загрязнения не аккумулируются в водных организмах.

Следует обратить внимание на зависимость

Исследована озонодеструкция ароматических и алифатических нитросоединений. Как известно, нитросоединения являются веществами стойкими к окислению, в то же время они могут присутствовать в составе текстильно-вспомогательных веществ, отделочных препаратов, а также образовываться на начальных этапах деструкции красителей, содержащих нитрогруппы.

Определены значения показателей ХПК и БПК<sub>5</sub> растворов исходных нитрозамещенных органических веществ и этих же растворов после озонирования. Исследование выполнялось с целью определения изменения в результате озонирования отношения показателей БПК<sub>5</sub> к ХПК, характеризующего возможность удаления органических веществ из сточных вод методом биологической очистки в биоокислителях и в водных объектах при протекании в них процессов самоочищения. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Изменение окисляемости нитрозамещенных органических веществ в результате озонирования

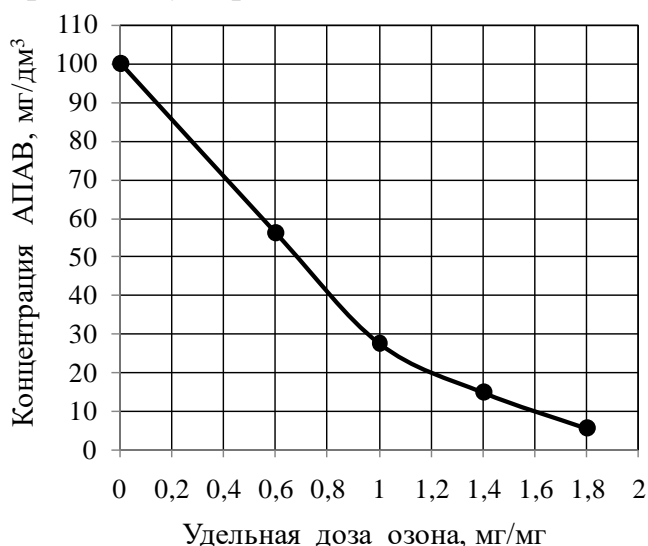
Вещество	Показатели, приведенные к концентрации 100 мг/дм <sup>3</sup> по исходному веществу					
	ХПК до озонирования	ХПК после озонирования	БПК <sub>5</sub> до озонирования	БПК <sub>5</sub> после озонирования	Отношение БПК <sub>5</sub> /ХПК до озонирования	Отношение БПК <sub>5</sub> /ХПК после озонирования
Нитробензол	159	16,95	13	10,5	0,082	0,62
Пара-нитрофенол	153	27,1	11	16	0,072	0,59
Краситель «Ланазин черный М-DL»	99,5	18,3	32	16,5	0,32	0,9
1-нитропропан	24,5	20,8	4	8	0,16	0,38

На основе анализа результатов исследований, представленных в таблице 1, установлено, что при использовании оптимальной дозы озона, рассчитанной по методике, приведенной в диссертации, ХПК водных растворов ароматических нитросоединений уменьшается более чем в 5 раз. Показатель БПК<sub>5</sub> при этом изменялся незначительно в сторону увеличения или уменьшения. Однако следует учитывать, что БПК<sub>5</sub> исходного раствора соответствует высокой концентрации вещества (100 мг/дм<sup>3</sup>), а БПК<sub>5</sub> после озонирования характеризует биохимическую окисляемость продуктов озонодеструкции веществ, молекулы которых в процессе озонирования значительно обогатились кислородом по сравнению с исходным веществом. Поэтому на окисление продуктов озонодеструкции требуется меньше кислорода, чем на окисление исходных веществ, что прослеживается по изменению отношения показателей БПК<sub>5</sub> к ХПК. Если до озонирования данное отношение для исследованных веществ имеет очень низкое значение, что указывает на незначительную биологическую разлагаемость исходных веществ, то после

озонирования отношение БПК<sub>5</sub> к ХПК превышает 0,55, что свидетельствует о высокой биологической разлагаемости продуктов озонодеструкции.

Деструкция озоном алифатического соединения 1-нитропропан идет значительно труднее. Результаты исследований, представленные в таблице 1, показывают, что величина биологической разлагаемости 1-нитропропана при деструкции озоном возрастает почти в 2,5 раза. Следовательно, озон хорошо окисляет не только ароматические, но и алифатические нитросоединения.

Сточные воды текстильных предприятий содержат не только красители, но и текстильно-вспомогательные вещества, применяемые для улучшения качества ткани. Одним из наиболее часто используемых текстильно-вспомогательных веществ являются ПАВ. Различные виды ПАВ в зависимости от химического строения используются как смягчители, эмульгаторы, смачиватели, выравниватели, антистатики, закрепители и т.д. Сточные воды текстильных предприятий могут содержать ПАВ в концентрациях 200 мг/дм<sup>3</sup> и выше. Попадание больших количеств ПАВ в водоемы может нанести серьезный ущерб водным экосистемам.



**Рисунок 2. – Концентрация АПАВ в зависимости от удельной дозы озона**

высокоэффективна, т.к. удалось снизить концентрацию данного АПАВ со 100 до 5,5 мг/дм<sup>3</sup>, т.е. приблизительно в 18 раз.

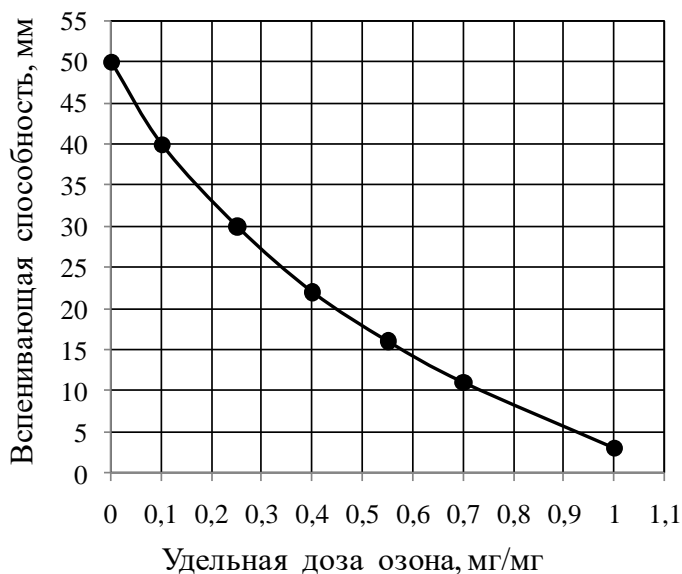
Для подтверждения результатов исследования изучено изменение вспенивающей способности растворов алкилбензолсульфоната, обработанных различными удельными дозами озона. Анализ зависимости, представленной на рисунке 3, указывает на то, что вспенивающая способность быстро снижается с увеличением удельной дозы озона. Это свидетельствует о том, что обработка озоном эффективна для снижения вспенивающей способности технологических растворов, что полезно при повторном использовании промывных вод для промывки ткани после окрашивания.

В диссертационной работе исследовалась деструкция растворимой соли алкилбензолсульфоновой кислоты методом озонирования. На рисунке 2 представлена зависимость концентрации анионного ПАВ (АПАВ) алклибнезолсульфоната от удельной дозы озона (мг/мг), вводимой в раствор.

Как видно из рисунка 2, деструкция алкилбензолсульфоната с помощью озона

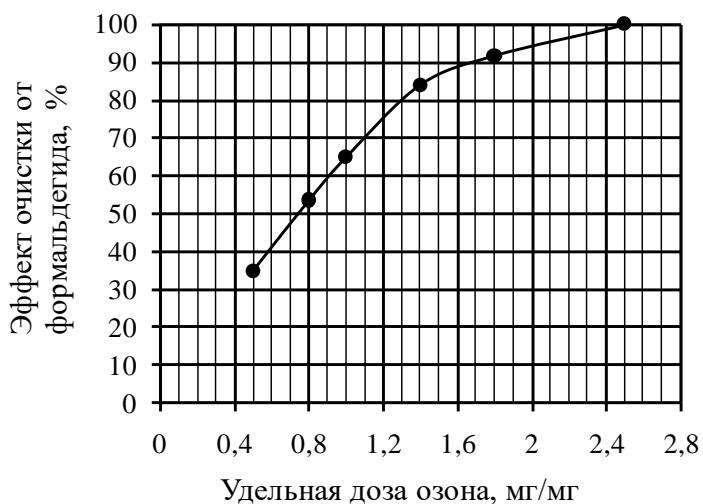


В текстильной промышленности широко используются отделочные препараты. Как правило, они являются предконденсатами различных высокомолекулярных веществ и в процессе обработки ткани закрепляются на ней и придают необходимые свойства.



**Рисунок 3. – Зависимость вспенивающей способности алкилбензолсульфоната от удельной дозы озона**

водного раствора формальдегида от удельной дозы озона, представленная на рисунке 4.



**Рисунок 4. – Результаты исследований по удалению формальдегида из водных растворов с помощью озона**

деструкции формальдегида замедляется. Полное удаление формальдегида из водного раствора с помощью озонирования наблюдается при удельной дозе озона 2,5 мг/мг формальдегида.

В состав большинства предконденсатов данных полимеров входит формальдегид. После обработки ткани из состава предконденсата выделяется свободный формальдегид, который при последующей промывке попадает в сточные воды.

В процессе исследований установлено, что озон хорошо окисляет формальдегид, при этом образуется муравьиная кислота. В результате выполненных экспериментов получена зависимость эффекта очистки

Анализ результатов исследования указывает на то, что с увеличением удельной дозы озона остаточная концентрация формальдегида в растворе уменьшается, т.е. эффект очистки растет. При этом до удельной дозы озона 1,4 мг/мг формальдегида эффект очистки возрастает практически прямо пропорционально увеличению удельной дозы озона, а при дальнейшем увеличении удельной дозы озона процесс

В процессе проведения исследований установлено, что показатель рН растворов после обработки высокими дозами озона иногда снижается до уровня 3...3,5 в результате образования органических кислот. Величина снижения показателя рН зависит от количества окисленных озоном веществ. При этом значение показателя рН, допустимого к сбросу, не должно быть ниже 6,5. Поэтому возник вопрос о нейтрализации сточных вод после озонирования.

В литературных источниках не обнаружено никаких сведений о данном явлении и способах нормализации показателя рН после озонирования. Поэтому предложена технология нейтрализации, основанная на фильтровании озонированных растворов через фильтры, загруженные нейтрализующей загрузкой. В качестве нейтрализующей загрузки необходимо использовать доломит, или мраморную крошку, или известняк. В результате взаимодействия органических кислот с нейтрализующей загрузкой образуются соли органических кислот, вследствие этого показатель рН становится нейтральным. Использование мраморной крошки при проведении экспериментов по нейтрализации озонированных растворов органических веществ привело показатель рН к значениям, допустимым к сбросу в городскую канализацию.

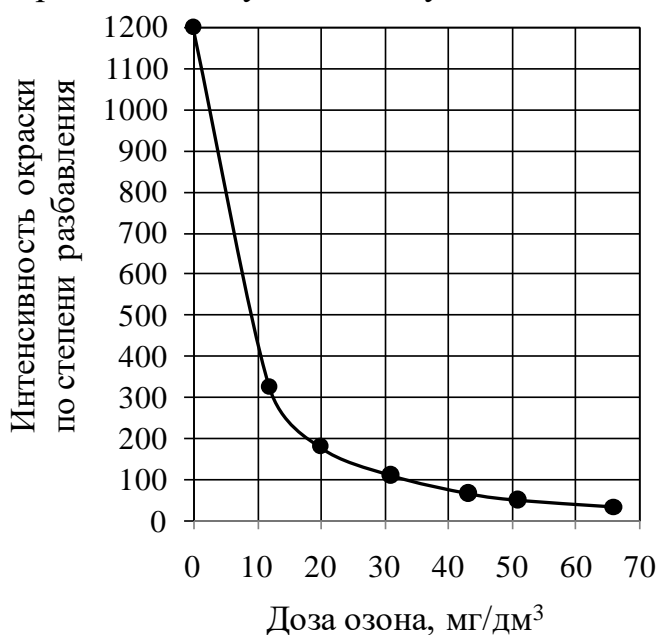
**В главе 4** выполнены исследования взаимодействия озона с реальными сточными водами, полученными с текстильного предприятия ОАО «Світанак» г. Жодино. Данные исследования подтвердили, что озон эффективно взаимодействует с красителями, обесцвечивая сточную воду, несмотря на присутствие других загрязнений, обеспечивающих высокое значение показателя ХПК.

Исследована зависимость интенсивности окраски по степени разбавления реальных сточных вод с текстильного производства ОАО «Світанак» от применяемой дозы озона. Отобраны пробы из двух точек технологической схемы очистки. Проба № 1 отобрана из емкости для сбора сточных вод после активного крашения и имела интенсивность окраски по степени разбавления 1:1200, а проба № 2 отобрана из усреднителя сточных вод и имела интенсивность окраски по степени разбавления 1:300.

На рисунке 5 приведен график зависимости интенсивности окраски от дозы озона при обработке пробы № 1 сточной воды, отобранной из емкости для сбора вод после активного крашения локальных очистных сооружений ОАО «Світанак».

Анализ зависимости, представленной на рисунке 5, позволяет сделать вывод: даже минимальная доза озона, использованная в данном исследовании (12 мг/дм<sup>3</sup>) снижает интенсивность окраски сточных вод более чем в 3 раза (с 1:1200 до 1:320). Это свидетельствует о высокой эффективности озона как реагента для обесцвечивания производственных сточных вод, окраска которых обусловлена органическими красителями.

При увеличении дозы озона наблюдается дальнейшее снижение интенсивности окраски сточных вод, однако эффект снижения окраски по мере увеличения дозы озона уменьшается. Это объясняется тем, что в первую очередь озон взаимодействует с двойными связями органических молекул красителя, которые обуславливают высокую интенсивность окраски. После разрушения двойных связей хромофорных систем молекул образуются продукты неполной деструкции красителей, которые часто также имеют окраску, однако не такую интенсивную, как исходные красители. Для окисления продуктов неполной деструкции красителей требуются более высокие дозы озона и более длительное время реакции, поскольку взаимодействие озона с данными веществами в большинстве случаев протекает по радикальному механизму.



**Рисунок 5. – Интенсивность окраски по степени разбавления пробы № 1, отобранной из емкости для сбора сточных вод после активного крашения, в зависимости от дозы озона**

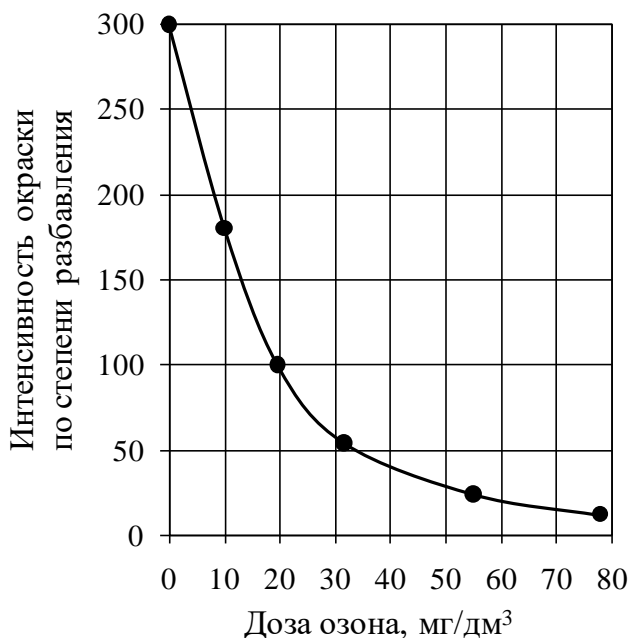
активного крашения в дальнейшем поступают в усреднитель, где разбавляются приблизительно в 10 раз.

Исследована эффективность применения озона для снижения интенсивности окраски основного потока сточных вод из усреднителя (проба № 2). В данный усреднитель поступают сточные воды как от активного крашения (проба № 1) в количестве около 200 м<sup>3</sup>/сут., так и от прямого крашения, промывок и других обработок текстильных материалов в количестве до 2000 м<sup>3</sup>/сут. Сточные воды после усреднителя подвергаются очистке методом реагентной флотации и затем выпускается в городскую канализацию.

В серии экспериментов с пробой сточной воды № 1 максимальная доза озона равнялась 66 мг/дм<sup>3</sup>, при этом интенсивность окраски по степени разбавления сточной воды после озонирования составила 1:32. Хотя данное значение превышает нормативное значение (1:20) для выпуска сточных вод как в водоемы, так и в городскую водоотводящую сеть, но с учетом последующего разбавления слабоокрашенными сточными водами дальнейшее обесцвечивание можно не производить, поскольку согласно технологической схеме обработанные сточные воды от

Однако очистка сточных вод в напорном флотаторе с добавлением коагулянта и флокулянта не позволяет глубоко обесцветить воду, поэтому актуально исследование возможности снижения интенсивности окраски сточных вод из усреднителя до нормативных значений методом озонирования.

На рисунке 6 представлена зависимость снижения интенсивности окраски пробы № 2 сточной воды, отобранной из усреднителя, от дозы озона.



**Рисунок 6. – Интенсивность окраски по степени разбавления пробы № 2, отобранной из усреднителя сточных вод, в зависимости от дозы озона**

Дозой озона (60 мг/дм³) происходит снижение интенсивности окраски в 30 раз.

Таким образом, при обработке пробы № 1 озон снижает интенсивность окраски приблизительно в 2 раза эффективнее, чем при обработке пробы № 2. Это свидетельствует о том, что для обесцвечивания продуктов неполной деструкции красителя требуются более высокие дозы озона, чем для обесцвечивания исходных красителей. В усреднитель поступают как необработанные сточные воды после прямого крашения, так и сточные воды после активного крашения, подвергшиеся электрохимическому окислению. Также на увеличение дозы озона влияет наличие в сточных водах основного потока значительного количества легкоокисляемых органических веществ, попадающих в сточные воды при таких технологических операциях, как заключительная отделка текстильных материалов, отварка, отбелка и т.д.

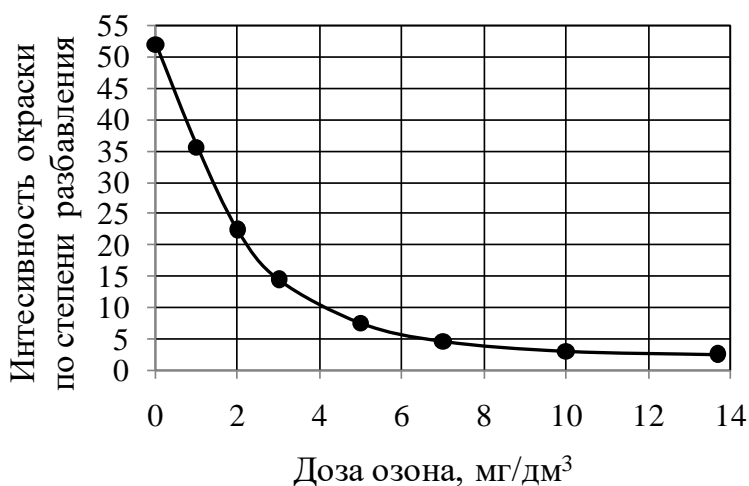
В результате анализа экспериментальных данных по озонированию сточных вод из усреднителя установлено, что снижение ХПК практически равнялось дозе озона, что свидетельствует о протекании реакции по механизму присоединения. Несмотря на очень высокую эффективность использования

озона при обработке данного вида сточных вод, значительное снижение показателя ХПК методом озонирования нерационально, поскольку требуется очень большой удельный расход озона. Более эффективно снизить показатель ХПК другими методами очистки, а озонирование использовать для снижения интенсивности окраски сточных вод до нормативных значений.

Исследована возможность повторного использования промывной воды после окрашивания тканей на текстильном предприятии ОАО «Світанак» г. Жодино. После обобщения и анализа показателей качества воды с каждой ступени промывки сделан вывод: промывную воду с последних шести ступеней промывки тканей после окрашивания можно смешать и подвергнуть очистке методом озонирования, а затем использовать на первых четырех ступенях промывки после окрашивания тканей.

Результаты исследований по озонированию смеси промывных вод с последних шести ступеней промывки окрашенных тканей свидетельствуют о высокой эффективности использования озона для снижения показателей: ХПК, перманганатной окисляемости и интенсивности окраски. При дозе озона  $10 \text{ мг О}_3/\text{дм}^3$  перманганатная окисляемость достигла величины  $9,8 \text{ мг О}_2/\text{дм}^3$ , т.е. стала менее  $10 \text{ мг О}_2/\text{дм}^3$ , что соответствует требованиям, предъявляемым к качеству воды, подаваемой на красильно-отделочное производство.

Снижение интенсивности окраски при озонировании смеси промывных вод с последних шести ступеней промывки тканей представлено на рисунке 7.



**Рисунок 7. – Снижение интенсивности окраски смеси промывных вод с последних шести стадий промывок ткани в зависимости от дозы озона**

Интенсивность окраски при озонировании снижается вначале очень резко, а начиная с дозы озона  $7...8 \text{ мг О}_3/\text{дм}^3$  интенсивность окраски стабилизируется на очень низком уровне, практически неразличимом визуально.

Как показывает анализ выполненных исследований, озонирование позволяет значительно улучшить качество загрязненных промывных вод после

окрашивания тканей по таким важнейшим показателям как интенсивность окраски, перманганатная окисляемость и общее содержание органических веществ, характеризуемое показателем ХПК. Поэтому представляется возможным повторно использовать регенерированные методом озонирования

промывные воды для целей промывки тканей, особенно для первых ступеней промывки.

Для обоснования целесообразности организации повторного использования регенерированных промывных вод на примере текстильного предприятия ОАО «Світанак» г. Жодино выполнен экономический расчет на основании полученных данных: стоимости свежей воды, расхода и стоимости химических реагентов, используемых в процессе водоподготовки, а также платы за отведение сточных вод в коммунальную канализацию.

Предприятие ОАО «Світанак» использует приблизительно 2000 м<sup>3</sup> технической воды в сутки. Для технологических нужд предприятия ОАО «Світанак» используется речная вода, покупаемая у холдинга «БелАЗ» по цене 0,78 бел. руб. за 1 м<sup>3</sup>. Далее на локальной станции водоподготовки технической воды предприятия ОАО «Світанак» осуществляется очистка речной воды до соответствия общим требованиям, предъявляемым к технической воде красильно-отделочного производства. Удельные финансовые затраты на реагенты для осуществления подготовки 1 м<sup>3</sup> воды, используемой для технологических нужд, составляет 1,6 бел. руб. Оплата за отведение 1 м<sup>3</sup> воды в коммунальную канализационную систему равна 0,62 бел. руб. В итоге, для подготовки 1 м<sup>3</sup> технической воды на предприятии ОАО «Світанак» расходуется 3,0 бел. руб. Необходимо отметить, что в данную сумму не входит стоимость доставки реагентов, оплата труда сотрудников, работающих на станции водоподготовки, а также оплата электроэнергии, расходуемой в процессе эксплуатации станции подготовки технической воды.

По данным предприятия из 2000 м<sup>3</sup> потребляемой технической воды на окрашивание тканей и их промывку после окрашивания расходуется около 1400 м<sup>3</sup> технической воды в сутки. Как отмечалось ранее, на окрашивание 270 кг тканей расходуется 1,1 м<sup>3</sup> технической воды, а на последующие 10 ступеней промывки расходуется еще 11 м<sup>3</sup> воды. При повторном использовании воды с последних шести ступеней промывки тканей можно уменьшить расход технической воды красильного цеха примерно на 50 %. При расходе технической воды на окрашивание и промывку тканей 1400 м<sup>3</sup>/сут. повторно можно использовать 700 м<sup>3</sup>/сут. С учетом стоимости подготовки 1 м<sup>3</sup> технической воды 3,0 бел. руб. экономия может составить 2100 бел. руб./сут. (525000 бел. руб./год при 250 рабочих днях в году).

Определены параметры озонирования окрашенных промывных вод с введением необходимой дозы озона в две ступени, а также получено уравнение регрессии, устанавливающее взаимосвязь снижения интенсивности окраски промывных вод, образующихся при промывке тканей, от дозы озона и соотношения его долей, вводимых на каждой ступени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Установлено, что метод озонирования позволяет достичь глубокой деструкции органических красителей и текстильно-вспомогательных веществ, содержащихся в сточных водах текстильных предприятий. Озонирование является высокоэффективным методом обесцвечивания растворов органических красителей [1, 2, 4–12, 16].

2. Получены зависимости изменения показателей ХПК и БПК<sub>5</sub> растворов красителей различных классов от удельной дозы озона. Обнаружено, что с увеличением удельной дозы озона возрастает биологическая разлагаемость обработанных озоном растворов красителей, характеризуемая отношением показателей БПК<sub>5</sub> к ХПК [3, 5, 12].

3. Доказано, что при дозах озона, достаточных для деструкции всех находящихся в сточных водах ароматических соединений, хиноны также гарантированно удаляются [3, 6, 10, 14].

4. Установлено, что озон эффективен для деструкции анионных ПАВ (АПАВ), в частности алкилбензолсульфоната, в водных растворах. С увеличением удельной дозы озона при обработке водного раствора алкилбензолсульфоната наблюдается уменьшение вспенивающей способности, концентрации АПАВ, показателя ХПК. Глубокая деструкция озоном алкилбензолсульфоната, широко применяемого на текстильных предприятиях в качестве текстильно-вспомогательного вещества, подтверждает высокую эффективность метода озонирования для очистки сточных вод от анионных ПАВ [3, 6, 14, 16].

5. Показана эффективность применения озона для очистки сточных вод текстильных предприятий от таких опасных для водных объектов веществ, как формальдегид, выделяющийся из отделочных препаратов при осуществлении заключительной отделки тканей [3, 6, 7, 14].

6. Установлено, что значение показателя рН водных растворов органических веществ в результате озонирования снижается до значений ниже допустимых к сбросу как в городскую водоотводящую сеть, так и в водоемы. Для устранения нежелательного снижения величины рН растворов после озонирования предложено использовать простые по конструкции и в эксплуатации безнапорные фильтры с загрузкой из природных нейтрализующих материалов (доломит, известняк, мраморная крошка и т.д.). Данные материалы широко доступны и имеют низкую стоимость [3, 6, 11, 14].

7. Предложена методика расчета параметров озонирования, позволяющая обосновывать целесообразность применения метода озонирования в конкретном случае, устанавливать необходимую продолжительность контакта сточных вод с озоном и определять оптимальную дозу озона для снижения

величины показателя ХПК озонируемых сточных вод до заданного значения, учитывающая скорость окисления веществ озоном и влияние характерных механизмов взаимодействия органических веществ с озоном. Установлена возможность применения предложенной методики для определения параметров озонирования при доочистке городских сточных вод [3, 8].

8. Выполнены исследования по озонированию реальных сточных вод текстильного предприятия ОАО «Світанак» г. Жодино, таких как сточные воды после активного крашения и сточные воды из усреднителя. Установлено, что озон позволяет эффективно снижать интенсивность окраски исследованных сточных вод до нормативных значений. Однако озонирование целесообразно применять после удаления основного количества загрязнений при помощи других методов очистки. Применение метода озонирования для доочистки сточных вод текстильных предприятий позволяет снизить интенсивность окраски, концентрацию анионных ПАВ и показатель ХПК до нормативных значений [2, 9, 13, 18–21].

9. Анализ результатов проведенных исследований указывает на то, что смесь промывных вод с последних шести ступеней промывки ткани можно очистить при помощи озонирования до требований, предъявляемых к качеству технической воды, подаваемой на красильно-отделочное производство, по таким важнейшим показателям, как цветность, интенсивность окраски по степени разбавления, перманганатная окисляемость и ХПК. По предварительным оценкам можно повторно использовать 35...40 % технической воды, потребляемой текстильным производством ОАО «Світанак» на технологические нужды. Экономический эффект может составить приблизительно 2100 бел. руб./сут. [2, 13, 17–19, 21, 23].

10. С целью ресурсосбережения разработана технология с введением озона при помощи пневмогидравлического диспергатора газа в две ступени, т.к. дробное введение озона эффективнее, чем однократное. Определены параметры озонирования окрашенных промывных вод с двухступенчатым введением необходимой дозы озона, а также получено уравнение регрессии, устанавливающее взаимосвязь снижения интенсивности окраски промывных вод, образующихся при промывке тканей, от дозы озона и соотношения его долей, вводимых на каждой ступени [15, 22, 24].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Методика расчета технологических параметров процесса озонирования применена для обоснования целесообразности очистки методом озонирования сточных вод г. Осиповичи, прошедших полную биологическую очистку, установления необходимой продолжительности контакта озона с обрабатываемыми сточными водами и определения оптимальной дозы озона для снижения величины показателя ХПК озонируемых сточных вод до



заданного значения с учетом скорости окисления веществ озоном и влияния характерных механизмов взаимодействия органических веществ с озоном. На основании выполненной научной работы получен акт внедрения в производство от 30 декабря 2016 года. Предложенная методика расчета применима к любым сточным водам, содержащим органические загрязнения, с целью обоснования целесообразности применения метода озонирования для их очистки, определения необходимой продолжительности контакта с озоном и оптимальной дозы озона.

2. На текстильном предприятии ОАО «Світанак» г. Жодино проведены производственные испытания технологии обесцвечивания промывных вод методом озонирования с целью их последующего использования в производственном процессе, подверженные актом производственных испытаний от 23.08.2022 г. Химическая лаборатория ОАО «Світанак» засвидетельствовала, что промывка окрашенных тканей промывной водой, очищенной методом озонирования, не повлияла на качество тканей, и это подтвердило возможность повторного использования данной воды для промывки тканей и текстильных изделий. Выполненные исследования показали, что используемую при промывке окрашенных тканей воду до 50 % можно очищать методом озонирования и возвращать в производство. Разработанная технология повторного использования промывных вод применима к текстильным производствам, имеющим цеха по окрашиванию тканей и текстильных изделий.

3. Применение метода озонирования для доочистки сточных вод текстильных предприятий обеспечит снижение показателя ХПК, эффективное удаление красителей, текстильно-вспомогательных веществ и отделочных препаратов до предельно допустимых концентраций, а также увеличит биологическую разлагаемость органических загрязнений, содержащихся в сточных водах текстильных производств, более чем в 2 раза, что позволит значительно снизить токсикологическую нагрузку на сооружения биологической очистки городской очистной станции и на окружающую водную экосистему.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых изданиях, включенных в Перечни ВАК Республики Беларусь и Российской Федерации

1. Применение деструктивных методов очистки сточных вод предприятий текстильной промышленности для создания технологий их повторного использования / Б. Н. Житенев, С. Г. Белов, Г. О. Наумчик, Н. Ю. Сторожук, Ю. Е. Любчук // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во и теплоэнергетика. – 2009. – № 2. – С. 68–71.

2. Житенев, Б. Н. Применение озона для снижения окраски сточных вод текстильных предприятий легкой промышленности / Б. Н. Житенев, С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2010. – № 2. – С. 90–97.

3. Белов, С. Г. Разработка метода точного дозирования высоких удельных доз озона при обработке воды / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2011. – № 2. – С. 73–81.

4. Житенев, Б. Н. Спектрометрические исследования влияния дозы озона на степень деструкции красителей в водных растворах / Б. Н. Житенев, С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2012. – № 2. – С. 26–32.

5. Житенев, Б. Н. Исследование влияния продуктов реакции органических красителей с озоном на процесс последующей биологической очистки / Б. Н. Житенев, С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2013. – № 2. – С. 42–46.

6. Белов, С. Г. Определение глубины деструкции органических соединений методом УФ-спектроскопии / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2013. – № 2. – С. 46–50.

7. Белов, С. Г. Исследование деструкции формальдегида в водных растворах с помощью озона / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2014. – № 2. – С. 54–58.

8. Белов, С. Г. Исследование эффективности применения озона для очистки сточных вод от органических загрязнений различных классов / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2014. – № 2. – С. 72–78.

9. Белов, С. Г. Применение озонирования для обработки сточных вод ОАО «Світанак» с целью их доведения до нормативных показателей /

С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2015. – № 2. – С. 98–103.

10. Белов, С. Г. Исследование образования и разрушения хинонов в процессе озонирования сточных вод текстильных предприятий / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2015. – № 2. – С. 103–108.

11. Белов, С. Г. Необходимость корректировки величины рН сточных вод перед выпуском очищенных методом озонирования / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2016. – № 2. – С. 50–54.

12. Белов, С. Г. Исследование деструкции нитрозамещённых органических веществ в водных растворах при озонировании / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2016. – № 2. – С. 54–58.

13. Белов, С. Г. Разработка инструментального метода определения интенсивности окраски сточных вод текстильных предприятий / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – № 3. – С. 53–65.

14. Белов, С. Г. Возможность идентификации ароматических соединений в водных растворах методом УФ-спектроскопии / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2017. – № 2. – С. 90–94.

15. Наумчик, Г. О. Разработка метода диспергирования газа с помощью турбулентного потока жидкости на границе пористой стенки / Г. О. Наумчик, В. С. Белов // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2017. – № 2. – С. 102–105.

16. Белов, С. Г. Очистка сточных вод текстильных предприятий от поверхностно активных веществ методом озонирования / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2018. – № 2. – С. 138–141.

17. Белов, С. Г. Повторное использование окрашенных промывных вод для целей промывки ткани после крашения / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2020. – № 1. – С. 27–37.

18. Белов, С. Г. Применение озона для снижения интенсивности окраски сточных вод предприятий текстильной промышленности / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Водоснабжение и санитарная техника. – 2022. – № 9. – С. 44–52.

#### **Статья в другом издании**

19. Belov, S. The application of ozone to reduce the coloring intensity of aqueous solutions of dyes used in the textile industry [Electronic resource] / S. Belov,

G. Naumchik // 2020 International Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2020), Brest, Belarus, October 29–30, 2020 / Brest State Technical University, Anhui Institute of Architecture. – 2020. – Vol. 212. – 10 p. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021201001>. – Mode of access: <https://rep.bstu.by/handle/data/30353>. – Date of access: 26.11.2020.

### **Материалы конференций**

20. Житенев, Б. Н. Применение озона для снижения окраски сточных вод предприятий легкой промышленности на примере ОАО «Брестский чулочный комбинат» / Б. Н. Житенев, С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Проблемы водоснабжения, водоотведения и энергосбережения в западном регионе Республике Беларусь : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 65-летию победы в Великой Отечественной войне, Брест, 22–23 апр. 2010 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Басов [и др.]. – Брест, 2010. – С. 284–289.

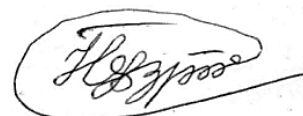
21. Житенев, Б. Н. Инструментальный метод определения интенсивности окраски сточных вод / Б. Н. Житенев, С. Г. Белов, Г. О. Наумчик // Научно-технические проблемы водохозяйственного и энергетического комплекса в современных условиях Беларуси : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 21–23 сент. 2011 г. : в 2 ч. / Брест. гос. техн. у-нт ; редкол.: П. С. Пойта [и др.]. – Брест, 2011. – Ч. 1. – С. 68–72.

22. Белов, С. Г. Пневмогидравлический диспергатор газа «Торнадо» / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик, Е. И. Дмухайло // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 25–27 сент. 2013 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест, 2013. – С. 7–12.

23. Наумчик, Г. О. Экономическое обоснование необходимости повторного использования окрашенных промывных вод на текстильных предприятиях / Г. О. Наумчик // Перспективные методы очистки природных и сточных вод : сб. ст. регион. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов, Брест, 26 сент. 2019 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: С. Г. Белов [и др.]. – Брест, 2019. – С. 28–30.

### **Патент**

24. Пневмогидравлический диспергатор газа : пат. ВУ 12838 / С. Г. Белов, Г. О. Наумчик. – Опубл. 28.02.2022.



## РЭЗІЮМЭ

Наумчык Рыгор Астапавіч

### Распрацоўка рэсурсазберагальнай тэхналогіі ачысткі сцёкавых вод тэкстыльных прадпрыемстваў метадам азаніравання

**Ключавыя словы:** пафарбаваныя сцёкавыя воды, азонаякисленне, удзельная доза азону, фарбавальнікі, пахучыя вуглеводароды, аліфатычныя аксіллучэнні, арганічныя кіслоты, БСК<sub>5</sub>, ХСК, паказчык рН, тэкстыльна-дапаможныя рэчывы, апрацоўчыя прэпараты.

**Аб'ект даследавання** – сцёкавыя і прамыўныя воды, якія ўтвараюцца на тэкстыльных прадпрыемствах пры фарбаванні тканіны.

**Прадмет даследавання** – працэсы ачысткі метадам азаніравання, сцёкавых вод на тэкстыльных прадпрыемствах.

**Мэта работы** – распрацаваць рэсурсазберагальную тэхналогію ачысткі (даачысткі) сцёкавых вод тэкстыльных прадпрыемстваў, якая дазволіць дасягнуць нарматыўных значэнняў па такіх паказчыках як інтэнсіўнасць афарбоўкі па ступенях разбаўлення, ХСК, БСК<sub>5</sub>, канцэнтрацыя аніённых ПАВ, канцэнтрацыя фармальдэгіда і павялічыць біялагічны распад сцёкавых вод, характэрны адносінам БСК<sub>5</sub>/ХСК.

**Метады даследавання.** Для даследавання выкарыстоўваліся хімічныя, біяхімічныя, інструментальныя, тэхналагічныя і матэматычныя метады.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Упершыню распрацавана метадыка разліку, якая дазваляе абгрунтаваць мэтазгоднасць прымянення метаду азаніравання для ачысткі даследуемых сцёкавых вод, устанаўліваць неабходную працягласць кантакту азону з імі, вызначыць аптымальную дозу азону для зніжэння велічыні паказчыка ХСК да зададзенага значэння, якая будзе ўлічваць скорасць акіслення азомам і ўплыў характэрных механізмаў ўзаемадзеяння арганічных рэчываў з азомам.

Эксперыментальна даказана павелічэнне біялагічнага распаду забруджанасці сцёкавых вод (больш чым у 2 разы), якая ўтвараецца на тэкстыльных прадпрыемствах, пасля азаніравання. Пацверджана поўная дэструкцыя раствораў фарбавальнікаў, хінонаў, аніённых ПАВ, фармальдэгіда пры правільных параметрах працэсу азаніравання, устаноўлена неабходнасць нейтралізацыі азаніраванай сцёкавых вод у выніку ўтварэння арганічных кіслот.

Распрацавана тэхналогія ачысткі прамыўных вод, якая ўтвараецца пры фарбаванні тканіны, метадам азаніравання да значэнняў паказчыкаў, што дазваляюць паўторна іх выкарыстоўваць для мэт прамыўкі.

Вызначаны параметры азаніравання пафарбаваных прамыўных вод з увядзеннем азону ў дзве ступені, а таксама прапанавана ўраўненне рэгрэсіі, якое дазваляе вызначыць зніжэнне інтэнсіўнасці фарбавання па ступені разбаўлення ў залежнасці ад дозы азону і суадносін яго долей, уводных на кожнай ступені.

**Ступень выкарыстання.** Праведзены вытворчыя выпрабаванні распрацаванай тэхналогіі на ААТ «Світанак» г. Жодзіна.

**Галіна прымянення.** Прадпрыемствы лёгкай прамысловасці.

## РЕЗЮМЕ

Наумчик Григорий Остапович

### **Разработка ресурсосберегающей технологии очистки сточных вод текстильных предприятий методом озонирования**

**Ключевые слова:** окрашенные сточные воды, озonoокисляемость, удельная доза озона, красители, ароматические углеводороды, алифатические оксисоединения, органические кислоты, ПАВ, БПК<sub>5</sub>, ХПК, показатель рН, текстильно-вспомогательные вещества, отделочные препараты.

**Объект исследования** – сточные и промывные воды, образующиеся на текстильных производствах при окрашивании тканей.

**Предмет исследования** – процессы очистки методом озонирования сточных вод текстильных предприятий.

**Цель работы** – разработать ресурсосберегающую технологию очистки (доочистки) сточных вод текстильных предприятий, позволяющую достичь нормативных значений по таким показателям, как интенсивность окраски по степени разбавления, ХПК, БПК<sub>5</sub>, концентрация анионных ПАВ, концентрация формальдегида и увеличить биологическую разлагаемость сточных вод, характеризуемую отношением БПК<sub>5</sub>/ХПК.

**Методы исследований.** Для исследований использовались химические, биохимические, инструментальные, технологические, математические методы.

**Полученные результаты и их новизна.** Впервые разработана методика расчёта, позволяющая обосновывать целесообразность применения метода озонирования для очистки исследуемых сточных вод, устанавливать необходимую продолжительность контакта озона с ними, определять оптимальную дозу озона для снижения величины показателя ХПК до заданного значения, учитывающая скорость окисления веществ озоном и влияние характерных механизмов взаимодействия органических веществ с озоном.

Экспериментально доказано увеличение биологической разлагаемости загрязнений сточных вод (более чем в 2 раза), образующихся на текстильных предприятиях, после озонирования. Подтверждена полная деструкция растворов красителей, хинонов, анионных ПАВ, формальдегида при правильных параметрах процесса озонирования, установлена необходимость нейтрализации озонированных сточных вод вследствие образования органических кислот.

Разработана технология очистки промывных вод, образующихся при окрашивании тканей, методом озонирования до значений показателей, позволяющих повторно их использовать для целей промывки.

Определены параметры озонирования окрашенных промывных вод с введением оптимальных доз озона в две ступени, а также предложено уравнение регрессии, позволяющее определять снижение интенсивности окраски по степени разбавления в зависимости от дозы озона и соотношения его долей, вводимых на каждой ступени.

**Степень использования.** Проведены производственные испытания разработанной технологии на ОАО «Світанак» г. Жодино.

**Область применения.** Предприятия легкой промышленности.

## SUMMARY

Naumchik Grigoriy Ostapovich

### **Development of resource-saving technology for sewage treatment of textile enterprises by ozonation**

**Keywords:** colored sewage, ozone oxidizability, specific dose of ozone, dyes, aromatic hydrocarbons, aliphatic oxide compounds, organic acids, surfactants, BOD<sub>5</sub>, COD, pH, textile auxiliaries, finishing preparations.

**The object of research** is sewage and washing water formed in textile industries during the dyeing of fabrics.

**The subject of the study** is the processes of purification by ozonation of sewage from textile enterprises.

**The purpose of the work** is to develop a resource-saving technology for the purification (post-treatment) of sewage from textile enterprises, which allows to achieve regulatory values for such indicators as the intensity of coloring by degree of dilution, COD, BPK<sub>5</sub>, concentration of anionic surfactants, concentration of formaldehyde and increase the biological decomposition of wastewater, characterized by the ratio of BOD<sub>5</sub>/COD.

**Research methods.** Chemical, biochemical, instrumental, technological and mathematical methods were used for research.

**The results obtained and their novelty.** For the first time, a calculation method has been developed that makes it possible to justify the expediency of using the ozonation method to purify the sewage under study, to establish the necessary duration of ozone contact with them, to determine the optimal dose of ozone to reduce the value of the COD index to a given value, taking into account the rate of oxidation of substances by ozone and the influence of characteristic mechanisms of interaction of organic substances with ozone.

An increase in the biological decomposability of sewage pollution (more than 2 times) generated at textile enterprises after ozonation has been experimentally proven. The complete destruction of solutions of dyes, quinones, anionic surfactants, formaldehyde with the correct parameters of the ozonation process was confirmed, the need for neutralization of ozonated sewage due to the formation of organic acids was established.

A technology has been developed for cleaning the washing waters formed during the staining of fabrics by ozonation up to the values of the indicators that allow them to be reused for washing purposes.

The parameters of ozonation of colored washing waters with the introduction of optimal doses of ozone in two stages are determined, and a regression equation is proposed that allows determining the decrease in the intensity of coloring by the degree of dilution depending on the dose of ozone and the ratio of its fractions administered at each stage.

**The degree of use.** Production tests of the developed technology were carried out at JSC «Svitanak» in Zhodino.

**Scope of application.** Light industry enterprises.

Научное издание

**НАУМЧИК**  
**Григорий Остапович**

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ  
МЕТОДОМ ОЗОНИРОВАНИЯ**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация,  
строительные системы охраны водных ресурсов

Подписано к печати 11.10.2023. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага «Performer».  
Гарнитура «Times New Roman».  
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 70. Заказ № 1186

Отпечатано на ризографе учреждения образования  
«Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/235 от 24.03.2014 г.