

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова
Российской академии наук
(ИОНХ РАН)



На правах рукописи

Федулов Игорь Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ОСНОВ МЕТОДА
ОЧИСТКИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМОЙ В
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРОТОЧНЫХ РЕАКТОРАХ**

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной
степени кандидата химических наук

Москва 2024

Работа выполнена в лаборатории ультразвуковой техники и технологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук (ИОНХ РАН)

Научные руководитель: Камлер (Абрамова) Анна Владимировна, кандидат технических наук, заведующая лабораторией ультразвуковой техники и технологии ФГБУН Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук.

Официальные оппоненты: Зайцев Николай Конкордиевич, доктор химических наук, профессор, руководитель фирмы ООО "Эконикс-Эксперт". Член НСАХ.

Вязьмин Андрей Валентинович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий им. Н.И. Гельперина Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина». 119991, Москва, Ленинский пр-т., д.65. Тел: +7 (499) 507-88-88, E-mail: com@gubkin.ru

Защита состоится 12 ноября 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 02.6.013.95 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института общей и неорганической химии им Н.С. Курнакова РАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОНХ РАН по адресу: Москва, Ленинский проспект, 31. Автореферат см. на сайте www.igis.ras.ru.

Автореферат разослан «04» октября 2024 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,

Кандидат химических наук



А.В. Полковниченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Ежегодно увеличивающиеся масштабы индустриальной активности человека делают все более актуальной проблему очистки сточных вод и загрязненных почв (поверхности твердых тел). Благодаря проведенным ранее работам в области методологии очистки и водоподготовки, в настоящее время сформирована обширная база технологических знаний. На данный момент уже разработан широкий набор физических, химических, а также биологических методов очистки (фильтрация, флотация, осаждение без применения ПАВ, термическая обработка, воздействие УФ излучением, акустические методы, реагентная очистка, озонирование, использование биореакторов с активным илом и биофильтрация, и.т.д.). Каждый из них имеет свои достоинства, недостатки, а также области применения.

Однако, анализ современного уровня знаний в предлагаемой области исследований показывает, что вышеперечисленные методы недостаточны для решения проблем в таких областях промышленности, в которых возникают стоки комплексного состава, например, химическая, фармацевтическая, аграрная и др.

Например, на птицефабриках и аграрных предприятиях затруднено применение таких традиционных методов очистки, как термическая или реагентная обработка. Используя гидросмывной способ удаления отходов, такие производства в большом количестве производят жидкие стоки, содержащие возбудители инфекционных заболеваний (сальмонелла, стафилококк, энтерококк). При этом, проблема усугубляется тем, что в этих же стоках содержатся такие сложные органические соединения, как различные виды антибиотиков или гормональных лекарственных препаратов. Для предотвращения угрозы окружающей среде, эти стоки должны быть утилизированы, однако использование термической обработки требует больших затрат энергии для поддержания рабочей температуры процесса, а использование реагентов невозможно из-за непредсказуемости химических реакций.

Возможным решением данной проблемы может стать создание комбинированных методов очистки воды, объединяющих достоинства существующих физико-химических методов при взаимной компенсации недостатков одиночных технологий. Известно, что ультразвуковое воздействие может интенсифицировать физико-химические и химические процессы, лимитирующие эффективность очистки.

Среди физико-химических методов активно разрабатываются новые аппараты очистки стоков, основанные на высокоэффективных окислительных процессах. Эффективность таких процессов определяется возможностью генерировать в потоке обрабатываемых стоков большого количества активных компонентов, реагирующих с основными загрязнителями. Для повышения эффективности часто прибегают к использованию не одного, а сразу нескольких способов, поскольку механизмы обработки могут сильно отличаться и зачастую не зависят друг от друга, и даже обладать синергическим эффектом при совместном использовании. При этом, при разработке нового метода чрезвычайно важным остаётся вопрос компактности разрабатываемого оборудования и возможности вписать его в уже существующие технологические схемы.

Одним из перспективных направлений, можно выделить метод обработки воды в плазме. Анализ литературных источников показал, что данный метод может обладать хорошей эффективностью очистки как от микробиологических загрязнений, так и от сложных химических соединений, но способов реализации в промышленных масштабах до сих пор не было предложено. Таким образом, целью работы является разработка и

исследование такого метода очистки, который бы позволил применить плазму в проточном реакторе.

В данной работе будет рассмотрена возможность применения ультразвуковых технологий и метода инициации в потоке воды плазменного разряда в поле кавитации в единой технологической цепочке, а также решение проблем масштабного перехода и отработка оптимальных технологических решений в укрупненном масштабе.

Цель работы

Разработка физико-химических основ метода очистки и обеззараживания воды плазмой в поле кавитации в проточных системах. Основной задачей является возможность организации плазменного разряда в потоке жидкости, благодаря чему производительность может быть значительно увеличена. В ходе исследования необходимо определить характерные для процесса технические зависимости, которые будут учтены при проектировании будущих установок.

Объекты исследования

Плазма, образуемая в области кавитации в движущемся потоке жидкости.

Задачи

- Разработка физико-химических основ метода очистки воды плазмой в поле кавитации.
- Разработка аппарата для реализации метода очистки воды плазмой в проточных ультразвуковых реакторах
- Разработка способа увеличения производительности для осуществления масштабного перехода.

Научная новизна работы

Впервые был разработан высокоэффективный метод очистки и обеззараживания воды путём применения плазмы генерируемой в поле гидродинамической кавитации для очистки воды, содержащих загрязнители различной химической и биологической природы. Проанализированы физико-химические факторы, влияющие на эффективность процесса, показано что воздействие плазмы в поле кавитации приводит к генерации в потоке жидкости активных радикалов, что вызывает эффект пролонгированного действия.

Теоретическая значимость работы

Полученные данные о возникновении таких активных форм кислорода как гидроксид радикалы и перекись водорода, а также их пролонгированное воздействие значительно улучшает понимание процесса образования плазмы в потоке квитирующей жидкости, что открывает большие возможности исследования метода процесса очистки в химической технологии. Данные об оптимизации рабочих характеристик и возможности повышения эффективности с помощью катализа позволяют прогнозировать возможности оборудования для решения конкретных задач.

Практическая значимость работы

В ходе разработки метода были получены и оптимизированы геометрические размеры экспериментальной установки и ее технологические характеристики, которые были заложены в основу разработанного опытного образца промышленного оборудования. Созданная установка может быть применена в системах водоочистки различных отраслей производств, таких как производства пищевой и текстильной промышленности, а также в системах очистки и обеззараживания стоков птицефабрик и медицинских учреждений. Использование проточных ультразвуковых реакторов в комбинации с плазмой позволяет заметно сократить расходы реагентов, используемых для очистки сточных вод.

Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химической технологии, а именно включает в себя следующие:

- Результаты фундаментальных исследований метода очистки и обеззараживания воды холодной плазмой в движущемся потоке жидкости и анализ физических явлений, протекающих в ней при обработке вод, содержащих микробиологические загрязнители и химические загрязнители (метанол, пищевой краситель, антибиотик).

- Методы и способы интенсификации химико-технологических процессов водоочистки, в том числе с помощью ультразвукового воздействия на реагенты.

- Метод моделирования аппарата, предназначенного для обработки воды методом холодной плазмы в поле кавитации.

- Данные, позволяющие провести масштабный переход и разработать высокопроизводительную установку очистки и обеззараживания воды, основанную на использовании разработанной технологии.

Методология и методы исследования

Достоверность результатов обеспечена использованием современных стандартизированных методов измерения и анализа, включая проектирование с помощью системы САПР.

На защиту выносятся следующие положения:

- Физико-химические основы метода, заключающиеся в описании процесса возникновения в потоке воды активных веществ с помощью плазмы в поле кавитации и полученных зависимостях эффективности процесса от давления внутри рабочей камеры и расстояния между электродами.

- Результаты исследования эффективности подавления микроорганизмов в плазме.

- Результаты исследования эффективности воздействия плазмы на органические соединения, в частности на метиловый спирт, антибиотики, красители.

- Технологические особенности аппаратов, разработанные для осуществления масштабного перехода от лабораторного макета к опытному образцу промышленной производительности.

Личный вклад соискателя состоит в разработке методологии исследования, проведении экспериментальной части и анализе полученных результатов, а также в личном участии на всех этапах исследования, в том числе в процессе разработки и сборки лабораторного и опытного оборудования и в процессе подготовки статей, публикации и материалов проведения научных конференций.

Апробация работы

Результаты были представлены на международных конференциях: Международная конференция «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы». г. Витебск, Беларусь (25-28 мая 2021 г.); Международной научной конференцией «1st JOINT SONOCHEMISTRY CONFERENCE», ESS-JSS-AOSS, Япония, Ноябрь 2021. III Международная научно-практическая конференция "Научные исследования 2022", г. Пенза, 2022. XXVII Международная научно-практическая конференция "Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации", г. Пенза, 2022. III Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной науки», г. Пенза 2022

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 печатных работах: 7 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных (Web of Science и Scopus). На основе данных был получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора, материалов и методов, экспериментальной части, обсуждения результатов, выводов и списка

используемой литературы (109 источников). Объем диссертации составляет 111 страниц и содержит 57 иллюстраций и 11 таблиц.

Благодарности.

Работа выполнена в рамках проекта «Проект “Чистая вода” как важнейшая составляющая сотрудничества РФ со странами Глобального Юга: социально-экономическое и технологическое измерения» по гранту Министерства науки и высшего образования РФ на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (Соглашение № 075-15-2024-546).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение раскрывает актуальность проблемы обработки сточных вод, на основе которой формулируется цель проведения исследований и ставятся ряд необходимых для её достижения задач. Далее формулируется научная новизна и оценивается практическая значимость разрабатываемого метода.

Глава 1. Литературный обзор

Литературный обзор включает в себя рассмотрение существующих методик водоподготовки и отмечает недостатки традиционных технологий, заключающихся в неспособности обеспечивать должную степень очистки от сложных органических и микробиологических загрязнений. В этой главе приведён подробный анализ механизмов деструкции загрязнителей и отмечен высокий потенциал методов, основанных на комбинировании факторов воздействия, в частности группы методов, относящихся к «высокоэффективным окислительным процессам». В качестве альтернативы существующим методам был предложен метод обработки плазмой в поле кавитации. В результате проведённого анализа литературных источников, посвящённых механизмам образования плазмы и протекающим в ней процессам, для исследований был выбран способ образования плазмы в движущемся потоке жидкости. В данном случае разряд производился в ультразвуковом поле генерируемым гидродинамическим излучателем. Такой излучатель преобразует часть энергии турбулентной струи жидкости в энергию акустического поля. В кавитационной области, образующейся при работе гидродинамического излучателя, на стадии роста пузырьков, многократно увеличивается их диаметр, а давление в них может падать до очень малых значений. Электрическое поле может приводить к выстраиванию таких пузырьков в цепочки с образованием микроканалов, в которых выполняются условия пробоя Пашена, что приводит к возникновению в них плазменного разряда. Этот эффект может быть использован при разработке новых методов, основанных на высокоэффективных окислительных процессах.

Глава 2. Физико-химические основы метода холодной плазмы

В данной главе рассматривается принципиальная схема лабораторной установки для обработки воды в плазменном реакторе, механизмы образования электрического разряда в потоке кавитирующих пузырьков, образующихся в результате работы гидродинамического излучателя, и протекающие физико-химические процессы плазмы в потоке жидкости. Принципиальная схема лабораторной установки и фотография плазменного разряда, образующегося при работе реактора, представлены на рисунке 1.

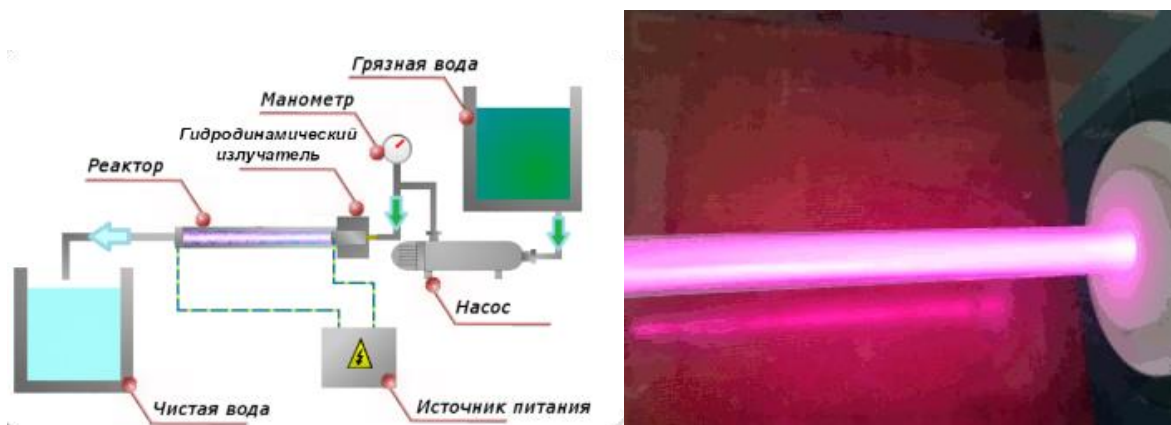
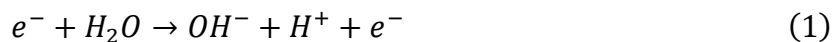


Рисунок 1. Схематичное изображение соноплазменной экспериментальной установки и фото горения плазмы в реакторе.

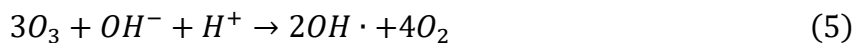
При разработке физико-химических основ метода была выдвинута следующая гипотеза распространения разряда в поле кавитирующей жидкости: при пропускании потока жидкости в реакторе образуются локальные электрические пробои, сопровождающиеся образованием стримеров – тонких микроканалов между пузырьками с ионизированной паровоздушной средой внутри. В результате происходит непрерывное высвобождение активных веществ, стремящихся к границе раздела фаз, способных оказывать на содержащиеся в воде загрязнители мощное химическое воздействие, попутно образуя микрзоны с высокой температурой и давлением.

В момент подачи жидкости в плазменный реактор из гидродинамического излучателя выходит турбулентная струя, в которой возникают акустические колебания с частотой в широком диапазоне до 60 кГц и интенсивностью колебаний, достигающей 4 Вт/см².

При этом, основной химической реакцией процесса является диссоциация молекулы воды под воздействием электрического тока



Поскольку OH^{-} ион обладает высокой активностью, то основное химическое воздействие на молекулы загрязняющих веществ происходит вблизи электродов, после чего возникают вторичные более стабильные формы активных веществ, такие как водород кислород, озон, и другие рекомбинации, возникающие в процессе распада молекулы воды, которые продолжают участие в процессе деструкции молекул загрязнителей.



Для проверки гипотезы на основе уравнения Нолтинга-Неппайреса (уравнение 6), описывающего изменения радиуса кавитационной полости в поле ультразвуковой волны, была проведена оценка изменения радиуса осциллирующего в акустическом поле пузырька. Построение модели проводилось совместно с Голубовым А.А., Карабасовым Т., Васенко А.С. В научных работах, посвящённых процессу возникновения разряда в квантационных пузырях, уже проводилась успешная попытка моделирования условий пробоя, однако данная модель применима для малой статичной экспериментальной установки с волноводно-излучающей системой. В случае плазмы в поле кавитации, расстояние между электродами значительно больше (от 10 и более раз), а механизм образования кавитационных пузырей гидроакустический, из-за чего состав газов и характеристики пузырей могут отличаться.

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_0} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - (P_0 - P_A \sin wt) \right] \quad (6)$$

где P_0 - начальное давление в пузырьке [Па] (10^5 Па); P_A - амплитуда давления излучения [Па]; ω - частота акустического излучения [2π Гц]; R_0 - начальный радиус пузырька [м]; ρ_0 - плотность жидкости [кг/м^3] (997 кг/м^3 для воды); σ - поверхностное натяжение жидкости [Н/м] ($72,86 \cdot 10^{-3}$ для воды при 20 C°).

Было показано, что радиус пузырьков на стадии расширения может увеличиваться до 100 раз. Полученные данные в результате расчетов пузырьков в логарифмическом масштабе приведены на рисунке 2.

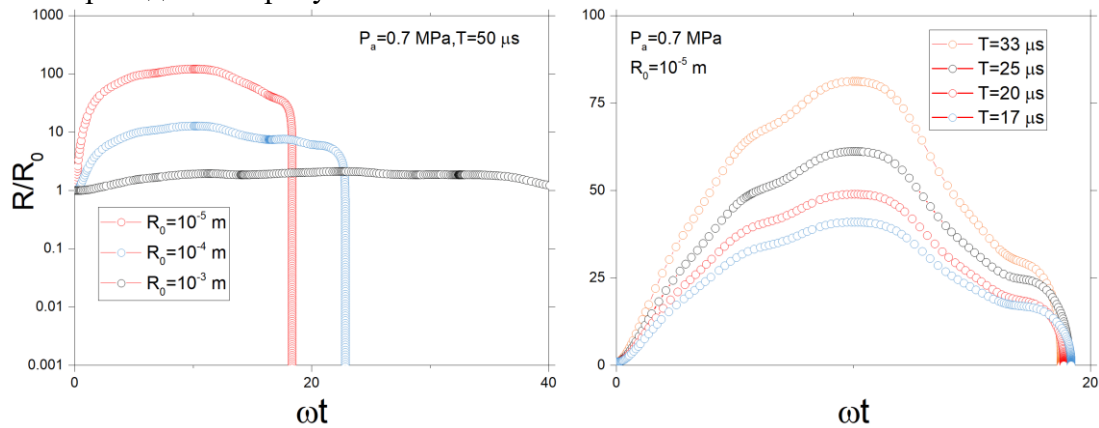


Рисунок 2. Зависимость отношения размера квитирующих пузырей газа к времени пребывания в потоке.

Используя таунсендовский механизм пробоя газовых промежутков и сформулированный на его основе закон Пашена (уравнение 7), а также используя расчетные данные динамики изменения размера кавитирующего пузырька, удалось определить оптимальную длину разрядной камеры, при которой наблюдались минимальные энергетические затраты необходимые для осуществления первичного электрического пробоя, за которым следует возникновение плазмы (рис. 3. а).

$$U_n = \frac{Bpd}{\ln \left[\frac{Apd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]} \quad (7)$$

где A и B - коэффициенты определяемые из эксперимента; p - давление газа; d - расстояние между электродами; γ - число электронов, выходящих из катода на один падающий положительный ион.

Было показано, что малая длина реактора недостаточна для образования нужного размера пузырей газа, то есть шанс возникновения плазмы в такой среде ниже чем в реакторе с большей длиной. С другой стороны, слишком большая камера требует большей энергии для обеспечения горения по всей длине, а также приводит к разрывам зоны горения. Оптимальная длина для выбранной конфигурации составила приблизительно 150-175 мм. На основе этих данных была построена экспериментальная установка (рис. 1) и получены экспериментальные данные согласующиеся с моделью (рис. 3. б)

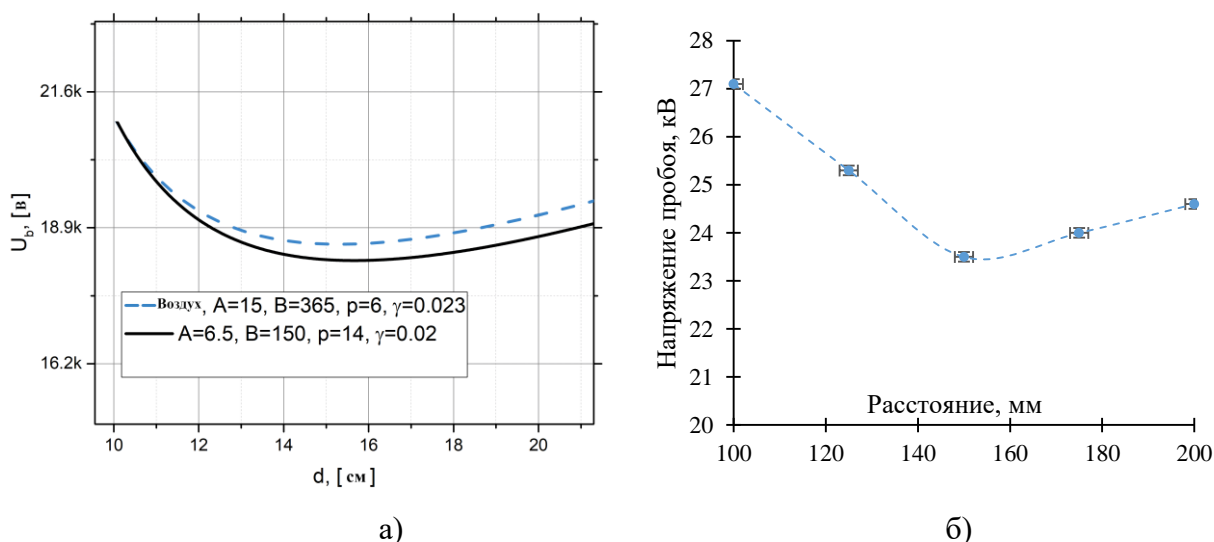


Рисунок 3. Расчётная (а) и экспериментальная (б) зависимость напряжения пробоя от расстояния между электродами

Поскольку процесс горения плазмы в реакторе сопровождается ярким свечением вдоль всей длины зоны кавитации, то было проведено исследование спектрального состава, образуемого плазмой излучения в диапазоне длин волн от 200 нм до 1000 нм. Характерный спектр излучения приведен на рис. 4.

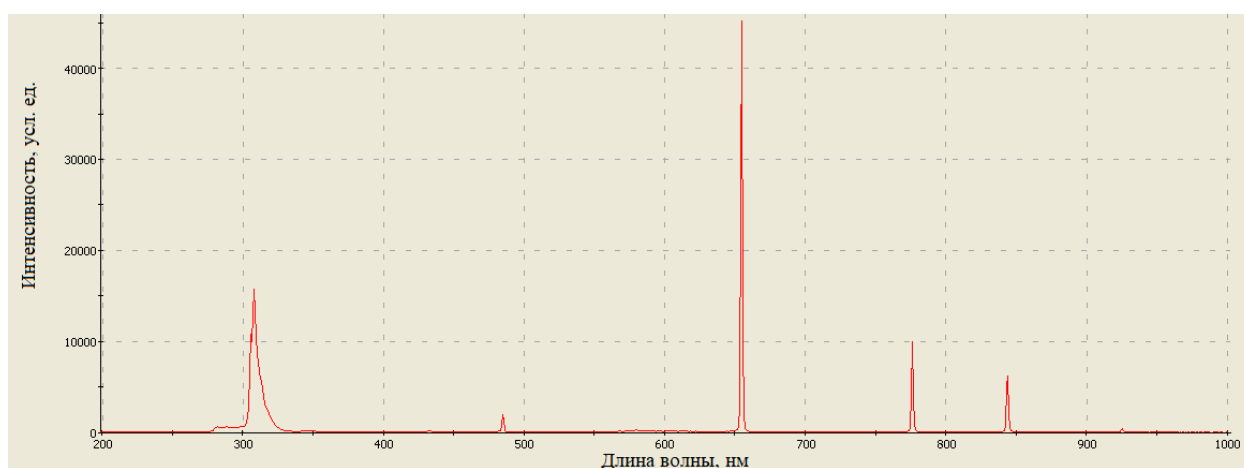


Рисунок 4. Общий вид спектра излучения плазменного разряда, формирующегося в поле гидродинамической кавитации (цинковые электроды)

В результате анализа спектров было выявлено пять основных пиков. Первый пик находится в зоне ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн от 280 до 330 нм и соответствует гидроксид радикалу. Два следующих пика относятся к излучению в видимом спектре, которое формирует характерный розоватый оттенок: синее излучение (481-488 нм) и красное излучение (653-658 нм). Данные пики соответствуют линиям водорода и имеют наибольшую интенсивность свечения. Последние два пика находятся на границе видимого излучения. Длины волн этих пиков составляют 774-779 нм и 940-950 нм. Эти пики могут быть связаны с кислородом. Основываясь на этих данных, можно сделать вывод, что основными механизмами деструкции являются химические превращения водорода, в то время как интенсивность свечения может косвенно указывать на эффективность горения плазмы, поскольку может выражать количество выработанного водорода в процессе горения.

В дополнении к этим данным так же были изучены спектры горения плазмы при высоких содержаниях загрязнителей. Изменения интенсивности свечения плазмы в

диапазоне длин волн от 200 до 1000 нм для дистиллированной воды, воды с содержанием хлорида натрия 15 г/л и воды с растворённой эмульсией нефти с содержанием 10 мг/л (эмульсия приготовлюсь путём добавления чистой нефти в воду в ультразвуковом поле) приведены на рис. 5. Установлено, что интенсивность плазменных процессов в сильно загрязнённых водах может заметным образом снижаться. Таким образом, существует область концентрации загрязнителей, в которой применение плазмы в поле кавитации в процессах водоочистки будет энергетически неоправданно. В таком случае необходим блок предварительной очистки.

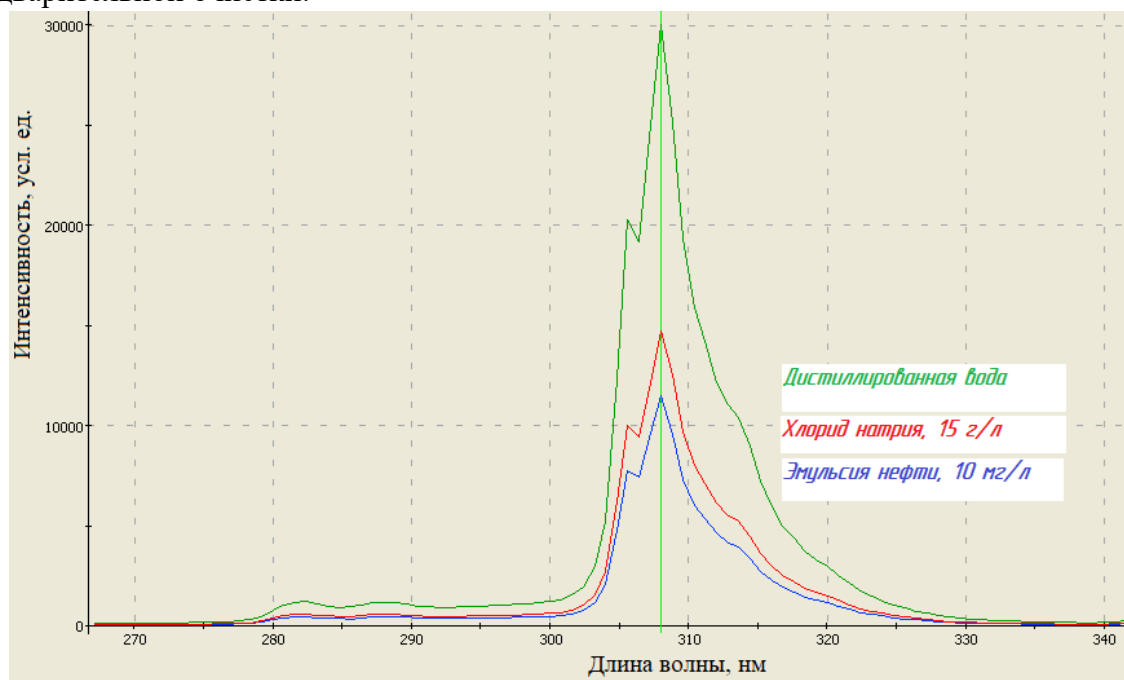


Рисунок 5. Интенсивность свечения плазмы в диапазоне длин волн от 260 до 340 нм при высоких содержаниях загрязнителей в обрабатываемой воде.

Для понимания механизмов химической деструкции содержащихся в воде загрязнителей, в плазме был проведён опыт на определение активных форм кислорода, попутно позволяющий оценить возможность катализа процесса. Исследование проводилось совместно с Баранчиковым А.Е., Созаруковой М.М., Каменевой С.В. В ходе эксперимента, обработанная в плазменном реакторе вода смешивалась с хемолуминесцентным зондом L-012 (8-амино-5-хлор-2,3-дигидро-7-фенил-мононатриевая соль) - аналогом люминола в нитрат-фосфатном буферном растворе (рН 7.4), а затем с помощью хемолуминесцентного метода определялась интенсивность свечения реакции. В качестве образцов выступал чистый образец (определение шума) и образец, обработанный в плазме (без оксида церия и с концентрацией оксида церия 5 мг/л и 50 мг/л).

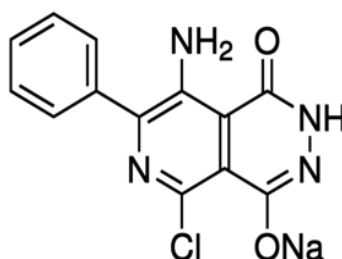
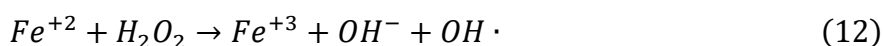


Рисунок 6. Структура хемолуминесцентного зонда L-012

Оксид церия был выбран в качестве испытуемого вещества поскольку он способен взаимодействовать с активными формами кислорода и проявлять как антиоксидантные свойства, так и прооксидантные свойства. Например, при взаимодействии с перекисью водорода, которой с большей вероятностью образуется в плазме, происходит обратимая реакция с выделением гидропироксильного радикала, при этом избытке кислорода оксид церия (III) может обратно окисляться до оксида церия (IV).



Установлено, что обработанная вода имеет определённый уровень хемоллюминесцентного свечения, которой держится некоторый промежуток времени, в то время как наличие оксида церия значительно усиливает этот эффект (Рис. 7). Основываясь на данных из литературных источников, был сформулирован вывод о том, что в результате воздействия плазмы образуются стабильные и нестабильные активные формы кислорода, такие как гидроксильный радикал, перекись, озон, и их производные (возможно, некоторые из форм связаны с примесями в воде, например, с содержащимися металлами).



При этом, добавленный в обрабатываемую воду оксид церия создаёт дополнительную возможность для концентрирования и последующих реакций активных форм кислорода, участвуя в процессе как катализатор.

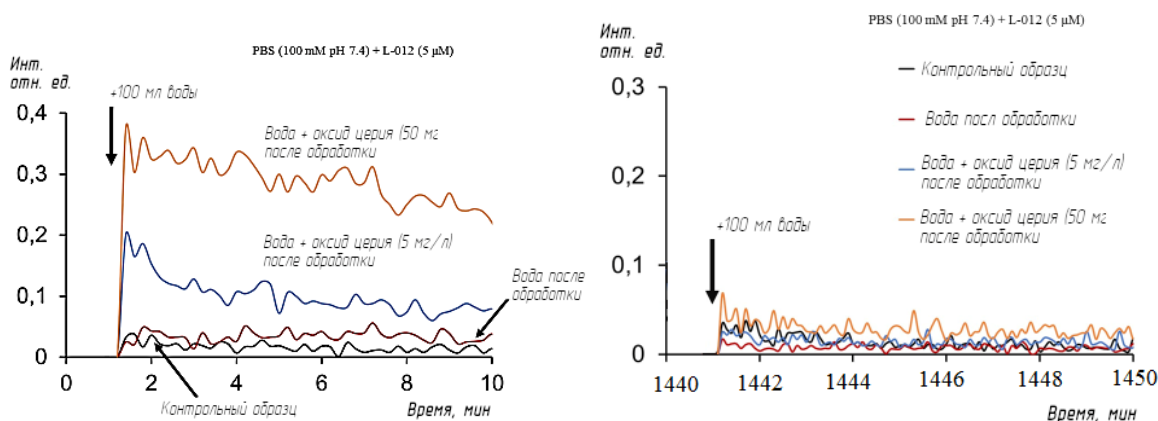


Рисунок 7. Кривые интенсивности свечения при добавлении в раствор L-012 образцов обработанной воды в плазме

Положительный эффект свечения при добавлении оксида церия связан с тем, что оксид церия аккумулирует на себе стабильные активные формы кислорода, которые образуются внутри плазменного реактора и ещё не успели покинуть зону обработки. Взаимодействуя с хемоллюминесцентным зондом, обработанная с содержанием оксида церия вода, возвращает активные вещества в виде более способных к реакции радикалов. Аналогичный процесс протекает и в плазменном реакторе, что говорит о том, что оксид церия может усиливать химическое воздействие на содержащиеся в воде загрязнители как в момент обработки, так и в течение 24 и более часов.

Глава 3. Конструкции проточных плазменных реакторов. Выбор оптимальных режимов обработки

С целью дальнейшей оптимизации процесса было проведено исследование основных зависимостей характеристик плазменного разряда от давления подаваемой жидкости. Исследования были направлены на оптимизацию геометрических размеров реактора, режимов работы гидродинамического излучателя, оптимизацию энергетических затрат. Исследования проводились совместно с Никоновым Р.В, Войтовым Ю.И., Абрамовым В.О.

В процессе выбора режима работы гидродинамического излучателя измерялась зависимость давления в разрядной камере от величины давления жидкости, подаваемой на вход в плазменный реактор. Было показано, что в режиме развитой кавитации на выходе из гидродинамического излучателя образуется область пониженного давления. В ходе эксперимента, также исследовалось влияние подаваемого давления на напряжение, при котором обеспечивалось стабильное горение разряда. В ходе эксперимента было выявлено, что от давления входящей жидкости зависит энергетическая составляющая процесса, а именно вольтамперная характеристика разряда. Экспериментально полученные зависимости приведены на рисунке 8.

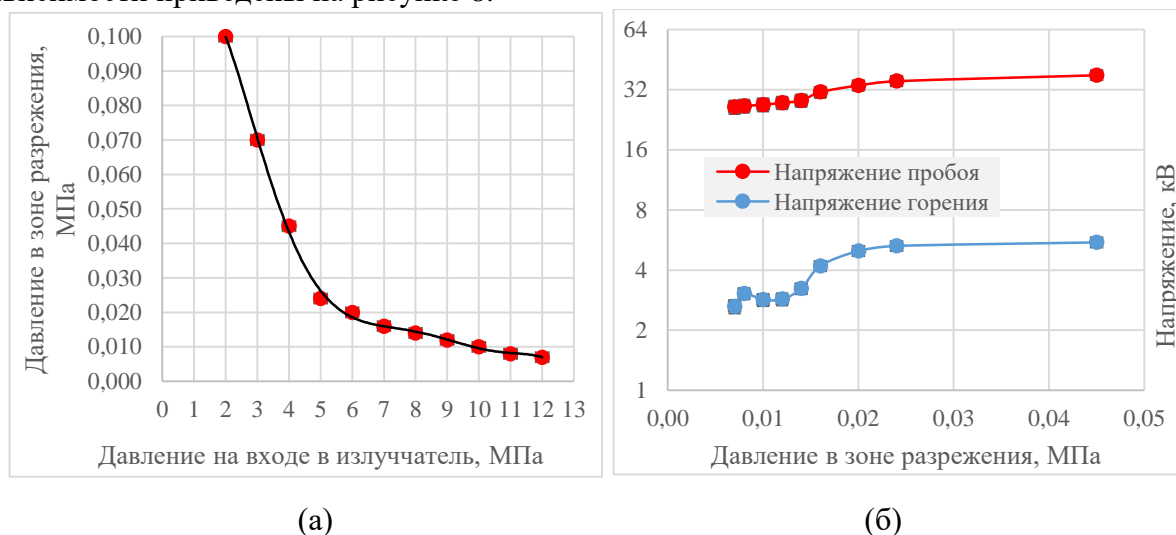


Рисунок 8. Зависимость давления на выходе из гидродинамического излучателя от давления на входе в гидродинамический излучатель (а); зависимость напряжения пробоя и напряжения горения, при которых обеспечивалось стабильное горение разряда, от давления на выходе из гидродинамического излучателя (б).

На рисунке 9 отчётливо видно anomальное поведение кривой в диапазоне давлений 0,008-0,014 МПа. Такое поведение обусловлено выходом гидродинамического излучателя на новый режим работы и резким увеличением протяженности зоны развитой кавитации, в то время как переходный режим нестабилен. Повышение давления способствует снижению энергетических затрат, необходимых для обеспечения стабильного горения плазмы. Такой результат можно объяснить увеличением количества пузырьков, образующихся при работе гидродинамического излучателя и их более плотным и равномерным распределением в потоке обрабатываемой жидкости.

Исследования спектральных зависимостей свечения разряда так же позволило определить диапазон оптимальных значений давления подаваемой жидкости, которое выбиралось исходя из максимизации интенсивности свечения. На рисунке 8 представлены зависимости интенсивности свечения характерных пиков плазмы от давления подаваемой жидкости. Для всех перечисленных выше пиков наблюдался рост интенсивности при уменьшении давления на выходе из гидродинамического излучателя. Однако, интенсивность свечения как в видимом, так и в ультрафиолетовом и инфракрасном

диапазонах перестают расти при давлении 0,022 МПа, что делает эти значения давления оптимальными для практического использования.

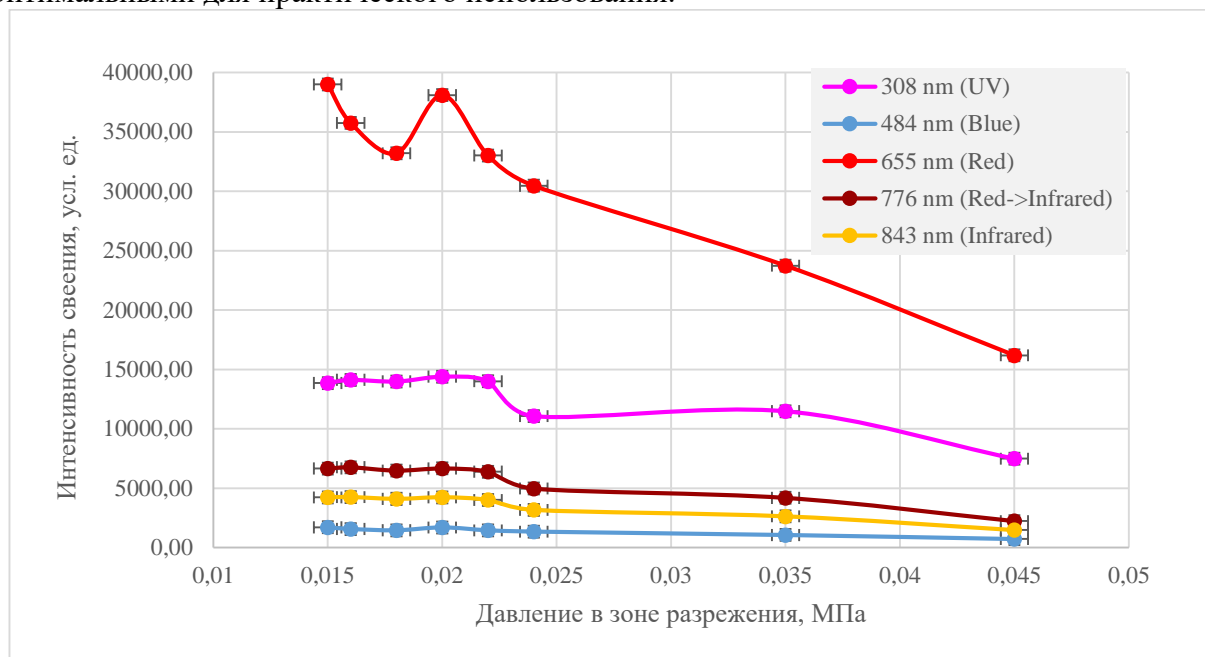


Рисунок 9. Зависимость интенсивности свечения плазмы в характерных пиках от давления на выходе из гидродинамического излучателя.

С целью оптимизации технологического процесса обеззараживания воды было рассмотрено влияние материала электродов на характеристики образующегося плазменного разряда. Рассматривались электроды, изготовленные из цинка, титана, графита, серебра и латуни. Исследования показали, что форма и характеристики электрических импульсов, требуемых для поддержания устойчивого горения плазмы, зависит от материала изготовления незначительно. Однако, измерения спектра свечения в диапазоне длин волн от 200 нм до 1000 нм показывают, что в зависимости от выбранного материала эффективность обработки при равных условиях энергопотребления может изменяться (рис. 10).

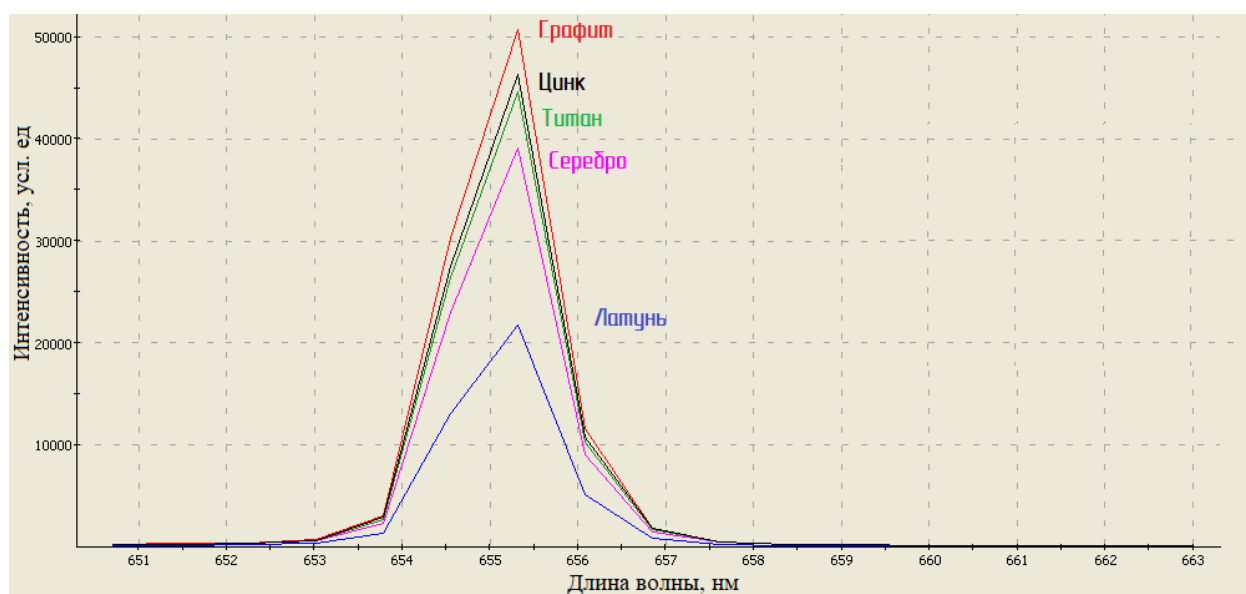


Рисунок 10. Интенсивность свечения плазмы в характерном пике с длиной волны 655 нм в зависимости от используемых материалов для электрода.

Увеличение интенсивности свечения плазмы при разных электродах связано с увеличением температуры плазмы. Основным механизмом такого эффекта является разница работы выхода электрона у различных материалов. При этом, несмотря на то, что графит обладает большей работой выхода электрона в сравнении с титаном и цинком, повышенная интенсивность свечения может быть объяснена захватом кислорода из образуемой газовой смеси в пузырьках, что способствует более быстрому заполнению пузыря водородом. В свою очередь, латунь обладает наименьшей интенсивностью свечения из-за большого содержания примесей, мешающих образованию электрического пробоя. Таким образом, наиболее оптимальным материалом для изготовления электродов является цинк, поскольку изготовленные из него электроды являются наиболее безопасными в применении, достаточно прочными, и обеспечивают высокую эффективность в сравнении с другими материалами.

Глава 4. Исследование эффективности воздействия на загрязнители

В настоящей главе оценены потенциальные возможности использования разрабатываемой технологии для очистки воды от микробиологических загрязнителей (на примере кишечной палочки и дрожжей) и химических загрязнителей (на примере метанола, органических красителей и антибиотика). Исследование проводилось совместно с Козловым Д.А., Веселовой В.О., Каменевой С.В., Баранчиковым А.Е. Для этого была проведена серия экспериментов по обработке в плазменном реакторе модельных растворов вышеперечисленных загрязнителей и проведена оценка эффективности воздействия плазмы в после кавитации.

Для исследования возможностей микробиологической очистки в качестве модельного загрязнителя использовались наиболее доступная культура кишечной палочки *Escherichia coli*. с концентрацией равной $25 \cdot 10^7$ бакт./мл, что приблизительно соответствует стокам медицинских учреждений. Результаты обработок модельных растворов с использованием электродов, изготовленных из различных материалов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Эффективность подавления микроорганизмов в зависимости от материалов электродов.

Тип электрода	Количество циклов обработки воды	Концентрация микроорганизмов $\times 10^7$, бакт./мл	Процент летальности микроорганизмов, %
Контрольный	-	25,0	-
Серебро	1	0,5	98,0
	2	<0,001	>99,99
	3	<0,001	>99,99
Графит	1	11,0	56,0
	2	<0,001	>99,99
	3	<0,001	>99,99
Титан	1	14,0	44,0
	2	2,4	90,4
	3	<0,001	>99,99
Латунь	1	9,0	44,0
	2	1,0	96,0
	3	<0,001	>99,99
Цинк	1	9,4	62,4
	2	<0,001	>99,99
	3	<0,001	>99,99

Наибольшая бактерицидная активность достигалась при обработке растворов с использованием серебряных электродов. После обработки воды плазменным разрядом с использованием серебряных электродов концентрация ионов серебра может достигать 1

мг/л, что заметно превышает ПДК. Это делает невозможным использование таких в производственной практике. Для оставшихся 4 материалов электродов наблюдалась корреляция между интенсивностью свечения в УФ диапазоне и бактерицидной эффективностью обработки. При этом для электродов из цинка и графита после двух циклов обработки летальность превышала 99,99 %, что соответствует санитарным нормам, принятым на территории РФ. Сниженная эффективность титана может быть объяснена более слабым свечением в ультрафиолетовом диапазоне. Основываясь на этих данных, дальнейшие опыты с микробиологическими загрязнителями проводились на более прочных и удобных в изготовлении цинковых электродах.

В следующей серии экспериментов было изучено влияние обработки плазмой в поле кавитации на активность дрожжей (внетаксономической группы одноклеточных грибов) воздействиям поскольку обладают прочной оболочкой. Результаты эксперимента показали, что даже один цикл обработки позволяет достичь 25% эффективности, а трехкратная обработка практически полностью подавляет их жизнедеятельность (рисунок 11).

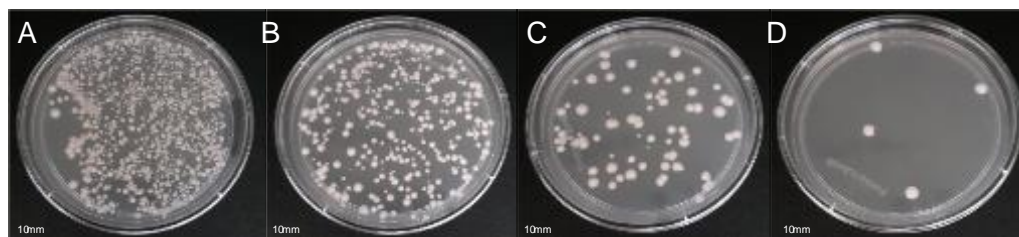


Рисунок 11. Результаты подавления *Saccharomyces cerevisiae* в плазменном реакторе в виде фотографий культивированных дрожжевых клеток в питательной среде на основе исходного образца (А) и образцов, очищенных с помощью системы плазмы после 1 цикла (В), 2 циклов (С) и 3 циклов (D).

Таким образом была доказана высокая эффективность микробиологической очистки воды в результате воздействия на неё плазмы в поле кавитации даже при достаточно стойких к физико-химическому воздействию культурах.

Вторая часть данной главы раскрывает потенциальные возможности применения разрабатываемой технологии в области очистки от сложных органических соединений. Первая серия экспериментов ставилась на простом органическом соединении – метиловом спирте. Вода с 7% содержанием метанола, пропускалась через плазменный реактор. В результате эксперимента было обнаружено снижение процентного содержания метанола до 1.5 %.

Кроме остаточного содержания метанола также был проанализирован состав отходящих газов с помощью газовой хроматографии, в результате чего среди продуктов распада был обнаружен метан. (таблица 2). Такой эффект связан с образованием побочных продуктов, участвующих в многостадийной цепочке химических реакций. Из анализа литературных источников можно представить следующую цепочку химических преобразований молекулы метанола:

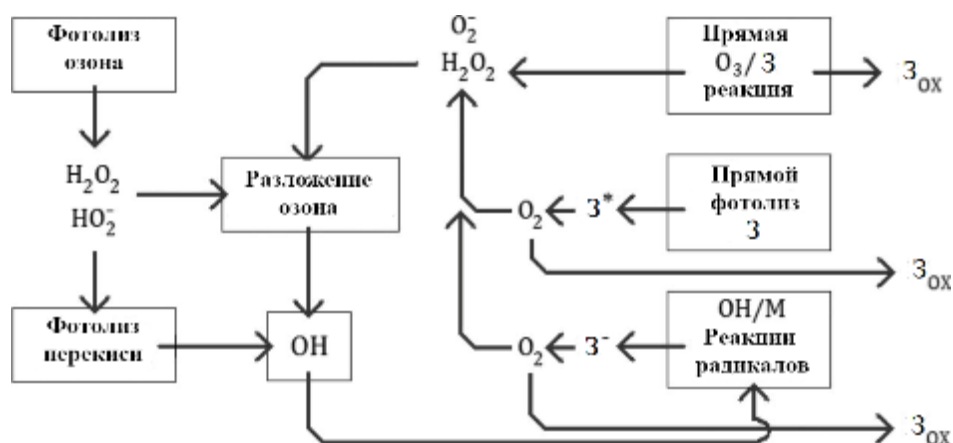


Рисунок 12. Схематическое изображение процессов, происходящих в жидких стоках, содержащих органические загрязнители (З)

При этом окислительный путь деградации метанола имеет следующий вид:

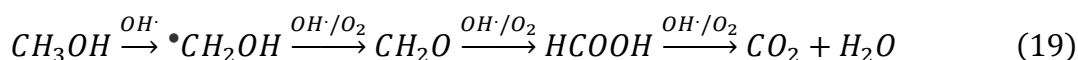
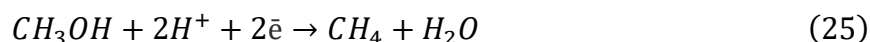
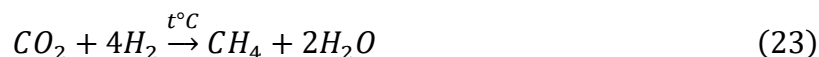
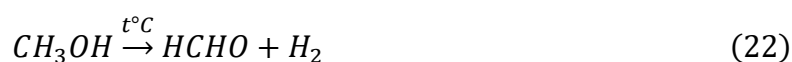
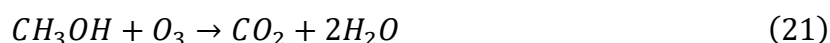
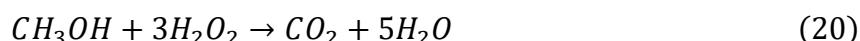


Таблица 2. Состав отходящих газов из плазменного реактора при обработке чистой воды и 7% раствора метанола в воде.

Эксперимент	Содержание (массовое) после обработки в плазме, %		
	Водород	Диоксид углерода	Метан
Чистая вода	55,5	<1	-
7% р-р метанола в воде	38,8	9,5	8,4

На основе полученных данных следует, что в процессе деградации метанола присутствуют параллельные химические реакции, поскольку в процессе горения плазмы могут образовываться такие реагенты, как озон, пероксид водорода, а локальные температура и давление могут способствовать параллельному течению как окислительных, так и восстановительных реакций:



Кроме вышеперечисленных механизмов, возможны и другие механизмы деструкции молекулы метанола, а также возможно воздействие содержащихся в воде примесей и воздействие ультрафиолетового излучения.

Таким образом показано, что разложение органических соединений возможно не только за счёт основной реакции окисления, но и за счёт параллельных реакций, что позволяет более широко применять метод плазмы в поле кавитации для очистки воды от загрязнений. Для описания более подробной структуры воздействия плазмы на молекулу метанола требуется отдельное изучение цепочек реакций.

После изучения воздействия плазмы на молекулу метанола была проведена серия экспериментов по деструкции органических красителей E132 (индигокармин, синий), E124 (Понсо 4R, розовый), E151 (тетранатрий-4-ацетамидо-5-гидрокси-6-[7-сульфонато-4-(4-сульфонатофенилазо)-1-нафтилазо]-1,7-нафталиндисульфонат, бриллиантовый чёрный BN). Плазмой обрабатывался водный раствор красителей с концентрации 0,1 г/л в водопроводной воде, а полученные растворы обрабатывались в плазменном реакторе. После обработки, образцы держались в тёмном помещении в закрытой ёмкости при температуре $25\text{ C}^{\circ} \pm 1$. Далее растворы проверялись на оптическом спектрометре в диапазоне длин волн от 200 до 1000 нм. Установлено, что после первого цикла обработки наблюдалось значительное снижение интенсивности поглощения света во всех образцах. При этом, эффект наблюдался не только непосредственно после обработки, но и сохранялся продолжительное время после неё. Особенно сильное падение интенсивности поглощения наблюдалось у индигокармина (E132) (Рис.13). Такой результат можно объяснить наличием активных форм кислорода, которые высвобождаются из химических соединений и взаимодействуют в течении некоторого времени, продолжая процесс деструкции вплоть до полного выпадения в осадок и нулевых значений поглощения света.

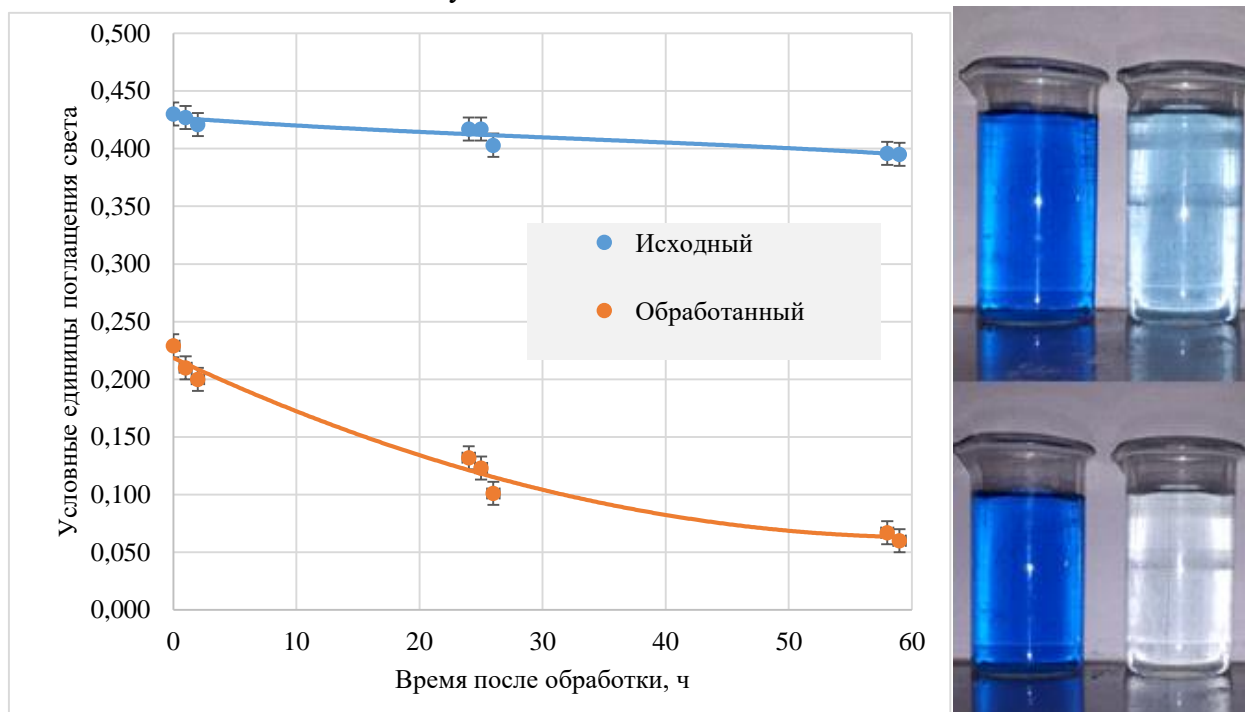


Рисунок 13. Кривые обесцвечивания красителя индигокармин (E132) после обработки в плазменном реакторе и фотографии до и после выдержки образцов.

Разница между эффективностью очистки воды от различных красителей при условии одинаковой концентрации может быть объяснена сложностью структуры молекулы (Рис. 15) и наличием побочных продуктов деструкции, которые продолжают участвовать в химических реакциях с другими молекулами. Например, при обработке раствора красителя E124 (Понсо 4R) была достигнута эффективность более 50%, но в последующие 24 часа скорость разложения оказалась ниже, чем у красителя E132 (индигокармин) более чем в 3 раза. Полученный результат объясняется тем, что E124 обладает самой простой из перечисленных красителей структурой. С другой стороны, эффективность деструкции молекулы красителя E151 (бриллиантовый чёрный BN) оказалась на 25% ниже, чем эффективность деструкции красителя E124, при этом скорость последующего разложения на 10% выше. Значение эффективности деструкции красителя

E132 ожидаемо находится между двумя другими образцами, однако скорость разложения после процесса обработки значительно выше, чем у других красителей. Такой эффект возможен за счёт баланса между сложностью структуры молекулы красителя и количеством получаемых из неё активных веществ. Полученные данные также подтверждают присутствие параллельных химических реакций с участием побочных продуктов деструкции в процессе обработки (рис. 14).

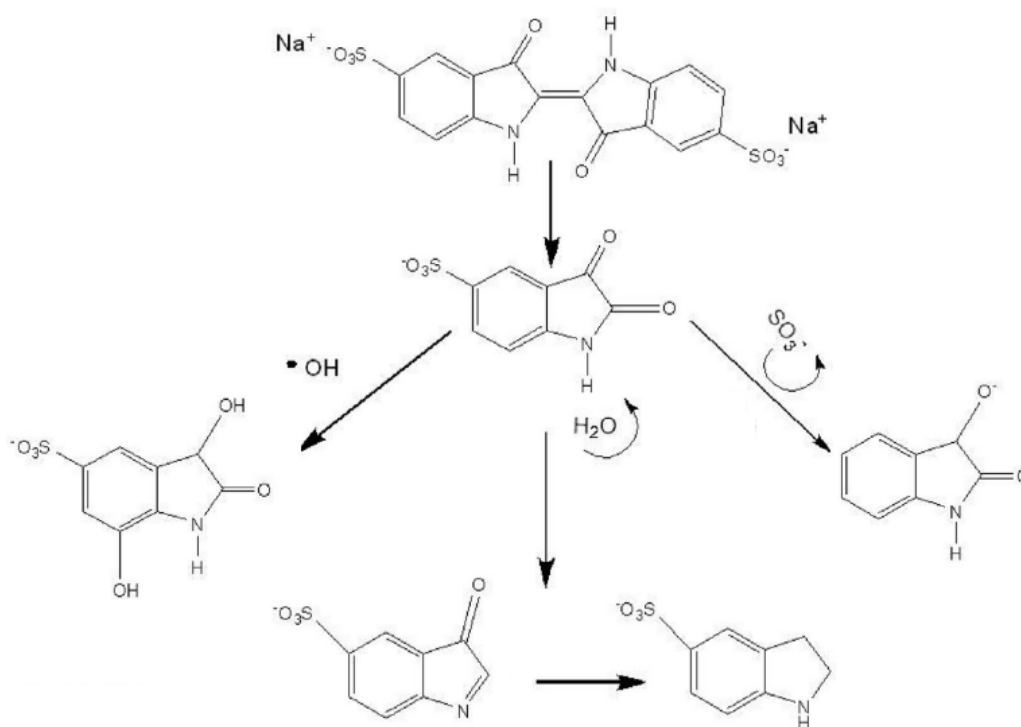


Рисунок 14. Разложение красителей на примере индигокармина в плазме (Crema APS, Piazza Borges LD, Micke GA, Debacher NA. Degradation of indigo carmine in water induced by non-thermal plasma, ozone and hydrogen peroxide: A comparative study and by-product identification. Chemosphere. 2020)

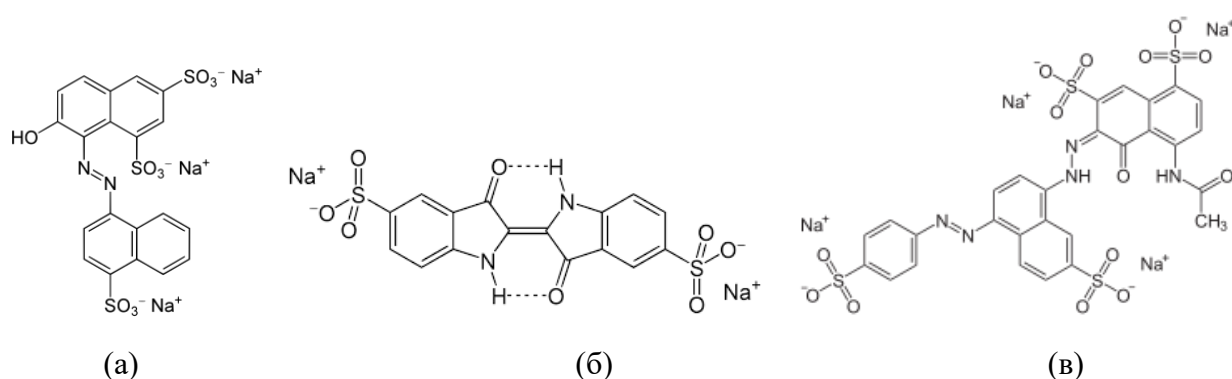


Рисунок 15. Химическая структура органических красителей: а – Понсо 4R (E124); б – индигокармин (E132), в – Бриллиантовый чёрный BN (E151).

В заключительной серии экспериментов со сложными органическими загрязнителями был проведён более приближённый к практическому применению ряд опытов, заключающийся в деструкции антибиотиков. В качестве модельного раствора использовался широко распространённый в различных странах антибиотик - тетрациклин с концентрацией 40 мг/л. Вода с его содержанием обрабатывалась в несколько циклов.

Анализ концентраций проводился аналогично с экспериментом с красителями методом спектрофотометрии. Установлено, что даже после первого цикла наблюдалось значительное снижение концентрации, в разы превышающей средние значения концентрации загрязнений, содержащихся в стоках (обычно содержится в диапазоне от 0,1 мкг/л до 1 мкг/л) (Рис. 16). При этом так же был вновь обнаружен эффект пролонгированного воздействия, поскольку концентрация тетрациклина продолжала падать спустя сутки выдержки при температуре $25\text{ C}^{\circ} \pm 1$ в помещении без доступа солнечного света. Основываясь на данных о возможности катализа процесса, в дополнении к эксперименту был проведён опыт с применением оксида церия, разбавленного в концентрации 5 мг/л. В ходе эксперимента с оксидом церия был установлен значительный рост эффективности (Рис. 17), подтверждающий сформулированные ранее выводы.

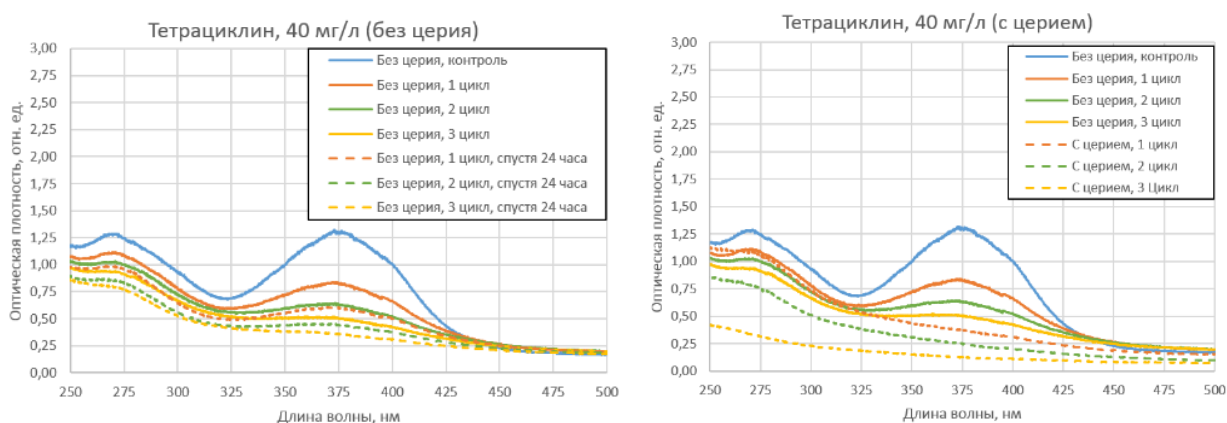


Рисунок 16. Оптические спектры светопоглощения растворов тетрациклина после до и после обработки плазмой.

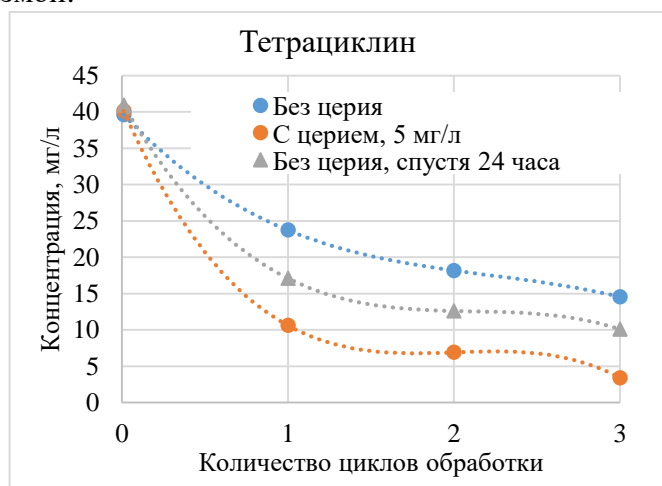


Рисунок 17. Кривые падения концентрации тетрациклина в зависимости от содержания оксида церия и количества обработок.

Таким образом, на примере тетрациклина было доказано, что добавление оксида церия в процессе образования плазмы в поле кавитации позволяет усиливать химическое взаимодействие плазмы в поле кавитации на загрязнители за счёт образования более активной формы кислорода – гидропероксильного радикала, а сам метод может быть использован для очистки воды от содержания сложных загрязнений включающих как микробиологические загрязнения, так и химические загрязнения, включая антибиотики. При этом, на примере оксида церия было подтверждено возможность интенсификации

процесса с помощью веществ, способных к реагированию с активными формами кислорода не только в момент обработки, но и в течение 24 и более часов.

Глава 5. Масштабный переход

Данная глава посвящена масштабному переходу от лабораторного аппарата к опытному образцу установки очистки и обеззараживания стоков. На основе полученных ранее экспериментальных данных проводится разработка узлов и проверяются различные технические возможности интенсификации процессов. Повторно проверяется и уточняется оптимальная длина реактора, а также предлагается технологическая схема, включающая в себя сдвоенные реакторы, что позволит компенсировать потери энергии и увеличить длину горения плазмы вдвое. Исследование проводилось совместно с Абрамовым В.О., Войтовым Ю.И., Никоновым Р.В.

Было отмечено, что вертикальное расположение камер способствует более лёгкому процессу образования плазмы за счёт равномерности распределения кавитирующих диспергированных пузырьков газа в потоке жидкости за счёт сил тяготения.

Для проверки эффективности процесса подавления микроорганизмов на одном канале для опытного образца были проведены дополнительные эксперименты с кишечной палочкой и пищевым красителем индигокармин (E132). Удалось достичь 67% эффективности очистки от кишечной палочки при начальной концентрации 27×10^7 , бакт./мл и 61% эффективности обесцвечивания красителя при начальной концентрации 0,1 г/л непосредственно после обработки. Таким образом сконструированное оборудование (Рис. 18 и 19) позволяет обрабатывать воду с производительностью $10 \text{ м}^3/\text{час}$, при этом эффективность процессов очистки соответствует эффективности достигнутой на лабораторной установке. Увеличение производительности одного канала с $1 \text{ м}^3/\text{час}$ до $3 \text{ м}^3/\text{час}$ привело к увеличению потребляемой электроэнергии лишь в 2 раза. Например, при одинаковой частоте импульсов и скважности при $1 \text{ м}^3/\text{час}$ потребление составляло до 3 кВт, а при $3 \text{ м}^3/\text{час}$ потребление составляло до 6 кВт приблизительно.

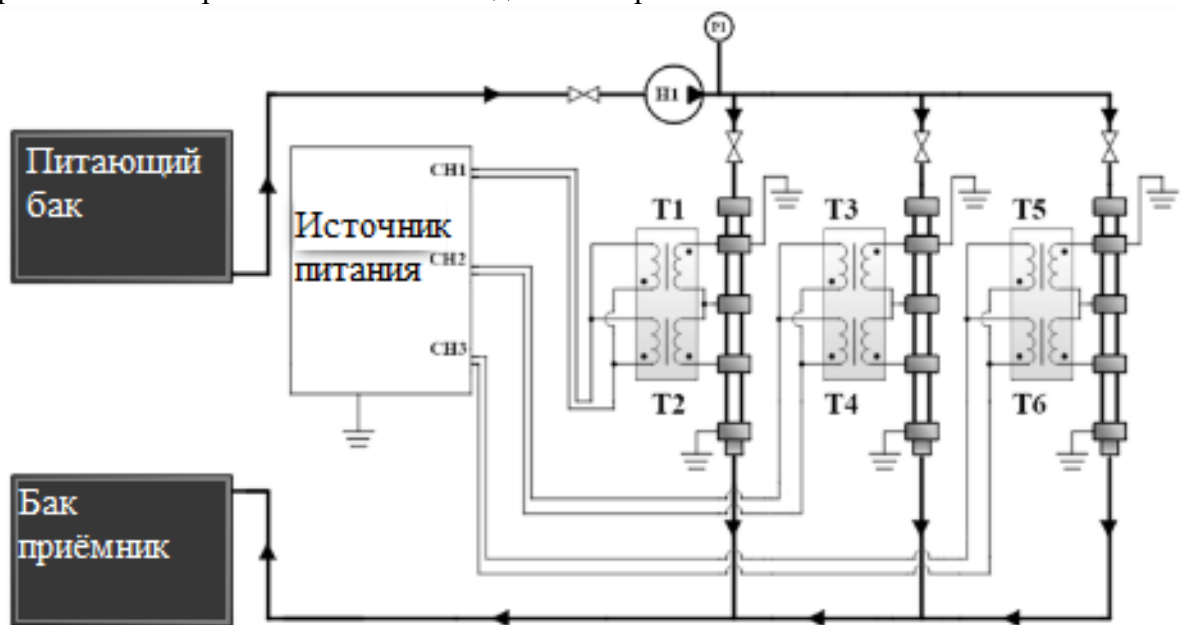


Рисунок 18. Схематическое изображение установки обработки стоков с сдвоенным плазменным реактором.



Рисунок 19. Фотография установки обработки стоков.

Заключительная часть главы описывает поиск подходов к решению обнаруженного главного недостатка разрабатываемого метода - недостаточной эффективности работы ректора при высоких уровнях загрязнений. Для решения этой задачи были исследованы возможности реагентной очистки воды для предварительной подготовки с применением технологии ультразвуковой активации.

С целью оптимизации процесса реагентной очистки были изучены различные волноводные системы, а также проанализирована эффективность использования тех или иных волноводных систем для активации реагентов. В ходе экспериментальных исследований проводилась активация реагента на примере магнетита в различных проточных реакторах. Исследование было направлено на определение степени влияния типа волновода и размера реактора на эффективность процесса активации. Были проведены опыты с двумя цилиндрическими проточными реакторами с тремя типами волноводных систем, общая схема которых приведена рисунке 20.

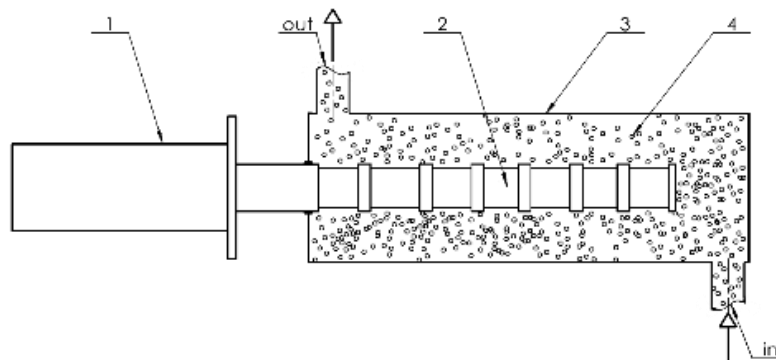


Рисунок 20. Схема цилиндрического проточного реактора: 1-ультразвуковой преобразователь, 2- волноводная система, 3 - реактор, 4- обрабатываемый реагент.

Установлено, что при активации магнетита происходит увеличение эффективности очистки модельных эмульсий (эмульсии готовились путем смешивания дизельного топлива с водой, концентрация дизельного топлива в воде составляла 30 мг/л) от нефтепродуктов. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Степень очистки модельных эмульсий от нефтепродуктов магнетитом после ультразвуковой активации в большом и малом реакторе

	Степень очистки, %	
	Малый реактор	Большой реактор
Без активации ультразвуком	58	
Тип волноводной системы		
Цилиндрический	88	60
Каскадный	98	67
Трубчатый	94	64

Измерения эффективности очистки модельных растворов показали, что при максимальной эффективности необработанного магнетита, из модельной смеси удавалось удалить лишь 58% нефтепродуктов. При этом даже однократная кратковременная ультразвуковая обработка заметно повышала показатель эффективности. Из полученных данных следует, что метод предварительной реагентной обработки позволит существенно снизить входную концентрацию загрязняющих веществ на входе в проточный реактор и обеспечить стабильное горение плазмы.

После выбора оптимального реактора и типа волновода, был проведен эксперимент по снижению концентрации углеводородов для обеспечения дальнейшего процесса обработки воды в плазме. Для этого через проточный реактор была пропущена эмульсия нефтепродуктов в воде с начальной концентрацией 30 мг/л. При таких значениях плазменный реактор переставал образовывать стабильное горение в потоке жидкости. После обработки активированным в поле ультразвука магнетитом, концентрацию удалось снизить до 1,3 мг/л, что позволило осуществить дальнейший процесс очистки в плазме и сократить концентрацию до 0,02 мг/л.

ВЫВОДЫ

Разработаны физико-химические основы высокопроизводительного метода очистки воды холодной плазмой в поле кавитации в ультразвуковых проточных реакторах: описан процесс возникновения электрического разряда в потоке жидкости в поле кавитации и определены зависимости эффективности горения плазмы от давления внутри рабочей камеры и расстояния между электродами. На основе полученных данных была проведена оптимизация экспериментальной установки. Теоретические оценки совпали с экспериментальными данными.

Исследованы спектры излучения плазменного разряда в поле кавитации, возбуждаемого при использовании электродов, изготовленных из: графита, цинка, серебра, титана и латуни. Показано, что наибольшая интенсивность излучения плазмы наблюдается при электродах, изготовленных из графита и цинка

Показано, что обработка воды плазмой в поле кавитации, приводит к образованию активных форм кислорода. Обнаружено, что после окончания обработки процесс деструкции органических соединений продолжается более 24 часов.

На созданном прототипе реактора доказана высокая эффективность метода очистки воды с большими концентрациями бактерий *E. Coli* ($25 \cdot 10^7$ бак/мл). В результате оптимизационных работ достигнут уровень летальности *E. Coli* > 99,99 % за 2 цикла обработки, а трехкратная обработка практически полностью подавляет жизнедеятельность дрожжевых культур. На основе полученных данных выбран оптимальный материал для изготовления электродов - цинк.

Доказана возможность использования плазменного разряда в поле кавитации для удаления органических загрязнений из воды, в том числе для разложения органических красителей (индигокармин, понсо-4R, бриллиантовый чёрный BN), метилового спирта, тетрациклина. При обработке 7% водного раствора метанола была достигнута эффективность очистки 80%, а лучший результат был получен при электродах из цинка и графита. При обработке водного раствора красителей с концентрацией 0.1 г/л была достигнута средняя эффективность 50% и эффективность 99% спустя 56 часов после обработки. После одного цикла обработки водного раствора тетрациклина с концентрацией 40 мг/л была достигнута эффективность очистки 40% и 58% через 24 часа после обработки. Доказано, что добавление оксида церия в качестве катализатора позволило увеличить эффективность очистки после первого цикла на 35%.

Решена проблема масштабного перехода и изготовлен опытный образец промышленного оборудования производительностью 10 м³/час, при этом эффективность процессов очистки соответствует эффективности достигнутой на лабораторной установке.

Технология ультразвуковой активации реагентов была успешно интегрирована в опытный образец с целью предварительной очистки вод до достижения концентраций загрязняющих веществ, при которой применение метода холодной плазмы в поле кавитации энергетически оправдано.

Установлено, что ультразвуковая обработка магнетита на стадии предварительной очистки трубчатыми и каскадными волноводными системами повышает эффективность очистки на 6-10% больше, чем при использовании волноводных систем стержневого (цилиндрического) типа. Было показано, что ультразвуковая стимуляция с использованием таких систем позволяет снизить количество магнетита, сократить время обработки и увеличить степень очистки на 69%.

Основные результаты диссертации представлены в работах

Статьи в журналах, входящих в международные системы цитирования Web of Science и Scopus

1. Abramov V.O., Abramova (Kamler) A.V., Nikonov R.V., Ivanov V.K., Cravotto G., Fedulov I.S. Flow-mode water treatment under simultaneous hydrodynamic cavitation and plasma. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Т. 70. С. 105323.
2. Abramova (Kamler) A., Abramov V., Bayazitov V., Nikonov R., Fedulov I., Stevanato L., Cravotto G. Ultrasound-assisted cold pasteurization in liquid or sc-CO₂. *Processes*. 2021. Т. 9. № 8.
3. Abramova (Kamler) A.V., Abramov V.O., Fedulov I.S., Baranchikov A.E., Kozlov D.A., Veselova V.O., Kameneva S.V., Ivanov V.K., Cravotto G. Strong antibacterial properties of cotton fabrics coated with ceria nanoparticles under high-power ultrasound. *Nanomaterials*. 2021. Т. 11. № 10.
4. Abramova (Kamler) A.V., Bayazitov V.M., Fedulov I.S., Nikonov R.V., Sister V.G., Cravotto G. Influence of acoustic oscillations on continuous-flow water disinfection. *Processes*. 2020. Т. 8. № 10. С. 1-7.
5. Abramov V.O., Abramova (Kamler) A.V., Bayazitov V.M., Nikonov R.V., Voitov Y.I., Fedulov I.S. The peculiarities of ultrasonic equipment design for stabilization of dispersed structures of aluminosilicic reagents for wastewater treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. Т. 64. С. 105041.
6. Abramov V.O., Abramova (Kamler) A.V., Bayazitov V.M., Kameneva S.V., Veselova V.O., Kozlov D.A., Sozarukova M., Baranchikov A.E., Fedulov I.S., Nikonov R.B., Fast Degradation of Tetracycline and Ciprofloxacin in Municipal Water under Hydrodynamic Cavitation/Plasma with CeO₂ Nanocatalyst. *Processes* 2022, 10(10), 2063
7. Karabassov T, Vasenko A.S, Bayazitov V.M, Golubov A.A, Fedulov I.S, Abramova (Kamler) A.V. Electrical Discharge in a Cavitating Liquid under an Ultrasound Field. *J Phys Chem Lett*. 2023 Dec 14;14(49):10880-10885. doi: 10.1021/acs.jpcllett.3c02778. Epub 2023 Nov 30. PMID: 38032839; PMCID: PMC10726387.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

8. Камлер А. В., Баязитов В. М., Федулов И. С., Созарукова М. М., Никонов Р. В., Михалев Е. С. Изменение окислительно-восстановительного потенциала воды в проточном плазменном реакторе в поле кавитации и генерация активных форм кислорода, *Химическая технология* 2024, 8 (25), 312.

Статьи, опубликованные в материалах научных конференций

9. Федулов И.С., Систер В.Г., Абрамов В.О., Абрамова (Камлер) А.В., Никонов Р.В., Баязитов В.М. Влияние акустических колебаний на процесс образования холодной плазмы в проточных реакторах. В сборнике: Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы. Материалы международной научной конференции. Витебск, 2021. С. 13-15.
10. И.С. Федулов, В.О. Абрамов, А.В. Абрамова (Камлер), Р.В. Никонов. Разработка проточного реактора холодной плазмы в поле кавитации. Научные исследования 2022. Сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022
11. И.С. Федулов, В.О. Абрамов, А.В. Абрамова (Камлер), Р.В. Никонов. Оптимизация условий горения проточной холодной плазмы в поле кавитации. Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей XXVII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022
12. И.С. Федулов, В.О. Абрамов, А.В. Абрамова (Камлер), Р.В. Никонов. Катализ и интенсификация процесса горения проточной холодной плазмы в поле кавитации. Актуальные вопросы современной науки. Сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022

Тезисы докладов на научных конференциях

13. A.V. Abramova (Kamler), V.O. Abramov, V.M. Bayazitov, R.V. Nikonov, I.S. Fedulov, A. A. Golubov, T. Karabassov, A.S. Vasenko, G. Cravotto. A new method for water purification: an electric discharge in cavitating liquid. ESS-JSS-AOSS 1st JOINT SONOCHEMISTRY CONFERENCE, Japan, November 2021

Патенты

14. А.Г. Антипенко, А.В. Абрамова (Камлер), И.С. Федулов. Устройство для плазмохимической очистки стоков от микробиологических загрязнений. Патент РФ № RU 211306 U1

Федулов Игорь Сергеевич

Разработка физико-химических основ метода очистки и обеззараживания воды холодной плазмой в ультразвуковых проточных реакторах.

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата химических наук

Формат 60x90/16. Объём 1.0 п.л. Тираж 100 экз.

Подписано в печать 04.10.2024 г. Заказ № 167

Типография «Реглет», тел 8 (495) 979-98-99 доб. 40; 8 (495) 142-58-66, info@reglet.ru

Адрес: 119049, Москва, ул. Ленинский проспект д. 2 А