

На правах рукописи



Какаулов Сергей Владимирович

**ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ
ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ
ДИАФРАГМЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Забайкальский государственный университет» и в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Суворов Иван Флегонтович

**Официальные
оппоненты:**

Крымский Валерий Вадимович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), профессор кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии»

Пискарев Игорь Михайлович, кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник отдела электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ», (ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»).

Защита состоится «15» февраля 2017 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «07» декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. техн. наук



Александр Васильевич Кабышев

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблема и актуальность. Рост населения Земли и связанное с ним повышение потребления воды питьевого и технического назначения, а также негативные воздействия человека на среду обитания привели к тому, что к началу XXI в. вода стала одним из наиболее существенных и востребованных ресурсов человечества. Более 1 млрд человек в настоящее время постоянно испытывают нехватку чистой пресной воды. Согласно прогнозам, к 2025 г. эта проблема станет еще более острой в половине государств мира, а к концу века две трети населения окажутся в сложной ситуации в связи с нехваткой питьевой воды.

Ситуация осложняется тем, что физический дефицит пресной воды усугубляется активным загрязнением имеющихся запасов. В поверхностные и подземные воды попадает значительное количество промышленных стоков, продуктов нефтепереработки, ядовитых и радиоактивных веществ, солей тяжелых металлов, т.е. веществ, приводящих к возникновению опасных заболеваний. По данным государственного доклада «О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации», количество подземных и поверхностных источников централизованного водоснабжения в России, не соответствующих гигиеническим нормативам по микробиологическим показателям, составляет 3,8 и 16,5 % соответственно. По оценкам агентства «Охраны окружающей среды и управления водных ресурсов» США, почти 35 % смертей в развивающихся странах связано с загрязненной водой.

Альтернативой интенсификации разведки и добычи пресной воды является очистка загрязненной воды до установленных требований безопасности. Одним из направлений всего комплекса очистки загрязненной воды является ее обеззараживание, под которым понимается ряд мероприятий, направленных на полное или частичное уничтожение в воде вирусов, бактерий, способных вызвать множество инфекционных заболеваний.

Наряду с традиционными способами обеззараживания воды (химическими, физическими, комбинированными и т.п.) в практику вводятся новые способы очистки и обеззараживания воды. Среди них особую нишу занимают электроразрядные технологии, к которым относится и способ стерилизации воды диафрагменным электрическим разрядом (ДЭР). Способ универсален, может применяться для обработки питьевой воды, сточных вод и вод плавательных бассейнов.

Одним из приоритетных направлений совершенствования электроразрядных

способов дезинфекции является снижение эксплуатационных затрат, в том числе снижение электропотребления технологий. Исследования в области снижения потребления энергии разрядами в жидких средах показывают, что наиболее экономичными являются высоковольтные импульсные источники питания (ВИИП). Их применение и совершенствование в электроразрядной технике является перспективным способом снижения эксплуатационных затрат, что в конечном итоге предопределяет его эффективность. Сказанное актуализирует принятую к исследованию проблему.

Степень разработанности проблемы. Исследования способа обеззараживания и доочистки воды с помощью ДЭР начали проводиться в нашей стране в конце прошлого столетия в Читинском политехническом институте и в НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета. Разряд изучается как источник образования перекиси водорода H_2O_2 , ионов меди Cu^{2+} и серебра Ag^+ , атомарного кислорода O , озона O_3 , гидроксильных радикалов $OH^\bullet$ и супероксидов O_2^- . Основным преимуществом разряда является большое количество обеззараживающих факторов, бактерицидных агентов, он может образовываться от любых форм напряжения.

Существенный вклад в изучение воздействия электрических разрядов на воду внесли А. Fridman, М. Laroussi, Л. А. Юткин, И. Ф. Суворов, И. М. Пискарев, Н. А. Яворовский, Я. И. Корнев, В. А. Коликов, В. В. Крымский, Е. Stoffels, К. Kelly-Wintenberg, Yang Y., Р. Rajasekaran, S. B. Gupta, М. Sato, К. А. Лапшакова, А. С. Юдин, А. Ю. Никифоров, А. И. Максимов, Z. Stará, F. Krčma.

Степень изученности обеззараживания воды тлеющим, барьерным, коронным, искровым и дуговым разрядами высокая, однако относительно небольшое количество работ посвящено дезинфекции воды ДЭР. Недостаточно изучены природа и способности этого разряда. Все исследования ДЭР осуществлялись на реакторах с питанием преимущественно от источников постоянного или переменного промышленного напряжения, практически не рассматривались стерилизационные способности импульсного ДЭР. Не раскрыты вопросы образования ионов металлов при электроразрядной обработке воды, а олигодинамический эффект обеззараживания учтен лишь единицами авторов. Слабо исследованы реакторы ДЭР со способностью протекания через них воды, подавляющее число работ посвящено реакторам без какого-либо протока жидкостей через них. В редких исследованиях рассмотрено применение многоочагового ДЭР.

Объектом диссертационного исследования является процесс обеззараживания воды диафрагменным электрическим разрядом.

Предметом исследования являются особенности и эффективность использования для этой цели ВИИП и реактора ДЭР с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны.

Цель работы: повышение эффективности обеззараживания воды за счет применения ВИИП с наиболее эффективными режимами работы и реактора ДЭР с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны с серебряными и медными электродами, с оптимальными параметрами разряда.

Идея исследования заключается в научном обосновании применения импульсных электрических разрядов для обеззараживания воды в реакторе с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны и подборе оптимальных параметров источника питания и реактора ДЭР.

Методы исследования: в работе применялись осциллографирование напряжения, перманганатометрический метод определения концентрации перекиси водорода, атомно-абсорбционная спектрофотометрия (ААС) для определения концентрации ионов меди и серебра, метод определения общих и термотолерантных колиформных бактерий путем мембранной фильтрации для определения концентрации культуры кишечной палочки *E. coli*.

Для достижения цели потребовалось решить ряд задач:

- 1) провести анализ литературных данных о стерилизации воды электроразрядными способами;
- 2) разработать ВИИП, позволяющий снизить расход электроэнергии и повысить эффективность обеззараживания;
- 3) разработать новую конструкцию реактора ДЭР с меньшими эксплуатационными затратами и потреблением электроэнергии;
- 4) выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на эффективность ДЭР;
- 5) определить оптимальные рабочие параметры установки дезинфекции ДЭР для выхода бактерицидных агентов с минимальным электропотреблением.

Научная новизна исследования. В работе получен ряд новых результатов, которые можно свести к следующему.

1. Установлены зависимости выхода перекиси водорода, ионов меди и серебра в модельных растворах от амплитуды подводимого в зону ДЭР импульсного напряжения и длительности импульсов, а также проводимости модельного раствора и расхода электроэнергии.

2. Выявлены зависимости образования ионов меди и серебра от водородного показателя воды. Установлено, что вольт-амперная характеристика ДЭР имеет

серпообразную форму, а мощность, потребляемая реактором, зависит от температуры обрабатываемой воды. Выявлены характеристики отмирания бактерий в зависимости от концентрации ионов меди и серебра.

3. Определено, что реактор с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны (патент РФ № 137284 U1 от 19. 06. 2013) имеет более высокий выход обеззараживающих продуктов в сравнении с реактором с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране.

4. Разработан алгоритм управления ВИИП как основа технологии обеззараживания воды, заключающийся в регулировании расхода электроэнергии, корректировке Ph и управлении барботирования воды.

Теоретическая и практическая значимость исследования определяется совокупностью новых полученных знаний и состоит в:

1) разработке новой конструкции реактора ДЭР (патент РФ №137284 U1 от 19. 06. 2013);

2) разработке ВИИП (патент РФ №151949 от 21. 11. 2013);

3) практическом обосновании более чем двукратной обеззараживающей эффективности использования нового реактора ДЭР с серебряными и медными электродами совместно в сравнении с реактором ДЭР, питающегося от источника переменного синусоидального напряжения, с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране с медными электродами;

4) улучшении эксплуатационных характеристик обеззараживающей технологии за счет снижения рабочих токов и напряжения, что увеличивает срок службы диафрагменной мембраны (патент РФ №137284 U1 от 19. 06. 2013);

5) разработке рекомендаций для проектирования установок обеззараживания воды на основе ДЭР.

Положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Зависимости выхода перекиси водорода, ионов меди и серебра в модельных растворах от амплитуды импульсного напряжения, длительности импульсов, проводимости модельного раствора, расхода электроэнергии.

2. Выход бактерицидных агентов реактора с горизонтальным относительно диафрагменной мембраны протоком воды (патент РФ №137284 U1 от 19. 06. 2013) имеет большую интенсивность в сравнении с реактором с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране.

3. Вольт-амперная характеристика ДЭР; зависимости: а) мощности, потребляемой реактором, от температуры обрабатываемой воды; б) отмирания

бактерий от концентрации ионов меди и серебра; в) образования ионов меди и серебра от водородного показателя воды.

4. Алгоритм управления ВИИП как основа технологии обеззараживания воды.

Личный вклад автора. Автор участвовал в планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, формулировании выводов, а также в подготовке научных публикаций.

Достоверность полученных результатов подтверждена патентной чистотой разработанных технических решений. Для решения поставленных задач использованы физико-химические и бактериологические методы исследования, проводившиеся в аккредитованных и сертифицированных лабораториях. Результаты экспериментальных данных обработаны при помощи методов математической статистики с использованием пакета прикладных программ Excel 2010.

Апробация работы. Материалы диссертационного исследования докладывались на XI Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения» (Чита, 2011), XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ-2011 (Томск, 2011), II Международной научно-практической конференции «Чистая капля воды» (Чита, 2012), XXIII Российской молодежной научной конференции «Проблемы теоретической и экспериментальной химии» (Екатеринбург, 2013), XI Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение» (Томск, 2013), Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования» (Владивосток, 2015).

Публикации. По результатам выполненных исследований и разработок, связанных с темой диссертационного работы, опубликовано 17 научных работ, в том числе 2 патента РФ, 7 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, две из которых входят в перечень реферативной базы SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из Введения, шести глав, основных выводов, списка сокращений, Заключения, библиографического списка (228 наименований), изложена на 110 страницах, содержит 49 рисунков, 2 таблицы, 1 приложение.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, представлена степень разработанности проблемы, изложены цель, задачи исследований, раскрыты научная новизна, приведены защищаемые положения,

определена теоретическая и практическая значимость работы.

В главе 1 выполнен обзор научно-технической литературы, посвященной проблеме обеззараживания воды электроразрядными технологиями. Рассмотрены способы стерилизации воды на основе использования электрических разрядов: тлеющего, барьерного, коронного, частичного, искрового, дугового, диафрагменного. Представлен обзор литературных данных о стерилизации воды ДЭР. В конце первой главы сформулированы обоснования цели и задач исследования.

В главе 2 приведены описания нового реактора ДЭР (пат. 137284 РФ), ВИИП (пат. 151949 РФ), принципиальной схемы их включения вместе с осциллографом, а также методики экспериментальных исследований. Схема реактора изображена на

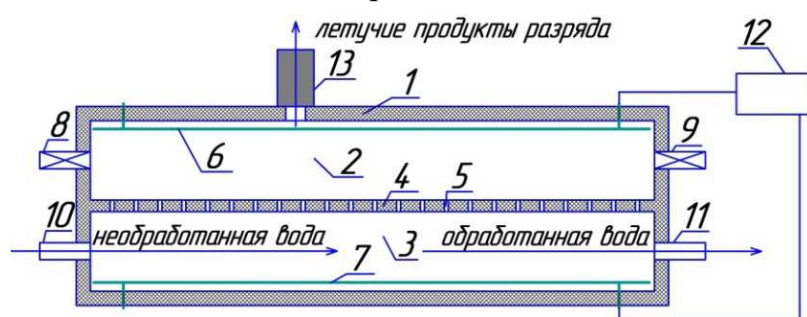


Рис. 1. Схема реактора ДЭР

рис. 1.

Устройство содержит герметичный корпус 1, разделенный на верхнюю 2 и нижнюю 3 камеры диафрагменной мембраной 4, в которой имеются отверстия 5.

В реакторе находятся металлические электроды 6 и 7, верхние 8 и 9 и нижние 10 и 11 патрубки. Устройство подключается к источнику питания 12. К электродам реактора можно подключать источники питания любых форм напряжения. Для снижения давления в реакторе установлен воздушный клапан 13, обеспечивающий выход парогазовых продуктов разряда.

В качестве источника питания для реактора ДЭР использовался ВИИП

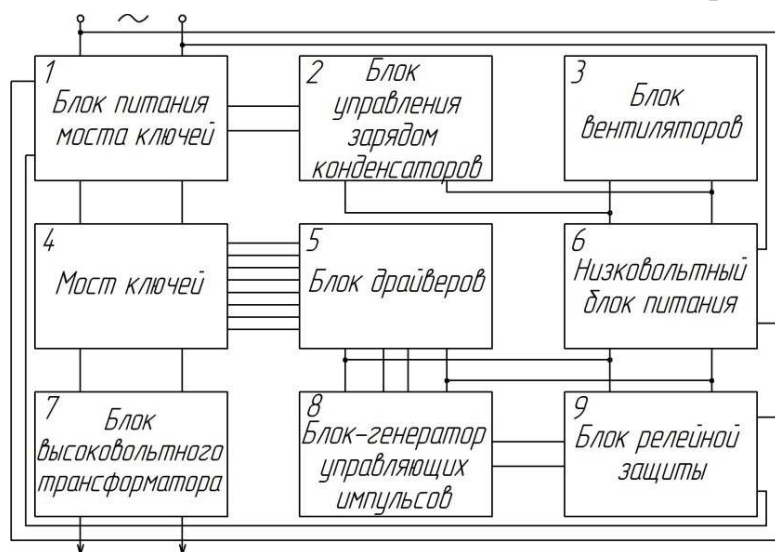


Рис. 2. Блок - схема ВИИП

авторской разработки (рис. 2). Устройство имеет возможность регулирования длительности импульсов от 1 до 16 мкс, а амплитуды импульсов – от 0 до 3 кВ. Максимальная мощность ВИИП составляет 4 кВт. Выходы высоковольтной обмотки импульсного трансформатора 7 подключаются к электродам реактора ДЭР.

В главе 3 представлены результаты сравнения оборудования ДЭР (реактора и ВИИП) и описаны его характеристики. Принцип дезинфекции ДЭР заключается в том, что часть необработанной воды поступает в нижнюю камеру реактора (рис. 1) и после обработки возвращается в основной поток. На металлические электроды реактора подается напряжение от источника питания, в воде возникает электрический ток, плотность которого возрастает в отверстиях диафрагменной мембраны. Электрический ток, протекая через отверстия мембраны, вызывает нагревание, вскипание воды, парообразование и пробой парогазовых пузырьков за счет возникновения перенапряжения при разрыве контура тока этими пузырьками, в результате чего образуется ДЭР. Обработанная вода вытекает из выходного патрубка, перемешивается с основным потоком воды и полностью стерилизует его.

До недавнего времени был известен один вид реактора ДЭР, способного обрабатывать поток воды. Остальные известные виды реакторов не предназначены для обработки больших объемов жидкостей, а используются только в экспериментальных целях, процесс протока через них каких-либо растворов не рассматривается, а диафрагменная мембрана выполнена только с одним отверстием. В известном реакторе для потока воды (рис. 3) используется способ подачи воды, обеспечивающий протекание всей исходной воды через отверстия диафрагменной мембраны.

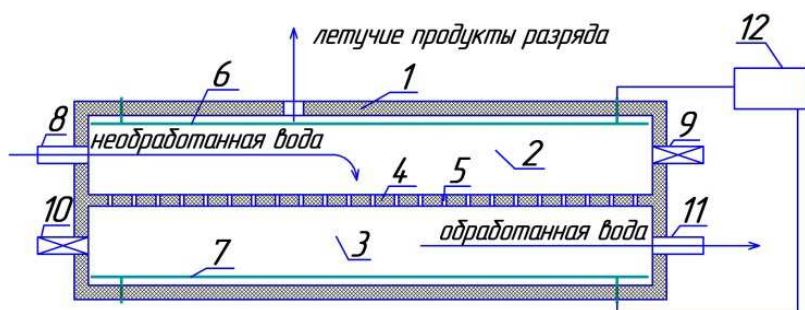


Рис. 3. Реактор с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране

Новый реактор (см. рис. 1) имеет иной способ подачи воды, при котором обрабатываемая вода не протекает через отверстия мембраны, а проходит только через нижнюю камеру 3. В результате этого не

происходит смыв предразрядных продуктов (парогазовых пузырьков), а в верхней части камеры вода остается неподвижной и может нагреваться до температуры 90-97 °С, что способствует улучшению образования парогазовой смеси и увеличению интенсивности разряда. Более интенсивный разряд при одинаковом потреблении электроэнергии повышает образование всех бактерицидных агентов.

Новое техническое решение позволяет повысить эффективность обеззараживания воды ДЭР, повысить надежность работы реактора из-за отсутствия перетекания воды через диафрагменную мембрану и уменьшения засорения отверстий. В результате снижаются рабочие напряжение, напряжение зажигания

ДЭР и токи устройства, что способствует увеличению срока эксплуатации диафрагменной мембраны из-за меньшего изнашивания отверстий в ней. Значительно сокращается потребление электрической энергии из-за снижения рабочих токов и напряжений.

Сравнение реакторов ДЭР производилось по разности концентрации образовавшейся перекиси водорода, определяемой согласно ГОСТ 177-88. Сгенерированной перекиси водорода в известном реакторе установлено в количестве 0,58 мг/Вт·ч, а в предложенном реакторе – 0,87 мг/Вт·ч, что практически на 50 % выше.

Источниками питания технологии обеззараживания воды ДЭР могут служить источники с различными формами напряжений. Одной из задач диссертационного исследования ДЭР являлось выяснение предпочтительности форм питающих напряжений (синусоидальной или импульсной) для обеззараживания воды. Постоянное и выпрямленное напряжение не рассматривалось по причине образования разряда от них только в одном отверстии диафрагменной мембраны, что приводит к его быстрому прогоранию и расширению.

Опыты проводились в статическом режиме реактора (без протока воды) с медными электродами. В экспериментах на реактор подавались одинаковые мощности, которые контролировались счетчиком электрической энергии и секундомером. На каждый опыт затрачено по 50 Вт·ч за 60 с. Амплитуда импульсов напряжения ВИИП составляла 2,25 кВ, импульсов тока 1,2 А с длительностью 7 мкс и скважностью 2,02. Сопротивление реактора ДЭР в данных условиях составляло 1,87 кОм. Во время исследования выхода H_2O_2 от синусоидального напряжения частотой 50 Гц и с амплитудой на уровне 3 кВ, амплитуда тока составляла 1,77 А, а сопротивление реактора в этом экспериментальном режиме было равно 1,69 кОм. В результате, при питании реактора от ВИИП образовалось 1,54 мг/Вт·ч перекиси водорода, в то время как при питании от переменного синусоидального напряжения ее было 0,76 мг/Вт·ч.

Объяснением этого эффекта могло служить то, что ДЭР от импульсного напряжения был намного интенсивней, стримеры длиннее (измерения не проводились), а шум разряда практически отсутствовал в сравнении с использованием синусоидального питающего напряжения.

Проведенное исследование указывает на то, что применение ВИИП для ДЭР вместо повышающего трансформатора промышленной частоты снижает расход электроэнергии в 2 раза.

Для определения характера ДЭР определена его вольт-амперная

характеристика (ВАХ). Формы импульсов тока полностью совпадали по внешнему виду с импульсами напряжения, сдвиг между ними отсутствовал на всех длительностях. В результате происходящих процессов в реакторе ДЭР, питающегося от ВИИП с разнополярными импульсами, было определено, что ВАХ весьма нелинейная, имеет серпообразный характер (рис. 4) и зависит в большей степени от образования паровоздушной смеси, чем от сопротивления воды.

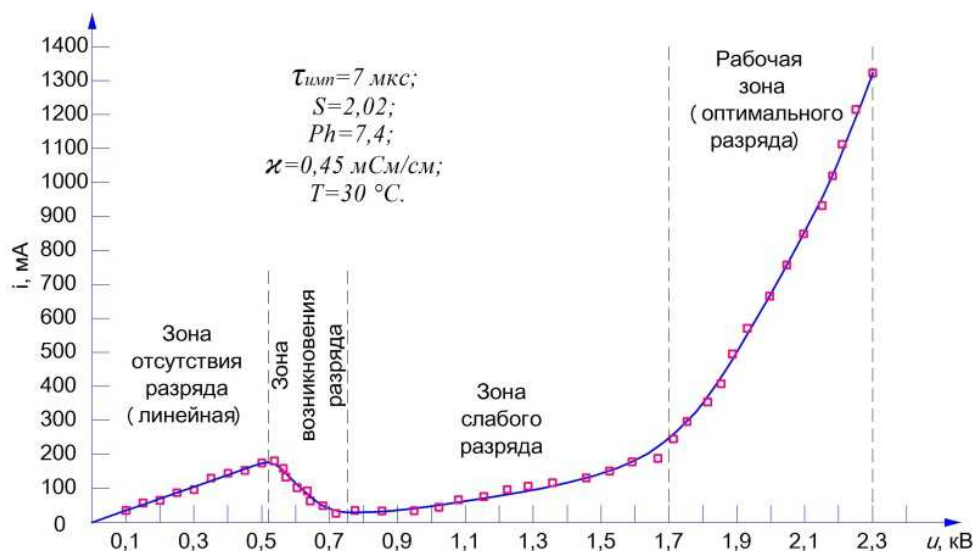


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика ДЭР

На участке амплитуд импульсов напряжений от 0 до 525 В ток растет линейно, пропорционально напряжению, так как разряд при данных напряжениях отсутствует. На участке от 525 до 755 В с увеличением напряжения наблюдается снижение тока. Появление участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением вызвано началом образования ДЭР, возникновением парогазовой смеси и, следовательно, увеличением сопротивления в отверстиях диафрагменной мембраны. Превышая значения максимумов импульсов выше 755 В, ВАХ монотонно возрастает и кривая линия имеет вогнутый характер, ток растет быстрее напряжения, что связано с интенсивным образованием и ростом температуры парогазовой смеси в отверстиях диафрагменной мембраны (от 2000 до 5000 °К) и нелинейному увеличению ее проводимости.

При проведении экспериментов с ВАХ ДЭР установлено, что она не изменяется и имеет одну и ту же форму при температурах воды от 2 до 60 °С (рис. 5). Эксперименты подтверждают предположение о зависимости исследования ВАХ ДЭР в основном от образования парогазовой смеси, а не от сопротивления воды, которое изменяется от температуры нелинейно. При более высоких температурах жидкостей происходит более интенсивное парообразование в отверстиях диафрагменной мембраны, в результате чего потребляемая разрядами мощность резко падает без уменьшения интенсивности разряда.

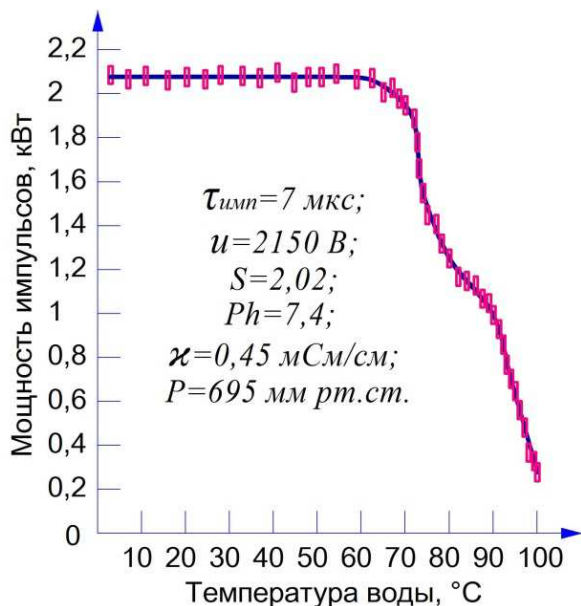


Рис. 5. Потребляемая мощность реактора ДЭР в зависимости от температуры воды

Исследование зависимости потребляемой мощности реактором ДЭР от температуры воды проводилось при тех же условиях, что и в ВАХ ДЭР, только с неизменной амплитудой импульсов 2150 В и с изменяющейся температурой воды от 2 до 100 °С. Снижение потребляемой мощности при одинаковых интенсивностях разряда способствует уменьшению потребления электроэнергии. На основании приведенной характеристики (рис. 5) сконструирован реактор с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны (патент 137284 РФ).

В главе 4 описаны результаты тестирования экспериментальной установки для обеззараживания воды. На первом этапе исследовалось образование перекиси водорода в зависимости от различных параметров питающих импульсов напряжения и проводимости модельного раствора. Как и предполагалось, выход H_2O_2 существенно зависит от величины напряжения. Эта зависимость подтверждена следующим экспериментом. На каждую исследованную контрольную точку затрачено по 50 Вт·ч электрической энергии и по 7 л модельного раствора. В реакторе использовались медные электроды. Зависимость выхода перекиси водорода от амплитуды импульсного напряжения изображена на рис. 6.

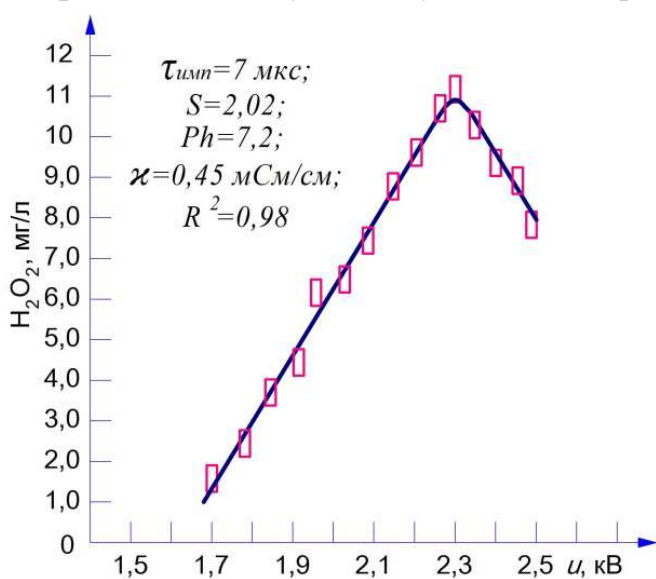


Рис. 6. Выход перекиси водорода в зависимости от амплитуды импульсного напряжения

Диапазон исследуемых мгновенных напряжений определен экспериментальным путем и взят в интервале от 1,5 до 2,7 кВ. При напряжениях ниже 1,7 кВ ДЭР показал низкую интенсивность образования H_2O_2 , при напряжениях выше 2,5 кВ происходили короткие замыкания, сопровождающиеся взрывом продуктов разряда в реакторе. Из зависимости, приведенной на рис. 6, следует, что

на участке напряжений от 1,7 до 2,3 кВ кривая носит линейный нарастающий характер, а после 2,3 кВ – линейный убывающий, причем угол спада кривой равен углу нарастания.

Приведенная зависимость доказывает, что увеличение напряжения питания ДЭР имеет положительный эффект до определенной переломной точки, после которой повышение напряжения носит отрицательный характер. Слишком высокое напряжение разряда увеличивает его мощность и соответственно энерговклад в разряд, в результате чего происходит сгорание обеззараживающих продуктов. В результате можно выделить наиболее продуктивный диапазон импульсов напряжений в интервале от 2,0 до 2,3 кВ.

Экспериментально установлено, что длительность импульсов также как и их амплитуда влияет на выход дезинфицирующих компонентов (рис. 7).

В исследованиях изменялись длительности импульсов от 1 до 16 мкс. На основании рис. 7 можно сделать вывод, что оптимальная длительность импульсов, при которой достигается наибольшая производительность перекиси

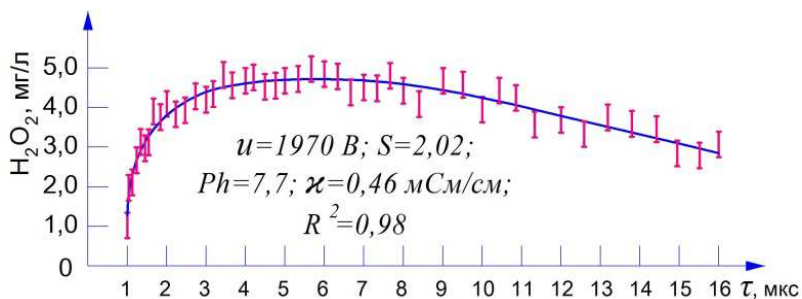


Рис. 7. Зависимость генерирования перекиси водорода H_2O_2 от длительности импульсов напряжения

водорода, находится в диапазоне 4-8 мкс. При значениях длительностей импульсов менее 4 мкс наблюдается низкая производительность исследуемого бактерицидного агента. Это, возможно, связано с недостаточным временем воздействия напряжения, которое требуется для развития разряда. Спад производительности также наблюдается в случаях длительностей импульсов более 8 мкс, причиной снижения образования продуктов дезинфекции воды, возможно, служит увеличение джоулева нагрева воды.

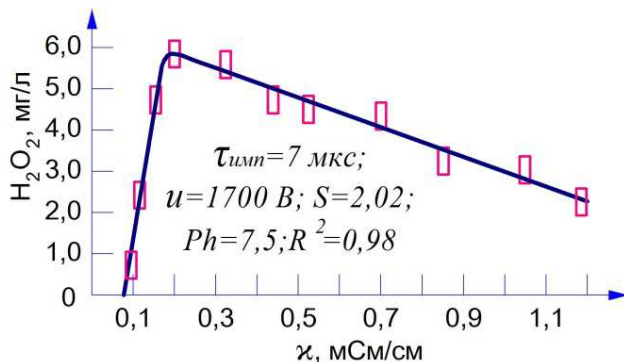


Рис. 8. Выход H_2O_2 в зависимости от проводимости модельного раствора

Важной задачей являлось установление зависимости выхода перекиси водорода от проводимости модельного раствора при фиксированном расходе электроэнергии. На графике, приведенном на рис. 8, видно, что на участке проводимости от 0,07 до 0,17 мСм/см происходило резкое увеличение

концентрации H_2O_2 из-за нарастания интенсивности разряда, при значениях проводимости ниже 0,07 мСм/см разряд полностью отсутствовал. На участке от 0,17 до 1,2 мСм/см наблюдался линейный спад производительности, связанный с увеличением тепловых потерь на процесс обработки модельного раствора.

Проведенный эксперимент позволил выделить оптимальный диапазон проводимости обрабатываемой жидкости в интервале от 0,17 до 0,25 мСм/см, обеспечивающий минимальное потребление электроэнергии на процесс обеззараживания воды.

В главе 5 описаны эксперименты, выявляющие зависимости образования ионов Cu^{2+} и Ag^+ от различных параметров питающих импульсов напряжения, проводимости и Ph модельного раствора. Неотъемлемым фактором обеззараживания воды ДЭР является олигодинамический эффект стерилизации. Проникая в клетки микроорганизмов, ионы дезинфицирующих металлов блокируют их жизнедеятельность, что приводит к гибели бактерий. А. С. Юдин в своих исследованиях доказал, что образование ионов металлов в реакторе ДЭР не укладывается в законы классической электрохимии.

Одним из факторов образования Cu^{2+} и Ag^+ является напряжение, прикладываемое к электродам. Условия экспериментов по определению концентраций ионов металлов в зависимости от воздействующих напряжений полностью совпадают с условиями исследования генерации перекиси водорода от напряжений. Определение концентрации ионов меди и серебра происходило методом атомно-абсорбционной спектроскопией.

Зависимости образования ионов Cu^{2+} и Ag^+ от амплитуды импульсов приведены на рис. 9. Здесь кривые прямолинейно нарастают от значения 1,7 до

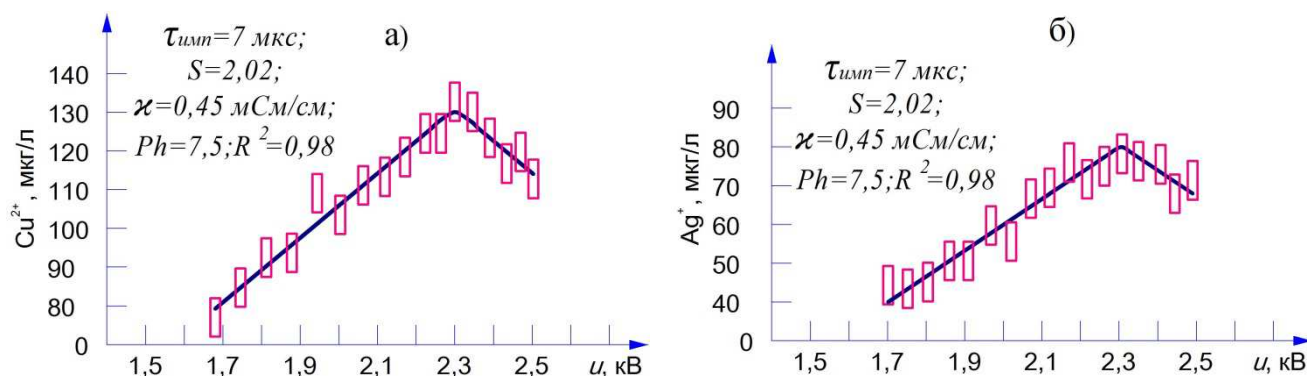


Рис. 9. Выход ионов меди (а) и серебра (б) в зависимости от мгновенного импульсного напряжения

2,3 кВ, при превышении амплитуд импульсов выше 2,3 кВ генерация ионов уменьшается, что связано с увеличением тепловых потерь на обработку жидкости. Таким образом, наиболее продуктивный диапазон импульсов напряжений находится

в пределах от 2,0 до 2,3 кВ. Формы зависимости выхода Cu^{2+} и Ag^+ аналогичны зависимости выхода перекиси водорода.

Рис. 10 иллюстрирует зависимость образования Cu^{2+} и Ag^+ от длительности

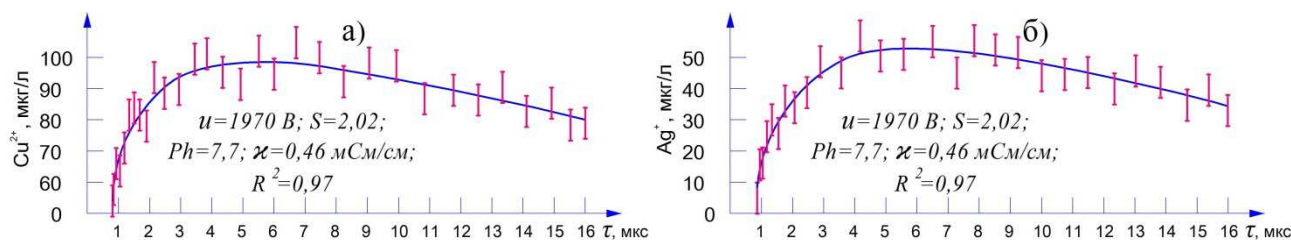


Рис. 10. Образование ионов Cu^{2+} (а) и Ag^+ (б) в зависимости от длительности импульсов напряжения

импульсов напряжения. Эксперименты по определению наиболее эффективной длительности импульсов для выхода ионов меди и серебра осуществлялись в условиях, аналогичных условиям определения концентрации ионов металлов от амплитуды напряжения, отличающихся тем, что амплитуда импульсов, равная 1970 В, оставалась неизменной, а длительность импульсов изменялась от 1 до 16 мкс (рис. 10, а; б). Как и на зависимости выхода H_2O_2 (рис. 7) оптимальная длительность импульсов, при которой достигается наибольшее образование ионов металлов, находится в диапазоне 4–8 мкс.

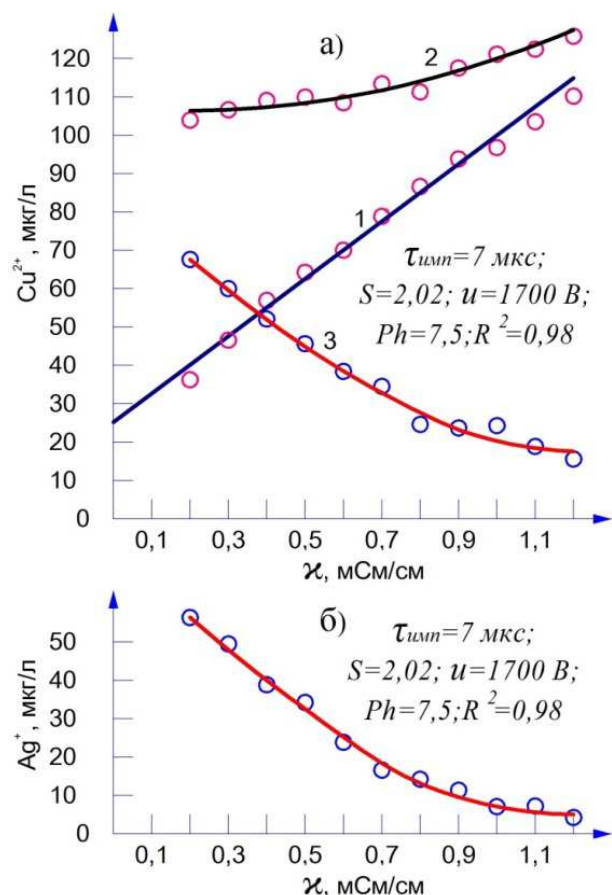


Рис. 11. Образование ионов меди (а) и серебра (б) в зависимости от проводимости модельного раствора

Исследование выхода Cu^{2+} и Ag^+ в зависимости от проводимости модельного раствора проводились в условиях, аналогичных условиям образования перекиси водорода в зависимости от этого же параметра. Кривая 1 (рис. 11, а) показывает концентрацию ионов меди в модельном растворе (с NaCl) при различных проводимостях. Кривая 2 является результатом обработки раствора в реакторе, кривая 3 – разность между кривыми 2 и 1. Кривая 3 отображает итоговый выход ионов меди в зависимости от проводимости обрабатываемой жидкости, линия полого убывает, что означает уменьшение образования Cu^{2+} и снижение эффективности обеззараживания воды с уменьшением ее сопротивления.

На рис. 11, б показан результат образования ионов серебра в модельном растворе. В отличие от ионизации исследуемой жидкости ионами Cu^{2+} , ионы Ag^+ не были обнаружены в дистиллированной воде и в кристаллах поваренной соли. Поэтому на рис. 11, б отсутствуют линии с начальной концентрацией ионов серебра. Кривая также убывает с увеличением проводимости исследуемой жидкости. Приведенные графики ионизации воды, как и зависимость выхода перекиси водорода (рис. 8), доказывают необходимость применения средств для уменьшения проводимости воды с целью увеличения эффективности ее обеззараживания.

Эффективность процесса обеззараживания воды значительно зависит от водородного показателя обрабатываемых жидкостей (рис. 12). Определение этих зависимостей происходило практически в идентичных условиях, как и при исследовании выхода ионов металлов от величины амплитуды импульсов. Однако в данном случае их значение было иным (2150 В) и оставалось неизменным, а РН изменялся в пределах от 2,5 до 9,5. Зависимости показывают, что образование Cu^{2+} выше в кислой среде, а Ag^+ – в щелочной.

В главе 6 представлены результаты образования бактерицидных агентов от энергетического вклада в разряд, зависимости отмираний бактерий от концентраций Cu^{2+} и Ag^+ и алгоритм управления системой дезинфекцией ДЭР.

В ходе лабораторных исследований установлены зависимости выхода Cu^{2+} , Ag^+ и H_2O_2 от энергетического вклада в разряд. Все условия эксперимента аналогичны условиям определения концентрации ионов меди и серебра от амплитуды импульсов напряжения, только расход электроэнергии составлял от 10 до 100 Вт·ч для каждой контрольной точки исследуемой величины напряжения. На каждую точку графиков затрачено по 7 л модельного раствора. Зависимости

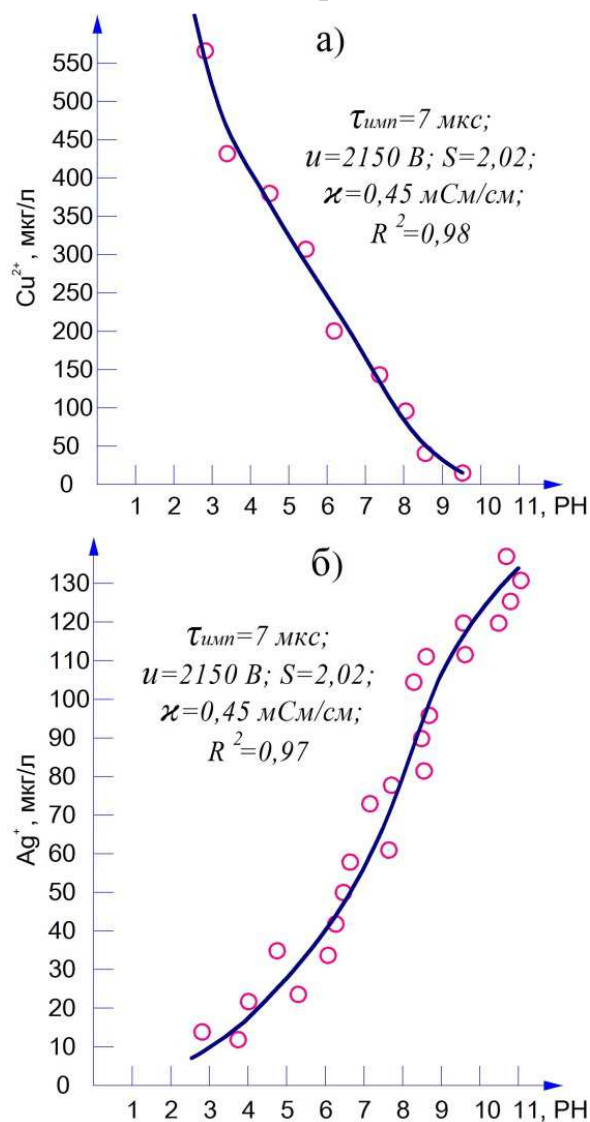


Рис. 12. Образование Cu^{2+} (а) и Ag^+ (б) от РН модельного раствора

представляют общее количество ионов металлов и молекул H_2O_2 во всем модельном растворе, потому что их итоговая масса образования не зависит от количества обработанной жидкости (рис. 13). Характеристики выхода бактерицидных агентов

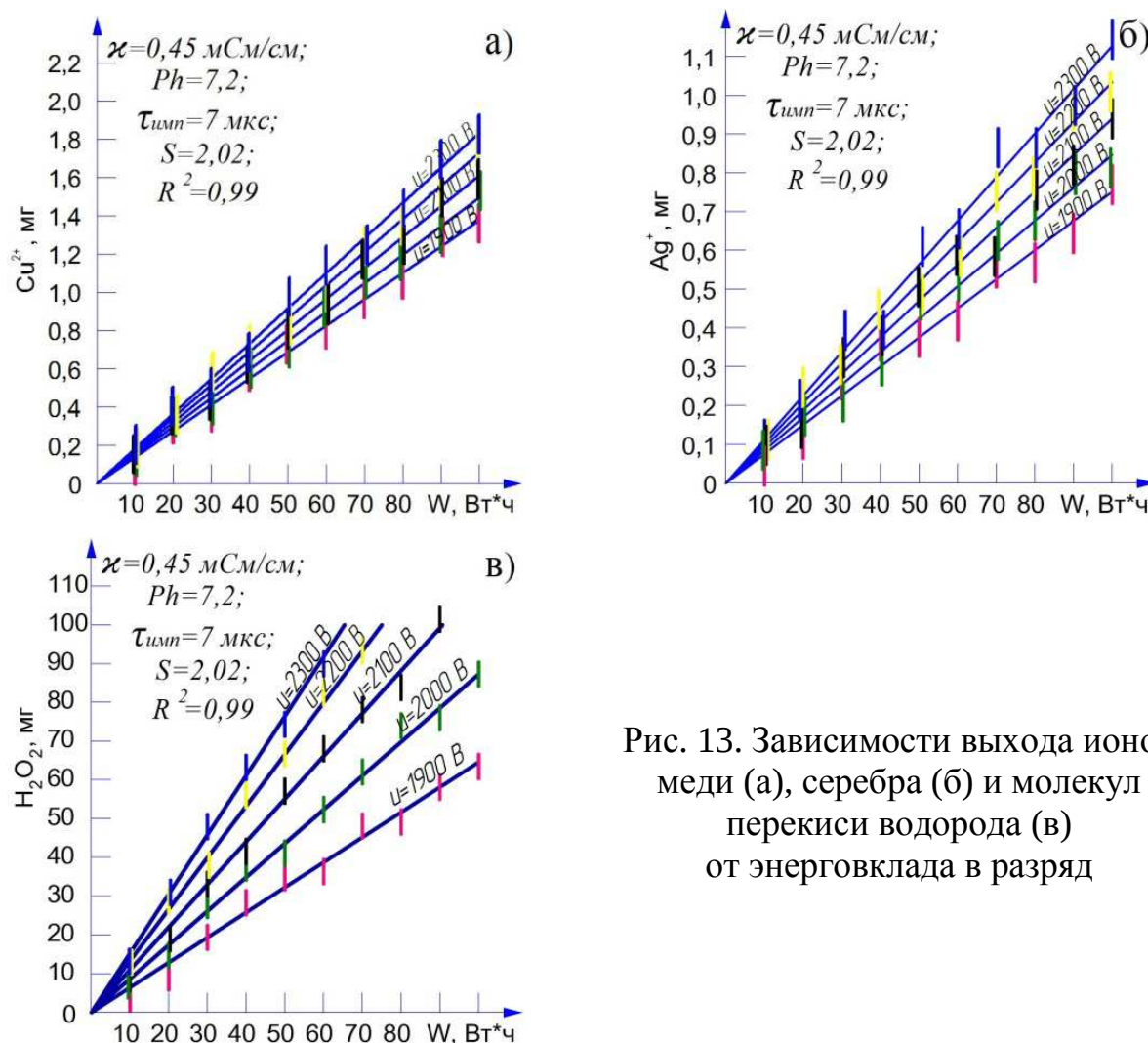


Рис. 13. Зависимости выхода ионов меди (а), серебра (б) и молекул перекиси водорода (в) от энергозатрат в разряд

могут быть описаны формулами:

$$C_{Cu^{2+}} = (0,0118 \cdot U - 8,69) \cdot W/V; \quad (1)$$

$$C_{Ag^+} = (0,00946 \cdot U - 10,446) \cdot W/V; \quad (2)$$

$$C_{H_2O_2} = (0,1649 \cdot U - 267,35) \cdot W/V, \quad (3)$$

где $C_{Cu^{2+}}$ – концентрация ионов меди, мкг/л;

C_{Ag^+} – концентрация ионов серебра, мкг/л;

$C_{H_2O_2}$ – концентрация перекиси водорода, мг/л;

U – амплитуда импульсов напряжения в диапазоне от 1700 до 2300 В;

W – количество затраченной электроэнергии, Вт·ч;

V – количество обработанного модельного раствора, л.

Итоговые зависимости отмираний бактерий при обработке ДЭР исследованы на модельном растворе из водопроводной воды и культуры кишечной палочки *E. coli*. Условия проведения экспериментов аналогичны условиям исследований

зависимости выхода Cu^{2+} и Ag^+ от амплитуды напряжения, однако она оставалась неизменной и равна 2,3 кВ, а модельный раствор изготовлен из водопроводной воды и *E. coli*. Обработанная водопроводная вода в реакторе ДЭР смешивалась в определенной пропорции с модельным раствором и отстаивалась 60 мин, после чего исследуемая жидкость подвергалась анализу (рис. 14). Концентрация ионов металлов менялась в зависимости от пропорции разбавления обработанной воды и модельного раствора.

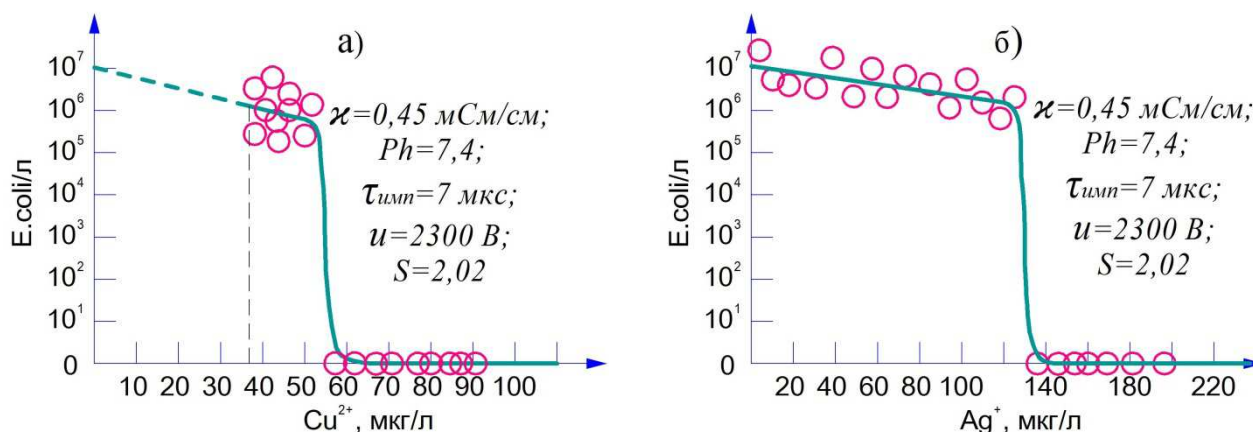


Рис. 14. Зависимости отмирания *E. coli* от концентрации Cu^{2+} (а) и Ag^+ (б)

На основании приведенных экспериментов и полученных зависимостей разработан алгоритм управления системой обеззараживания воды (рис. 15). Алгоритм разработан для стерилизации воды плавательных бассейнов.

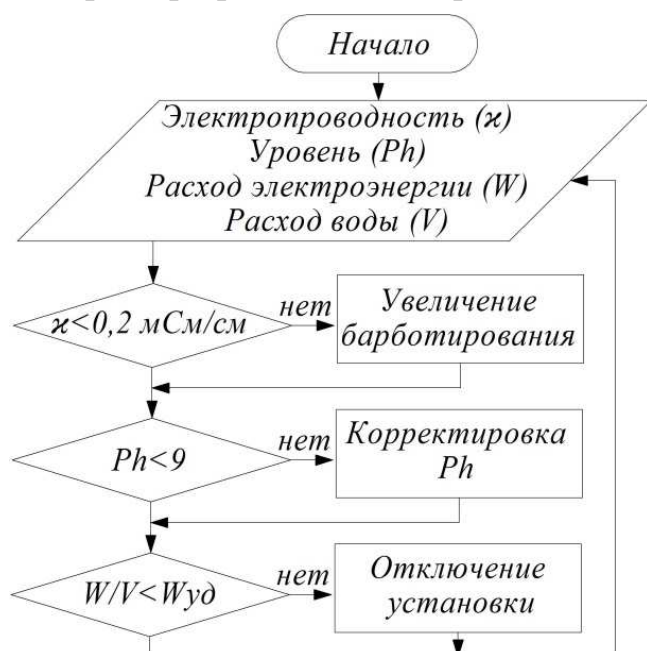


Рис. 15. Алгоритм управления системой дезинфекции воды

Контроль за ионами меди и серебра возможно осуществлять на основании регулирования расхода электроэнергии и воды с последующим определением их концентрации расчетным путем. Определение количества бактерицидных агентов приведено на рис. 14 и описано формулами (1, 2, 3). Контроль над концентрациями ионов металлов будет осуществляться через контроль над концентрацией Ag^+ , и в случае достижения последней ПДК, концентрация Cu^{2+} (также как и H_2O_2) будет ниже предельных значений.

Согласно СанПиН 2.1.4.1074-01 питьевой воды значение водородного показателя может находиться в пределах от 6 до 9 (требования распространяются и

на плавательные бассейны). Эксплуатация плавательных бассейнов приводит к увеличению P_h воды, в результате чего его необходимо уменьшать. Для этих целей необходимо применять в системе дезинфекции воды дозатор жидкого кондиционера снижения P_h . Также необходимо контролировать проводимость воды в реакторе ДЭР с помощью барботирования для увеличения эффективности обеззараживания (рис. 8 и 11).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В диссертационной работе на основе выявленных зависимостей процесса получения дезинфицирующих агентов с применением ДЭР для обеззараживания воды дано новое решение актуальной научно-технической проблемы повышения эффективности работы сооружений и устройств систем водного хозяйства путем совместного применения разработанных ВИИП и реактора с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны с серебряными и медными электродами, что обеспечивает более высокую эффективность, низкую энергоемкость и улучшает эксплуатационные характеристики предлагаемой системы обеззараживания.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно отметить следующие основные результаты и сделать выводы.

1. Установлено, что выход обеззараживающих агентов пропорционально зависит от величины амплитуды приложенного импульсного напряжения и имеет максимум при значении 2,3 кВ. Выше этого значения происходит снижение производительности реактора из-за сгорания дезинфицирующих продуктов. Наиболее продуктивный диапазон импульсов напряжений находится в интервале от 2,0 до 2,3 кВ.

2. Определено, что выход ионов серебра увеличивается с повышением щелочности воды, а ионов меди – с повышением кислотности воды.

3. Выявлено, что на выход Cu^{2+} , Ag^+ и H_2O_2 при обработке воды ДЭР влияет проводимость воды, наибольшая производительность наблюдается при значении 0,17 мСм/см, увеличение и снижение проводимости уменьшает величину генерации дезинфицирующих агентов.

4. Установлено, что вольт-амперная характеристика реактора ДЭР не линейная и имеет серпообразный характер, а потребление электрической энергии на процесс обеззараживания воды является постоянной величиной при ее температуре от 2 до 60 °С и резко падает с повышением температуры выше 60 °С.

5. Доказано, что наиболее эффективная длительность импульсов питающего

напряжения лежит в диапазоне от 4 до 8 мкс.

6. Применение реактора ДЭР с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны (с использованием верхней камеры для улучшения образования паро-воздушных пузырей), с серебряными и медными электродами, с ВИИП повышает обеззараживающую эффективность технологии более чем в 2 раза по сравнению с реактором, питающегося от источника переменного синусоидального напряжения и в котором проток воды осуществляется через отверстия в диафрагменной мембране с медными электродами.

7. Установлено, что реактор с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны эффективней реактора с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране и обеспечивает дезинфекцию на 40 % интенсивней, обладает улучшенными эксплуатационными характеристиками (сниженным напряжением зажигания разряда более чем в 2 раза, сниженными рабочими напряжениями и токами более чем в 2 раза, увеличенным сроком службы диафрагменной мембраны). Также установлено, что диафрагменная мембрана реактора должна быть расположена горизонтально.

8. Определены зависимости отмираний кишечной палочки от концентраций ионов меди и серебра. Выявлено отсутствие возможности использования только серебряных электродов в реакторе ДЭР, потому что пороговая смертельная концентрация ионов серебра для кишечной палочки составляет 130 мкг/л, что в 2,6 раз выше ПДК этих ионов в воде. Установлено, что пороговая смертельная концентрация ионов меди для *E. coli* составляет 55 мкг/л, что более чем в 18 раз ниже их ПДК для воды.

9. Выявлены зависимости и формулы выхода ионов меди и серебра и молекул перекиси водорода в модельном растворе от энергетического вклада в ДЭР.

10. Разработан алгоритм управления процессом обеззараживания воды ДЭР. Результаты исследований используются в учебном процессе ТПУ и ЗабГУ при преподавании дисциплин «Теория автоматического управления», «Промышленная электроника», «Управление техническими системами», «Электротехнологические установки».

Перспективными направлениями дальнейшей разработки темы являются исследование обеззараживающих способностей ДЭР в диапазоне длительностей импульсов больше 16 мкс и меньше 1 мкс, а также изучение режимов работы реактора ДЭР с применением воздушного барботирования и ВИИП с целью оценки их стерилизующих способностей. Остались не исследованными дезинфицирующие свойства разработанного оборудования от различных вирусов, в том числе и рото-

вирусов, для которых на сегодняшний день не создано ни одной технологии стерилизации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ АВТОРА

В изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1. **Kakaurov S. V.** Application of Microsecond Voltage Pulses for Water Disinfection by Diaphragm Electric Discharge / S. V. Kakaurov, I. F. Suvorov, A. S. Yudin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 652: Gas Discharge Plasmas and Their Applications (GDP 2015): 12th International Conference, 6–11 September 2015, Tomsk, Russia: [proceedings]. – [012060, 6 p.].

2. **Kakaurov S. V.** Electrical Discharges with Liquid Electrodes Used in Water Decontamination / S. V. Kakaurov, E. E. Son, I. F. Suvorov [et al.] // High Temperature, 2014, Vol. 52, No. 4, pp. 490–496.

3. **Какаулов С. В.** Характеристики образования ионов меди и серебра при обеззараживании воды диафрагменным электрическим разрядом. Вестник Забайкальского государственного университета. -2013, № 11. -С. 22-27.

4. **Какаулов С. В.** Применение низкотемпературной плазмы для обеззараживания вод / С. В. Какаулов, И. Ф. Суворов, Т. Л. Соловьева и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. -2014. -Т. 57, № 3-3. -С. 156-159.

5. **Какаулов С. В.** Эффективность применения электретных пленок в диафрагменном электрическом разряде для обеззараживания водных растворов / С. В. Какаулов, Т. В. Рахлецова, И. Ф. Суворов и др. // Известия высших учебных заведений. Физика -2014. -Т. 57, № 3-3. -С. 229-233.

6. **Какаулов С. В.** Электрические разряды с жидкими электродами / С. В. Какаулов, А. Ф. Гайсин, И. Ф. Суворов и др. // Вестник Казанского технологического университета -2013. -Т. 16, № 23. -С. 199-201.

7. **Какаулов С. В.** Оптимизация электропотребления установкой обеззараживания вод диафрагменным электрическим разрядом / С. В. Какаулов, И. Ф. Суворов, А. И. Сидоров и др. // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2014. № 4. С. 158-164.

Публикации в других изданиях

8. **Kakaurov S. V.** The application of microsecond pulses for disinfection of water diaphragm electric discharge / S.V. Kakaurov, I.F. Suvorov, A.S. Judin [et al.] // Сб. трудов Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования», Владивосток 14-18 сентября 2015. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2015. -С. 543-545.

9. **Какаулов С. В.** Обеззараживание воды диафрагменным электрическим разрядом / С. В. Какаулов, А. С. Юдин, И. Ф. Суворов // Материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск 18-22 апреля 2011. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – Т.1, С. 63-64.

10. **Какаулов С. В.** Характеристики очистки воды от фенола диафрагменным электрическим разрядом / С. В. Какаулов, Н. С. Лисохмар, В. Н. Бекасова // Материалы XXIII Российской молодежной научной конференции «Проблемы теоретической и экспериментальной химии», Екатеринбург 23-26 апреля 2013. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2013.

-С. 432-433.

11. **Какаулов С. В.** Очистка сточных вод от фенола с помощью диафрагменного электрического разряда / С. В. Какаулов, Н. С. Лисохмар, В. Н. Бекасова // Материалы Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации», Киров 15-26 апреля 2013. - Киров: Изд-во Вятского государственного университета, 2013. -С. 1669-1670.

12. **Какаулов С. В.** Исследование эффективности установок обеззараживания воды, оснащённых импульсным источником питания с повышенными электробезопасными свойствами / С. В. Какаулов, А. С. Юдин, И. Ф. Суворов и др. // Электробезопасность. -2014. -№ 4. -С. 31-38.

13. **Какаулов С. В.** Характеристики по обеззараживанию воды диафрагменным электрическим разрядом / С. В. Какаулов, И. Ф. Суворов, А. С. Юдин // Сб. трудов XI Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения», Чита 29 ноября - 2 декабря 2011. – Чита: Изд-во Забайкальского государственного университета, 2011. Ч. 4, -С. 140-143.

14. **Какаулов С. В.** Обеззараживание питьевой воды технологией диафрагменного электрического разряда / С. В. Какаулов, И. Ф. Суворов, А. С. Юдин // Материалы II Международной научно-практической конференции «Чистая капля воды», Чита 22 марта 2012. – Чита: Изд-во Забайкальского государственного университета, 2012. -С. 44-46.

15. **Какаулов С. В.** Влияние водородного показателя воды на образование ионов меди и серебра в процессе обеззараживания воды диафрагменным электрическим разрядом / С. В. Какаулов, И. Ф. Суворов, Н. С. Кузнецова и др.// Материалы VII Международной заочной научно-практической конференции «Энергетика в современном мире», Чита 01-04 декабря 2015. - Чита: Изд-во Забайкальского государственного университета, 2015. -С. 46-49.

Патенты РФ

16. Устройство для обеззараживания и очистки воды: пат. 137284 Рос. Федерация / С. В. Какаулов, И. Ф. Суворов, Т. В. Рахлецова и др.: Заявитель и патентообладатель Забайкальский государственный университет. - № 2013128091/05. заявл. 19.06.2013, опубл. 10.02.2014. Пат. РФ на полезную модель 92002, МПК C02F 1/46.

17. Импульсный источник питания: пат. 151949 Рос. Федерация / С. В. Какаулов, А. Е. Дворяткин, И. Ф. Суворов и др.: Заявитель и патентообладатель Забайкальский государственный университет. -№ 2013151953/08. заявл. 21.11.2013, опубл. 20.04.2015.