

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Федулова Игоря Сергеевича** «Разработка физико-химических основ метода очистки и обеззараживания воды холодной плазмой в ультразвуковых проточных реакторах», представленной на соискание ученой степени кандидата наук по научной специальности 2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий (химические науки)

**Актуальность темы исследования.** Диссертационная работа Федулова И.С. посвящена вопросам разработки и практической реализации нового высокоэффективного метода очистки воды от микробиологических и химических загрязнений. В основе развиваемого подхода лежит идея обработки сточных вод плазменным разрядом в кавитационном поле, создаваемом акустическими колебаниями высокой интенсивности, что дает возможность реализовать процесс обработки в непрерывно движущемся потоке жидкости.

Основной проблемой современных методов очистки воды является сложность обеспечения их высокой эффективности при одновременном присутствии нескольких загрязнителей различной природы, особенно в значительных концентрациях. При этом, увеличение количества обрабатываемой воды приводит к резкому увеличению потребляемой энергии для осуществления процесса и снижению степени очистки.

Принципиальным отличием предлагаемого автором метода от тех, что используются сейчас в городском хозяйстве, химической и смежных отраслях промышленности, является создание технологического процесса очистки воды, при котором ее обработка проходит за счёт физико-химических воздействий на нее, протекающих в самом объёме обрабатываемой среды. Таким образом, за счёт непосредственного воздействия плазменного разряда, приводящего к образованию различных активных форм кислорода, а также ряда вторичных факторов, таких как акустические колебания, ультрафиолетовое излучение, локальное увеличение температуры, проходящий через установку поток воды может быть очищен с гораздо большей эффективностью по сравнению с практически используемыми в настоящее время промышленными методами. Чрезвычайно важно, что процесс обработки допускает масштабирование, что делает перспективным переход от лабораторных к промышленным масштабам применения разработанного в диссертации оборудования.

Таким образом, тема диссертации Федулова И.С., безусловно, актуальна и имеет особую важность в части развития и реализации современных высокоэффективных методов очистки и обеззараживания сточных вод.

**Основное содержание работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 109 наименований. Общий объём диссертационной работы составляет 111 страниц печатного текста, включая 11 таблиц и 57 иллюстраций.

**Во введении** отражена и обоснована актуальность работы, указаны ее новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования. Так же в нем сформулированы цель и задачи исследования,



положения, выносимые на защиту, указаны личный вклад автора и сведения об апробации работы, выражены благодарности.

**В первой главе** проведен критический анализ современной научно-технической литературы по теме исследования. Подробно рассмотрены вопросы очистки сточных вод от органических и микробиологических загрязнителей. Обсуждаются физико-химические основы возникновения плазмы в пузырьках газа, ее влияние на деструкцию некоторых загрязнителей промышленных сточных вод. Все вышесказанное позволило сформулировать вывод об необходимости разработки нового высокопроизводительного метода и технических решений, направленных на его реализацию, по очистке сточных вод с помощью обработки потока жидкости плазмой в поле кавитации.

**Во второй главе** подробно рассмотрены теоретические основы процесса и физико-химические механизмы образования плазмы в поле кавитации, что позволяет раскрыть потенциальные возможности разрабатываемого метода и обосновать перспективность его практического применения. В этом разделе диссертации приводятся достаточно убедительные аргументы в пользу выдвинутой гипотезы возникновения плазмы в пузырях газа, что позволяет связать между собой известные теоретические положения с экспериментальными наблюдениями. Подробно описана конструкция лабораторной установки, на которой производились исследования.

В этой главе дано описание физико-химических процессов воздействия образующейся холодной плазмы на загрязнители сточных вод. Выдвинута и проработана идея образования различных активных форм кислорода в потоке кавитирующей жидкости электрическим разрядом. Автор обращает самое серьезное внимание вторичным эффектам воздействия плазмы на поток жидкости, способствующих деструкции загрязнений. К ним относятся: ультрафиолетовое излучение, локальная термическая обработка, а также высокочастотные акустические колебания.

**В третьей главе** рассмотрены вопросы эффективности процесса очистки от технологических параметров, определяющих горение плазмы, которые обобщены через величину давления внутри рабочей камеры. Приведены результаты изменения вольтамперных характеристик в процессе пробоя и стабильного горения разряда. Установлено, что увеличение давления подаваемой жидкости на входе в гидродинамический излучатель за счёт резкого увеличения скорости потока жидкости приводит к росту разрежения в реакторе, что в свою очередь улучшает условия пробоя и обеспечивает возможность стабильного горения плазмы при более низких напряжениях. Представлены экспериментальные данные по влиянию давления на интенсивность свечения плазмы и материалов электродов на процесс ее горения. Все указанные выше экспериментальные результаты необходимы для корректной оценки возможности применения плазмы в поле кавитации для очистки и обеззараживания воды.

**В четвертой главе** выполнено экспериментальное определение эффективности воздействия плазменного разряда на загрязнители различной природы на примере модельных веществ. В их качестве были выбраны:



суспензии специально культивированных кишечной палочки и дрожжей, а также метанол, некоторые органические красители и антибиотик тетрациклин.

На примере разложения метанола под действием плазменного разряда автор описывает химизм протекающих реакций не только окисления, но и восстановления, что значительно повышает общность полученных результатов. Приведены данные о влиянии на деструкцию метанола величины подаваемой на установку мощности электрического тока, выбора материала электрода, длины рабочей камеры. При анализе результатов разложения красителей холодной плазмой обнаружен эффект последствия, заключающийся в продолжении разложения красителей даже после окончания воздействия на них плазмы.

В этой главе на примере антибиотика тетрациклина автор показал возможность деструкции сложных органических веществ в типовых условиях очистки сточных вод на плазменной установке. Указана возможность существенного увеличения скорости деструкции сложных органических молекул с помощью добавления оксида церия в результате протекания параллельных реакций, в том числе с участием продуктов деструкции молекул загрязнителя.

В работе приведены данные о значительном подавлении жизнедеятельности с высокой летальностью бактерий кишечной палочки даже при их высокой концентрации за счет использования плазменного разряда. Установлена зависимость эффективности гибели микроорганизмов от выбранного материала электродов. С использованием дрожжевой культуры получены закономерности их гибели в зависимости от количества циклов (повторов) плазменной обработки.

*Пятая глава* посвящена возможности практической реализации метода очистки и обеззараживания воды плазмой в поле кавитации. В ней рассматриваются различные дополнительные технологические особенности повышения эффективности воздействия на загрязнители и предлагаются технические решения для увеличения производительности установки. Это потребовало, в первую очередь, модернизации ее электрической схемы, определения возможности увеличения диаметра и длины реактора, опробованию схем, содержащих параллельные и последовательно соединенные камеры горения плазмы.

В этой главе также рассмотрена задача разработки блока водоподготовки к реакционному воздействию плазмы, которая сводится к поиску решения технологической проблемы масштабного перехода и разработки приемлемого ультразвукового оборудования. Основная идея заключается в поисках специфического технологического метода, который позволит в короткий срок обрабатывать малые объемы концентрированных растворов реагентов и затем смешать их в потоке сточных вод, отправляемых на очистку. Предложено несколько конструкций волноводов для ультразвуковой обработки магнетита.

На основании полученных данных выполнено масштабирование разработанного прототипа установки для очистки сточных вод. Использование каскадной схемы также оказалось технологически правильным решением,



поскольку такой подход позволил обеспечить более высокую производительность без значительного увеличения габаритов оборудования, а выявленные недостатки полностью устранены с помощью блока предварительной обработки сточных вод ультразвуком.

**Заключение** включает основные результаты работы и выводы.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в том, что:

1. Предложен новый метод деструкции органических загрязнений сточных вод путем применения холодного плазменного разряда в потоке жидкости в условиях кавитации, созданной при помощи гидродинамического излучателя. Научная новизна применения плазмохимического метода очистки воды от микробиологических загрязнений подтверждена патентом РФ.

2. Установлены и экспериментально подтверждены основные факторы, влияющие на стабильность и характеристики горения плазмы в зоне кавитации, включая глубину вакуума в рабочей камере, а также зависимость величины пробивного напряжения от длины зоны кавитации.

3. Описаны основные механизмы образования активных форм кислорода при протекании плазмохимических реакций в условиях кавитации, на основе чего представлено аргументированное объяснение последующего длительного воздействия обработанной воды на оставшиеся загрязнения. Описанное действие остаточных активных форм кислорода подтверждено на модельных растворах загрязнителей.

4. Впервые описан эффект ускорения процессов генерации активных форм кислорода за счёт добавления оксида церия.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработаны теоретические основы и установлены основные закономерности процессов, лежащих в основе новой технологии очистки сточных вод за счет деструкции примесей путем воздействия на них холодной плазмой в условиях ультразвуковой кавитации.

2. Практически подтверждена высокая эффективность применения предложенного метода для очистки сточных вод с комплексным составом загрязнений, которые одновременно содержат как микробиологические, так и химические загрязнители.

3. Основываясь на полученных закономерностях выполнено масштабирование экспериментальной установки и изготовлен опытный образец полупромышленного оборудования производительностью 10 м<sup>3</sup>/час, при этом эффективность процессов очистки сточных вод на нем соответствует достигнутой на лабораторной установке.

**Степень достоверности результатов.** Теоретические и экспериментальные результаты, представленные в диссертационной работе Федулова И.С., соответствуют современному уровню отечественных и зарубежных исследований в области процессов и аппаратов химической



технологии в части создания новых высокоэффективных технологий очистки сточных вод от различных типов загрязнений.

Достоверность полученных автором результатов не вызывает сомнения. Это обусловлено использованием в экспериментах современного оборудования, правильного выбора методик измерений, применением поверенных средств измерения, отсутствием противоречий в полученных результатах и их соответствием общепринятым научным положениям.

#### **Рекомендации к практическому использованию результатов.**

Полученные в диссертационной работе оригинальные научные результаты и разработки могут быть использованы:

- на предприятиях химической, биотехнологической и текстильной промышленности для создания высокоэффективных систем водоочистки промышленных стоков таких предприятий;

- в проектных организациях при разработке новых и совершенствовании действующих технологий и оборудования для очистки сточных вод, имеющих широкий спектр химических и микробиологических загрязнений различной природы;

- в учебном процессе химико-технологических вузов при подготовке магистров, аспирантов и повышении квалификации работников отрасли.

В качестве **замечаний и вопросов по содержанию и оформлению** диссертации и автореферата можно указать следующие:

1. В диссертации отсутствует список сокращений и обозначений. При наличии математических формул в тексте второй главы диссертации было бы целесообразно включить в нее все использованные в тексте обозначения с указанием их размерности (при наличии).

2. Во второй главе приводится нелинейное уравнение Нолтинга-Неппайреса (2.1). Далее говорится о его решении и даже некоторые результаты приведены на рис. 13. Однако ничего не сказано, как оно решалось, аналитически или численно? Что изображено на правом графике рис. 13? Кроме того, в этой главе утверждается, что основным фактором очистки являются активные формы кислорода. Тогда было бы целесообразно сравнить результаты применения предложенного автором метода для очистки воды от различных загрязнителей с результатами применения метода обычного озонирования.

3. В третьей главе установлено, что интенсивность свечения плазмы в УФ диапазоне зависит от материала электродов. Однако, в диссертации отсутствует объяснение этого явления. Какие, по мнению автора, следуют из этого рекомендации применительно к выбору материалов электродов для установки по очистке сточных вод?

4. В четвертой главе в качестве микробиологических загрязнителей использовались культуры *Escherichia Coli* и *Saccharomyces cerevisiae*. Понятно, что это модельные микробиологические среды. Выбор их понятен – безопасность и удобство работы. Однако, хотелось бы понимать, какие реальные микробиологические загрязнения сточных вод моделируются ими.



5. В пятой главе рассмотрена задача масштабного перехода от лабораторной установки к полупромышленному оборудованию, причем его эффективность очистки не уступает исходному образцу. Задачи масштабного перехода сложны и неоднозначны. Для этой цели в простейших случаях используются безразмерные критерии подобия. Я не увидел ни одного критерия подобия в этой главе. Они оказались бесполезны при решении задачи масштабного перехода или есть какие-то иные причины отказа от их использования?

6. При оформлении литературных ссылок в списках литературы как в диссертации, так и в автореферате имеются отступления от ГОСТ 7.1-2003 БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ. БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ. Общие требования и правила составления.

8. Согласно ГОСТ 7.0.11-2011 (Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления) раздел автореферата, в котором излагаются итоги исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы носит название «Заключение», а не «Выводы», как в автореферате соискателя. Должен заметить, что в диссертационной работе приведено правильное название этого раздела. Хотя высказанное замечание мало что меняет по сути работы, но это нарушение правил оформления. Кроме этого в работе имеется незначительное количество ошибок и опечаток. Однако они никак не влияют на понимание основных изложенных в диссертации научных результатов и положений.

Несмотря на замечания, считаю, что они не снижают значимости научных результатов, изложенных в диссертационной работе Федулова И.С.

**Публикации и автореферат.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 14 публикациях, из которых 8 – в изданиях, рекомендованных ВАК, а также включенных в международные базы Scopus и Web of Science. Результаты работы обсуждались на 5 международных научных конференциях. По результатам работы получен 1 патент РФ. Публикации полностью отражают основное содержание диссертации.

Изложение диссертации выстроено грамотно и логично. Выводы по работе соответствуют полученным результатам. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

**Соответствие диссертации научной специальности.** Диссертационная работа Федулова И.С. «Разработка физико-химических основ метода очистки и обеззараживания воды холодной плазмой в ультразвуковых проточных реакторах» соответствует паспорту научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий в части: «теория подобия, моделирование и масштабирование химико-технологических процессов», «методы и способы интенсификации химико-технологических процессов, в том числе с помощью физико-химических воздействий на перерабатываемые материалы».



**Заключение.** Диссертационная работа Федулова И.С. на тему «Разработка физико-химических основ метода очистки и обеззараживания воды холодной плазмой в ультразвуковых проточных реакторах» полностью соответствует требованиям п.п. 2.1-2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук», утвержденного Приказом директора ИОНХ РАН от 29 марта 2024 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения и разработки, направленные на создание промышленной технологии и совершенствование ее аппаратного оформления для реализации процесса очистки и обеззараживания сточных вод, холодной плазмой в условиях кавитации, создаваемой ультразвуковой активацией среды, имеющие существенное значение для развития химической, текстильной, биотехнологической и смежных отраслей промышленности.

**Автор работы Федулов Игорь Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий.**

**Официальный оппонент**

Заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий им. Гильперина Н.И. ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»,  
д.ф.-м.н., доцент

Вязьмин Андрей Валентинович

«22» 10 2024

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА-Российский технологический университет»  
119454, г. Москва, Пр-т Вернадского, д. 78  
Телефон: +7 916 903 28 64  
E-mail: av1958@list.ru

Подпись Вязьмина А.В. удостоверяю.

Первый проректор РТУ МИРЭА, Прокопов Николай Иванович  
д.х.н., профессор



«22» 10 2024



## СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОПОНЕНТЕ

по диссертационной работе Федулова И. С. «Разработка физико-химических основ метода очистки и обеззараживания воды холодной плазмой в ультразвуковых проточных реакторах»

на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности  
2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий

Фамилия, имя, отчество	Год рождения, гражданство	Место основной работы (полное наименование организации, адрес), должность, телефон, адрес электронной почты	Ученая степень (с указанием шифра научной специальности, по которой защищена диссертация)	Ученое звание (по специальности / кафедре)	Основные работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет (не более 15 публикаций)
Вязьмин Андрей Валентинович	1958, РФ	ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» 119454, ЦФО, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78 Зав. кафедрой Процессов и аппаратов химических технологий им. Гельперина Н.И. +7 916-903-28-64 av1958@list.ru	Доктор физико-математических наук, научная специальность 05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий	Доцент по кафедре Процессы и аппараты химических технологий	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Покусаяев Б.Г., Вязьмин А.В., Некрасов Д.А., Храпцов Д.П., Захаров Н.С. Нестационарный теплоассоциенос в микроструктурированных средах / Под редакцией Б.Г. Покусаяева.- 2-е изд.- Санкт-Петербург: Лань, 2024.- 180 с.</li> <li>2. Rokusaev, V. Study of hydrogel materials thermophysical properties / V. Rokusaev, N. Zakharov, A. Uvazmin, D. Nekrasov, E. Volkova, A. Moshin // Thermal Science.- 2023.- V. 27.- No. 5A.- P. 3701-3708.</li> <li>3. Храпцов, Д.П. Нестационарный массоперенос в гелях с микроорганизмами / Д.П. Храпцов, О.А. Сулягина, Б.Г. Покусаяев, А.В. Вязьмин, Д.А. Некрасов // Теоретические основы химической технологии.- 2023.- Т. 57.- № 1.- С. 71–80.</li> <li>4. Sorokin, V.G. Nonlinear reaction-diffusion equations with delay: Partial surge, exact solutions, test problems, and numerical integration / V.G. Sorokin, A.V. Uvazmin // Mathematics.- 2022.- V. 10.- P. 1886.</li> <li>5. Храпцов, Д.П. Истечение парожидкостного потока через канал с монодисперсным зернистым слоем / Д.П. Храпцов, Б.Г. Покусаяев, Д.А. Некрасов, А.В. Вязьмин //</li> </ol>



			<p>Теплоэнергетика.- 2022.- № 2.- С. 65–73.</p> <p>6. Храмов, Д.П. Нестационарный массоперенос питательной среды для микроорганизмов в смесевых гелях / Д.П. Храмов, О.А. Сулягина, Б.Г. Покусаев, А.В. Вязьмин, Д.А. Некрасов, А.А. Мошин // Теоретические основы химической технологии.- 2022.- Т. 56.- № 5.- С. 539-548.</p> <p>7. Захаров, Н.С. Исследование процессов теплопереноса в гидротелях методами голографической интерферометрии и градиентной теплометрии / Н.С. Захаров, Б.Г. Покусаев, А.В. Вязьмин, Д.А. Некрасов, О.А. Сулягина, А.А. Мошин // Письма в ЖТФ.- 2022.- Т. 48.- Вып. 9.- С. 10-14.</p> <p>8. Храмов, Д.П. Кригическое истечение парожидкостного потока через зернистый слой / Д.П. Храмов, Б.Г. Покусаев, Д.А. Некрасов, А.В. Вязьмин // Теплофизика высоких температур.- 2021.- Т. 59.- № 2.- С. 195-202.</p> <p>9. Uvazmin, A.V. Features of biogenic nanoparticle formation in agarose gels and their effect on cells growth during bulk cultivation / A.V. Uvazmin, B.G. Pokusaev, S.P. Karlov, D.A. Skladnev, N.V. Shumova, E.D. Volkova // Chemical Engineering Transactions.- 2021.- V. 84.- P. 73-78</p> <p>10. Покусаев, Б.Г. Нестационарный массоперенос питательных веществ в гелях с каналами различной пространственной структуры / Б.Г. Покусаев, А.В. Вязьмин, Н.С. Захаров, Д.П. Храмов, Д.А. Некрасов // Теоретические основы химической технологии.- 2020.- Т. 54.- № 2.- С. 263-275.</p> <p>11. Pokusaev, B.G. Unsteady heat and mass transfer in structured media and gel / B.G. Pokusaev, D.A. Nekrasov, N.S. Zakharov, D.P. Khrantsov, S.P. Karlov, A.V. Uvazmin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering.- 2020.- V. 54.- No. 1. P. 91-103.</p> <p>12. Pokusaev, B. Thermokinetics and rheology of agarose gel applied to bioprinting technology / B. Pokusaev, A. Uvazmin, N.</p>
--	--	--	---



					Zakharov, D. Nekrasov, S. Karlov, V. Reznik, D. Khrantsov // Thermal Science.- 2020. V. 24.- No. 1a.- P. 347-353.
--	--	--	--	--	--

 А.В. Вязьмин

Личную подпись Вязьмина Андрея Валентиновича удостоверяю.

Первый проректор РГУ МИРЭА,  
Д.Х.Н., профессор



  
Н.И. Прокопов